



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

**REDES CON TECNOLOGÍA ADD-DROP MULTIPLEXER ÓPTICOS
REDIRECCIONABLES ROADM FRENTE A REDES DWDM, MPLS Y SDH**

Luis Ariel Rosales Ruiz

Asesorado por el Ing. Juan Miguel Sitavi Cos

Guatemala, septiembre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REDES CON TECNOLOGÍA ADD-DROP MULTIPLEXER ÓPTICOS
REDIRECCIONABLES ROADM FRENTE A REDES DWDM, MPLS Y SDH**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

LUIS ARIEL ROSALES RUIZ

ASESORADO POR EL ING. JUAN MIGUEL SITAVI COS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

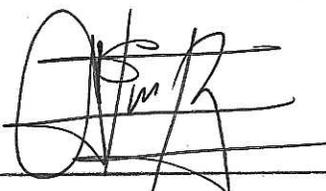
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Péñate
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

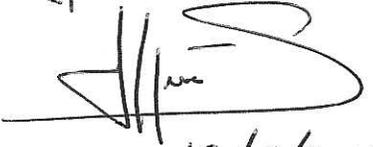
En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

REDES CON TECNOLOGÍA ADD-DROP MULTIPLEXER ÓPTICOS REDIRECCIONABLES ROADM FRENTE A REDES DWDM, MPLS Y SDH

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 19 de octubre 2009.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'L' and 'R' with a smaller 'A' in between, all written over a horizontal line.

Luis Ariel Rosales Ruiz.

Aprobada

19/6/2012

Guatemala 31 de Mayo del 2012

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

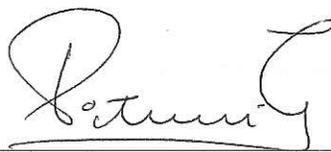
Estimado Ingeniero Guzmán.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado: **“REDES CON TECNOLOGIA ADD-DROP MULTIPLEXER OPTICOS REDIRECCIONABLES ROADM FRENTE A REDES DWDM, MPLS Y SDH”**, del señor Luis Ariel Rosales Ruiz, con el carnet No 2002 12497, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

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

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Ing. Juan Miguel Sitavi Cos
Col 2907

Ing. Juan Miguel Sitavi Cos
Colegiado 2907
Asesor



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 27. 2012
Guatemala, 22 de JUNIO 2012.

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

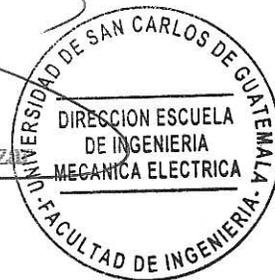
Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
"REDES CON TECNOLOGÍA ADD-DROP MULTIPLEXER
ÓPTICOS REDIRECCIONABLES ROADM FRENTE A REDES
DWDM, MPLS Y SDH", del estudiante Luis Ariel Rosales Ruiz,
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



CEGS/sro



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 38.2012.

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; Luis Ariel Rosales Ruiz titulado: "REDES CON TECNOLOGÍA ADD-DROP MULTIPLEXER ÓPTICOS REDIRECCIONALES ROADM FRENTE A REDES DWDM, MPLS Y SDH", procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

GUATEMALA, 17 DE JULIO 2012.





DTG. 456.2012

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 CON TECNOLOGÍA ADD-DROP MULTIPLEXER ÓPTICOS REDIRECCIONABLES ROADM FRENTE A REDES DWDM, MPLS Y SDH**, presentado por el estudiante universitario **Luis Ariel Rosales Ruiz**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 21 de septiembre de 2012.



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Mi familia

Hoy soy ingeniero electrónico y lo debo a la fuerza de la juventud de mis padres dedicada a mí, lo debo al desgaste de sus ojos a consecuencia del trabajo, lo debo a la forma tan especial en que me han encomendado a Dios; lo debo al amor de mi madre desde cuando estuve en su vientre, que esto sea una mínima recompensa a sus sacrificios.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por estar conmigo en todo momento, darme sabiduría, dirección, fuerza, protección y permitirme lograr este triunfo.
- Mis padres** Luis Alberto Rosales Melendez (q.e.p.d.), Amanda Leticia Ruiz Ramirez, por sus múltiples sacrificios, apoyo, confianza y amor incondicional que me brindaron, a ellos dedico este triunfo alcanzado.
- Mis hermanos** Everson Alberto y Brayan Israel, con cariño y aprecio por su apoyo.
- Mi esposa** Flor de María Gordillo, con cariño y aprecio, por su comprensión y ayuda incondicional para la culminación de mi carrera profesional.
- Mis hijos** Alison Sofia y Luis Alberto Rosales Gordillo, por hacer desbordar mi corazón de amor, he inyectar felicidad, alegría y energía infinita a mi vida.
- Mis amigos** A todos los que de una u otra forma contribuyeron con conocimientos, motivación y consejos para alcanzar este triunfo.

**Universidad
de San Carlos
de Guatemala**

En especial a la Facultad de Ingeniería, por darme la oportunidad de expandir mis conocimientos científicos, técnicos y éticos en tan prestigiosa casa de estudios.

**Ing. Juan
Sitavi**

Por el apoyo técnico profesional brindado de manera incondicional y por su valiosa asesoría al presente trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ELEMENTOS DE UNA RED WDM	1
1.1. Terminales de línea óptica.....	6
1.2. Amplificadores de línea ópticos	8
1.3. Multiplexores add / drop ópticos	9
1.3.1. Arquitectura OADM.....	12
1.3.2. OADMs reconfigurables.....	19
1.4. Crosconector óptico.....	23
1.4.1. Configuraciones de OXC completamente ópticas	32
2. DISEÑO DE RED WDM	37
2.1. Combinaciones de costo de red	40
2.2. Problemas LTD y RWA.....	42
2.2.1. Diseño de topología de canal óptico	43
2.2.2. Ruteo y asignación de longitudes de onda	44
2.2.3. Conversión de longitud de onda	47
2.2.4. Relacionamiento con gráfica de colores	51
2.3. Dimensionamiento de ruteo y longitud de onda.....	52
2.4. Dimensionamiento de modelos estáticos	53

2.4.1.	Modelo de primer paso	55
2.4.2.	Modelo de bloqueo	57
2.5.	Modelos de dimensionamiento de máxima carga	61
2.5.1.	Solitud de canal óptico fuera de línea.....	63
3.	OTRAS TECNOLOGÍAS.....	67
3.1.	MPLS	67
3.1.1.	Características de MPLS.....	68
3.1.2.	Aplicaciones de MPLS.....	70
3.2.	DWDM.....	72
3.2.1.	Características de DWDM	73
3.2.2.	Aplicaciones DWDM.....	77
3.3.	SDH.....	79
3.3.1.	Generalidades de SDH.....	80
3.3.2.	Aplicaciones de SDH.....	82
4.	ANÁLISIS COMPARATIVO	85
4.1.	Propósito de una red de transporte	85
4.2.	Comparación de distintas tecnologías con respecto a tecnología ROADM	87
4.2.1.	Comparaciones técnicas	87
4.2.2.	Análisis económico detallado	89
4.2.3.	Aplicación de ROADM en Guatemala	96
4.2.4.	Ventajas a futuro y perspectivas.....	99
4.3.	Conclusiones.....	104
5.	APLICACIÓN DE ROADM	107
5.1.	Estudios de sitio	107
5.1.1.	Ejecución de estudio de sitio	107

5.1.2.	Resultados de un estudio de sitio	109
5.2.	Armado y comisionamiento	112
5.2.1.	PDU (<i>Power Distribution Unit</i>).	112
5.2.2.	Chasis.....	113
5.2.3.	FAN.....	114
5.2.4.	Fuente de poder (<i>Power Source</i>).....	115
5.2.5.	OMD (Multiplexor-Demultiplexor Óptico).	116
5.2.6.	OADM (Optical Add Drop Multiplexer)	116
5.2.7.	Unidades tributarias (Tribute Units)	117
5.2.8.	Comisionamiento	117
5.3.	Instalación mecánica	118
5.3.1.	Montaje de equipo.	119
5.3.2.	Aterrizaje de equipos.	121
5.3.3.	Tendido de energía.....	122
5.3.4.	Limpieza y tendido de fibra.....	123
5.4.	Pruebas de aceptación	125
5.4.1.	Pruebas de aceptación de sitio.....	126
5.4.2.	Pruebas de aceptación de red.....	126
5.4.3.	Pruebas de análisis de espectro óptico.	127
CONCLUSIONES		131
RECOMENDACIONES.....		133
BIBLIOGRAFÍA.....		135

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Incremento en capacidad de los enlaces de transmisión.	2
2.	Una red de ruteo de longitud de onda	3
3.	Diagrama a bloques de una terminal de línea óptica.	7
4.	Diagrama a bloques de un amplificador típico de línea óptica.	9
5.	Un ejemplo lineal de red de tres nodos para ilustrar el papel de multiplexor add/drop óptico	10
6.	Diferentes arquitecturas OADM.....	15
7.	Impacto de los cambios de tráfico en una red mediante OADMs en serie	18
8.	Arquitecturas con OADM reconfigurables.	20
9.	El uso de un OXC en la red.....	23
10.	Diferentes escenarios para el despliegue de OXC.....	26
11.	Ilustración de la necesidad de la conversión de longitud de onda.....	32
12.	Un nodo real de red completamente óptico que combina crosconexiones de núcleo óptico con crosconexiones de núcleo eléctrico.....	33
13.	Un OXC con plano de longitud de onda y núcleo óptico, que consiste en un plano de conmutadores ópticos, uno para cada longitud de onda.	34
14.	Definición con terminaciones add / drop en un enfoque plano longitud de onda.	35
15.	Una red de tres nodos	38

16.	Tres diferentes topologías de canal óptico que se puede implementar en una topología de anillo de fibra.	41
17.	Diferentes modelos de red correspondiente a bordes dirigidos / no dirigidos y canales ópticos dirigido / no dirigidos.	46
18.	Un nodo con capacidad de conversión de longitud de onda fija.	48
19.	Un nodo con capacidad de conversión de longitud de onda limitada. ...	49
20.	Equivalencia entre redes con fibra múltiple y redes con fibra única.	50
21.	Ilustración de la relación de coloreo de lambdas.	51
22.	Una red de 20 nodos y 32 enlaces que representa el esqueleto de ARPANET.	56
23.	Factor de reutilización contra el número de longitudes de onda para una grafica aleatoria de 32 nodos con un grado promedio de 4.	59
24.	Factor de reutilización de registrarse en el número de nodos de grafos aleatorios con un grado promedio de 4.	61
25.	(a) Gráfico de intervalos. (b) la asignación de longitud de onda realizada por el algoritmo 2.3.	64
26.	Modelo OSI	69
27.	Aplicación de MPLS en Guatemala.	70
28.	Redes MPLS sobre redes SDH y/o DWDM, para cubrir áreas regionales	71
29.	Diagrama a bloques de un enlace DWDM.	74
30.	Anillo DWDM.	76
31.	Aplicación de DWDM en Guatemala.	79
32.	Estructura de una red PDH punto a punto.	80
33.	Red de administración.	82
34.	Aplicación de SDH en Guatemala.	84
35.	Red de telecomunicaciones.	86
36.	Diagrama esquemático de anillo ROADM.	91
37.	Aplicación de ROADM en Guatemala.	98

38.	ROADM insertado en la capa física.	99
39.	Ejemplo de distribución de servicios sobre una conexión FTTH a 100 Mbps	101
40.	Arquitectura global de red todo óptica.	102
41.	<i>Floor plan</i> sitio a implementar ROADM.	110
42.	Distribución de equipos en <i>rack</i> existente.	111
43.	Comparación de energía total y energía utilizada.	111
44.	Comparación de energía disponible y energía necesaria para ROADM.	112
45.	PDU (<i>Power Unit Distribution</i>) para ROADM.	113
46.	Chasis de ROADM.	113
47.	Ejemplos de módulos FAN.	114
48.	Fuentes de poder principal (A) y de protección (B).	115
49.	Ejemplos de OMD.	116
50.	Ejemplo de OADM en ROADM.	117
51.	Aterrizaje de para manipulación de equipo.	119
52.	Orificios para el montaje de equipos en <i>rack</i>	120
53.	Equipo ROADM montado en <i>rack</i> ETSI.	120
54.	Conexión de tierra física en equipo.	121
55.	Conexión de tierra física en equipo.	122
56.	Peinado de cables de energía.	123
57.	Kit de limpieza de fibras ópticas y puertos ópticos.	124
58.	Curvatura correcta de fibras ópticas.	125
59.	Espectro óptico.	128
60.	Espectro de un sistema WDM.	129
61.	Medida de un sistema WDM.	130

TABLAS

I.	Comparación de diferentes arquitecturas OADM.....	16
II.	Comparación de diferentes configuraciones de OXC.	29
III.	Las diferentes combinaciones de tipos de canales ópticos y los bordes de la red.	45
IV.	Comparación de ROADM frente a otras tecnologías.	88
V.	Tamaño del proyecto	92
VI.	Tabla de inversión.....	92
VII.	Capital de trabajo.....	92
VIII.	Otros valores.....	93
IX.	Egresos por período.....	93
X.	Cantidad de servicios vendidos por período.	94
XI.	Flujo de ingresos por período.	94
XII.	Calculo valor desecho planta externa.	95
XIII.	Detalle por períodos.....	95
XIV.	Resultados.	96
XV.	Servicios que requieren gran ancho de banda en la red.....	100

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
dB	Decibeles
Δ	Delta
!	Factorial
λ	Longitud de onda
μm	Micrómetros
nm	Nanómetros
ρ	Ro
Σ	Sumatoria

GLOSARIO

ATM	<i>Asynchronour Transfer Mode</i> , Modo de transferencia asíncrona
Canal óptico	Ruta de longitud de onda
CoS	<i>Class of service</i> , Clase de servicio
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexión por división de longitud de onda densa
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> , Amplificador de fibra dopada
FAN	Dispositivo para enfriamiento por aire.
Full-Duplex	Completamente bidireccional
GB o Gb	Gigabit
GMPLS	<i>General multiprotocol label switching</i> , Multiprotocolo general de conmutación de etiquetas
IP	<i>Internet protocol</i> , Protocolo de internet
IP VPN	<i>IP Virtual private network</i> , Red privada virtual IP

LAN	<i>Local area network</i> , Red de área local
LR	Long Range, Largo alcance
Modelo OSI	<i>Open system interconnection</i> , Modelo de interconexión de sistemas abiertos.
MPLS	<i>Multiprotocol Label Swiching</i> , Multiprotocolo de conmutación de etiquetas
OADM	<i>Multiplexer Add-Drop Optical</i> , Multiplexor Óptico de bajada-subida
OC- 48	Optical carrier level 48, Contenedor óptico nivel 48
OC-192	<i>Optical carrier level 192</i> , Contendor óptico nivel 192
OLT	<i>Optical Line Terminal</i> , Terminal de línea óptica
OMD	Optical multiplexer demultiplexer, Multiplexor-demultiplexor óptico
OSC	<i>Optical Supervisor Channel</i> , Canal de supervisión óptico
OXC	<i>Optical Crossconnects</i> , Crosconector óptico
PDH	<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i> , Jerarquía Digital Plesioncrona

ROADM	<i>Multiplexer Add-Drop Optical Reconfigurable,</i> Multiplexor Óptico Reconfigurable de bajada-subida
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy,</i> Jerarquía Digital Síncrona
SR	<i>Short Range,</i> Corto alcance
STM	<i>Synchronous transport module,</i> Modulo de transporte síncrono
TDM	<i>Time división multiplexing,</i> Multiplexión por división de tiempo
VSR	<i>Very Short Range,</i> Muy corto alcance
WAN	<i>Wide Area Network,</i> Red de área amplia
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing,</i> Multiplexión por división de longitud de onda

RESUMEN

Los sistemas de telecomunicaciones modernos han evolucionado de manera vertiginosa en los últimos años, la última generación de redes de transporte esta implementada con tecnología ROADM, un compendio de los trabajos teóricos y prácticos que se realizaron para llevar a cabo la implementación de una red de telecomunicaciones por fibra óptica basada en tecnología ROADM (*Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer* – Multiplexor de bajada/subida óptico reconfigurable); así como del diseño propiamente alcanzado. La particularidad que separa este diseño de otros es que, para efectos más comerciales que técnicos se han desarrollado para soportar diferentes equipos de acceso es decir equipos de acceso de tecnología diferente; con un transporte y todas las posibilidades técnicas consideradas para su gradual crecimiento por lambda o canales ópticos de 10 Gigabits por segundo hasta alcanzar su capacidad total. En el cuerpo del trabajo se explican los principios de la tecnología, así como los detalles técnicos de la elección como el transporte por excelencia de servicios.

Los primeros dos capítulos presentan una descripción del funcionamiento de ROADM, así como la parte teórica sobre la cual se sustenta. Mientras que en los últimos se detallan aspectos técnicos, así como la implementación de los equipos, tipos de interfaces, pruebas y otros temas relacionados con el diseño final alcanzado. Se incluyen los tipos de equipos utilizados y sitios involucrados.

Descritos los aspectos técnicos más relevantes; se toman en cuenta también aspectos económicos que influyen en el diseño del proyecto.

OBJETIVOS

General

Mostrar los beneficios que conlleva la implementación de redes ROADM, el impacto tecnológico que representa, y la integración que se da con respecto a las redes actuales de transporte.

Específicos

1. Mostrar las aplicaciones de las redes de tecnologías anteriores a ROADM.
2. Realizar un marco teórico que permita comprender el problema que resuelve ROADM.
3. Mostrar la superioridad de ROADM frente a las tecnologías de transporte antecesoras.
4. Presentar el impacto tecnológico que representa ROADM en las telecomunicaciones.
5. Mostrar los beneficios económicos hacia proveedores.
6. Mostrar los beneficios de aplicación hacia consumidores finales.

INTRODUCCIÓN

Actualmente se está viendo cambios dramáticos en la industria de las telecomunicaciones que tienen implicaciones de mucha influencia en los estilos de vida. Primero y más importante es la constante necesidad, incesante de mayor capacidad en la red. Esta demanda es alimentada por varios factores. El enorme crecimiento de Internet y la *World Wide Web*, tanto en términos de número de usuarios, así como la cantidad de tiempo y ancho de banda requerido por cada usuario, es un factor importante. Un ejemplo simple de este fenómeno es: una llamada de teléfono de voz promedio dura unos 3 minutos; en contraste, usuarios que se conectan a Internet a través de líneas de acceso telefónico suelen permanecer en un promedio de 20 minutos. Por lo que una llamada de Internet trae como mínimo seis veces tráfico en un red en comparación con una llamada de voz.

El tráfico de Internet ha sido duplicando a cada cuatro o seis meses, y esta tendencia parece establecerse por un tiempo. Mientras tanto se está viendo el despliegue permanente de tecnologías de acceso de banda ancha como suscriptor digital de línea (DSL) y módems de cable, que proporcionan anchos de banda por usuario de 1 *Megabits* por segundo, contrastaban contra los 28-56 kilobits por segundo disponibles a través de líneas de acceso telefónico. El impacto de estas implementaciones es bastante significativo. Un aumento del 10% en penetración de ADSL entre los 100 millones de hogares totales traerá en 1 *Terabits* por segundo de tráfico en la red, suponiendo que el 10% de estos usuarios están simultáneamente.

Al mismo tiempo, las empresas dependen hoy de redes de alta velocidad para llevar a cabo sus negocios. Estas redes se utilizan para interconectar varias ubicaciones dentro de una empresa, así como entre las empresas para las transacciones de negocio a negocio. Las grandes corporaciones que solía arrendar 1,5 *Megabits* por segundo líneas para interconectar sus sitios internos comúnmente están arrendando conexiones de 155 *Megabits* por segundo hoy. También hay una fuerte correlación entre el aumento de la demanda y el costo de ancho de banda.

Los avances tecnológicos han logrado continuamente reducir el costo de ancho de banda. Esta reducción del costo de ancho de banda en turno acelero a su vez el desarrollo de un nuevo conjunto de aplicaciones que hacen uso de más ancho de banda y afecta a los patrones de comportamiento. Un ejemplo simple es como mientras las llamadas telefónicas son más baratas, las personas pasan más tiempo en el teléfono. Esto a su vez impulsa la necesidad de mayor ancho de banda en la red. Este ciclo de retroalimentación positiva no presenta ningún signo de aplacarse en un futuro cercano.

También hay un cambio significativo en el tipo de tráfico que esta dominando cada vez más la red. Gran parte de la nueva demanda está siendo impulsada por datos, en lugar de tráfico de voz tradicionales una tendencia que ya ha existido durante bastante tiempo. Sin embargo, gran parte de la red hoy está diseñada para soportar eficientemente tráfico de voz, no de datos. Este cambio en la mezcla de tráfico está causando que se tenga que reexaminar la manera que construcción de redes, el tipo de servicios que proporcionan, e incluso su modelo de negocios completo, en muchos casos, los proveedores de servicios.

Estos factores han impulsado el desarrollo de redes ópticas de alta capacidad y su notablemente rápida transición desde los laboratorios de investigación en distribución comercial. La presente tesis pretende cubrir las tecnologías de redes ópticas, sistemas y problemas de red, así como consideraciones de implementación económica y otros.

1. ELEMENTOS DE UNA RED WDM

A lo largo de los últimos años diversos factores han propiciado el importante desarrollo tecnológico de todos los equipos y servicios relacionados con las telecomunicaciones: grandes avances técnicos, crecimiento de la red internet. Todos estos factores están convirtiendo esta era, en la era de la información y las comunicaciones.

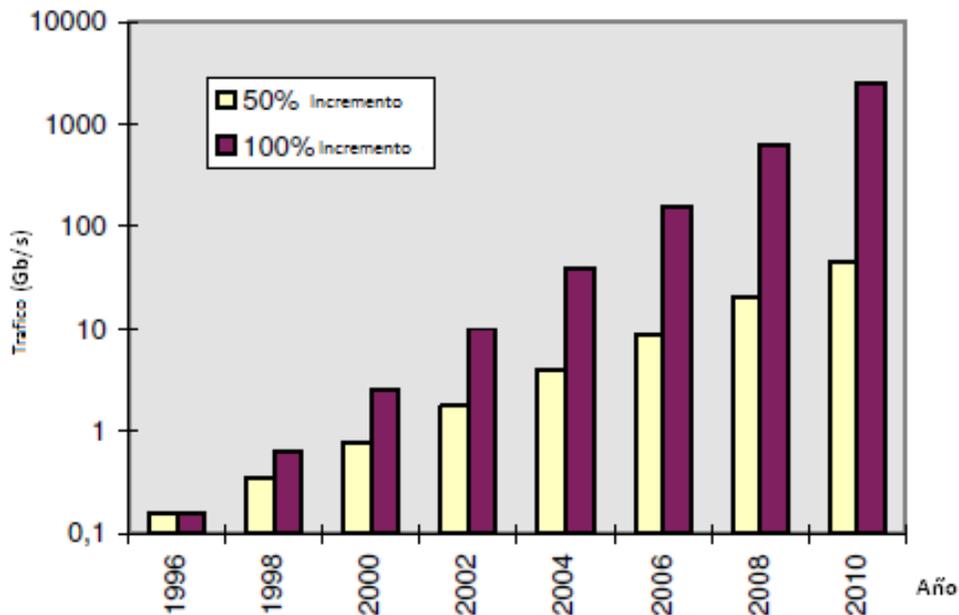
Para lograr que esta era se materialice, es necesario mejorar las infraestructuras que soportan servicios multimedia de diversa índole. Así, el éxito de esta revolución global sin precedentes, depende en gran medida de la instalación de redes de gran capacidad y bajo costo, siendo la fibra óptica un elemento importante para los sistemas de telecomunicaciones.

En un principio la fibra óptica fue implantada para sistemas de transmisión a larga distancia, pero la tendencia es que reemplace al cable coaxial y de cobre de las redes telefónicas locales, de las redes de televisión por cable y de las redes de datos de área local. La completa explotación de todas las posibilidades que ofrece la fibra óptica no es sencilla, pero se ha progresado tremendamente en los últimos 20 años, durante los cuales la capacidad de las redes de largo recorrido se ha duplicada cada dos años. De acuerdo a la figura 1, considerando un crecimiento anual del 100%, se llega a que los requerimientos de capacidad para la próxima generación de equipos serán del orden de *Terabits*, para el período iniciando justamente en el 2011.

Las redes WDM proporcionan conmutación de circuitos de servicio de extremo a extremo en los canales ópticos, entre los nodos de la red a sus

usuarios o clientes. Un canal óptico o longitud de onda entre dos nodos de red se enruta a través de múltiples nodos intermedios. Los nodos intermedios pueden cambiar y convertir longitudes de onda. Se puede pensar en estas redes como redes de enrutamiento de longitud de onda. Los canales ópticos pueden ser creados y eliminados a disposición del operador de red.

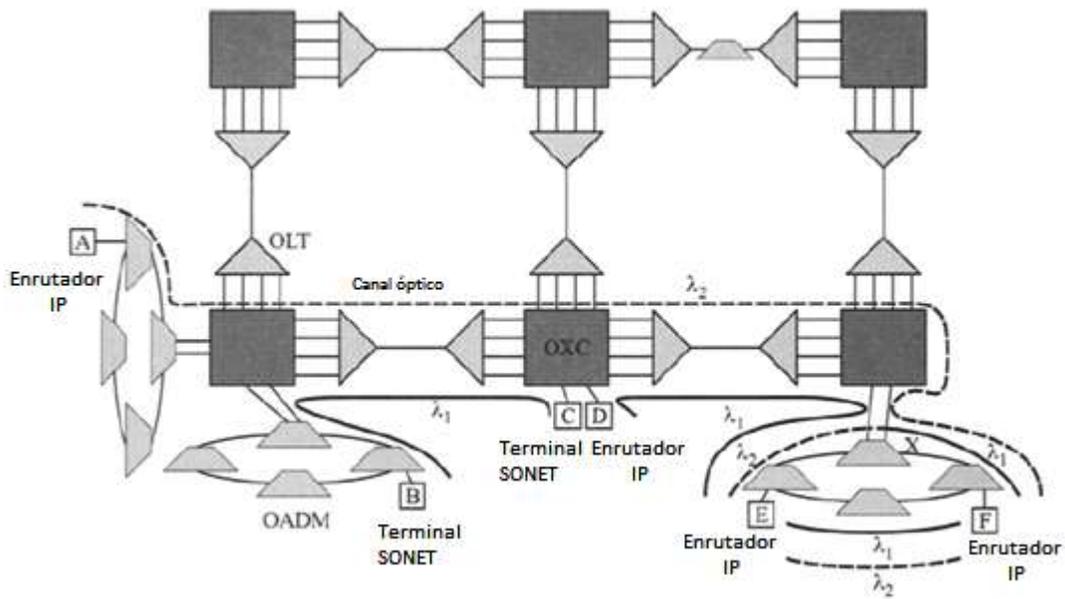
Figura 1. Incremento en capacidad de los enlaces de transmisión



Fuente: www.ramonmillan.com/documentos/PFCCapitulo2.pdf. Consulta: 10 de julio de 2008.

En la figura 2 se presenta una arquitectura de red. La red consta de terminales ópticos de línea (OLTs), multiplexores *add/drop* ópticos (OADMs) y croscnectores ópticos (OXC) interconectados a través de enlaces de fibra. En adición, los OLTs, OADMs, y OXC pueden por sí mismos incorporar amplificadores ópticos para compensar las pérdidas. Los OLTs son utilizados ampliamente, y los OADMs se despliegan en menor medida. Los OXC están en plena expansión.

Figura 2. Una red de ruteo de longitud de onda



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 404.

La arquitectura soporta una variedad de topologías, incluyendo topologías anillo y de malla. Los multiplexores OLTs con múltiples longitudes de onda en un único hilo de fibra también pueden demultiplexar una señal WDM compuesta en longitudes de onda individuales. Los OLTs se utilizan en cada extremo de un enlace punto-a-punto. Los OADMs se utilizan en los lugares donde se necesita bajar una parte de una longitud de onda y se necesita que otra parte sean enviadas a otros destinos, normalmente se utilizan en anillo lineal u otras topologías. Los OXCs desempeñan una función similar pero en una escala mucho mayor en términos de número de puertos y longitudes de onda en cuestión, y se implementan en topologías de malla o para interconectar múltiples anillos. Los usuarios (o clientes) de esta red están conectados a los OADMs. La red soporta una gran variedad de tipos de cliente, tales como enrutadores IP, conmutadores ATM, SONET, SDH y ADM.

Cada enlace puede soportar un número de determinadas longitudes de onda. A continuación se describirán algunas características notables de esta arquitectura:

La reutilización de longitud de onda. En la figura 2 se ve que múltiples canales ópticos en la red pueden utilizar la misma longitud de onda, siempre que no se superpongan en ningún enlace. Por ejemplo la λ_x puede utilizarse en todos los enlaces para dar un circuito punto a punto que utiliza la λ_x en todo el trayecto.

Conversión de longitud de onda. Los canales ópticos pueden someterse a la conversión de longitud de onda a lo largo de su ruta. La figura 2 muestra un canal óptico tal que utiliza la longitud de onda λ_2 en el enlace EX, se convierte en λ_1 en el nodo X, y utiliza esa longitud de onda en el enlace XF. La conversión de longitud de onda también es necesaria en los bordes de la red para adaptar las señales de fuera de la red es decir del cliente en una longitud de onda adecuada para su uso dentro de la red, para realizar conversión de longitud de onda es necesario utilizar transpondedores.

Transparencia. La transparencia se refiere al hecho de que el canal óptico puede transmitir datos en una variedad de velocidades de bits, protocolos, etc. Esto permite que la capa óptica pueda soportar una variedad de capas superiores al mismo tiempo. Por ejemplo, la figura 2 muestra canales ópticos entre pares de terminales SDH, así como entre los pares de *routers* IP. Esto se debe a que la capa WDM sirve de capa de transporte de nivel 1 a otras capas superiores.

La conmutación de circuitos. Un canal óptico proporcionado por la capa óptica puede ser creado o eliminado dependiendo la demanda. Estos son

análogos a la creación o eliminación de circuitos en las redes de conmutación de circuitos, excepto que la velocidad a la que se crean o se eliminan es probable que sea mucho más lenta que, por ejemplo, la velocidad para las redes telefónicas con circuitos de voz. De hecho, ahora mismo estos canales ópticos, una vez establecidos, permanecen en la red durante meses o años. La tendencia actual es utilizar redes *ASON Automatic Switch Optical Networks*, las cuales darán la flexibilidad de conmutación de circuitos ópticos en tiempo real, esta funcionalidad dentro de las redes se conoce como *Control Plane* y utiliza el protocolo GMPLS para llevar a cabo esta función. Hay que tener en cuenta que la conmutación de paquetes no está prevista dentro de la capa óptica ya que únicamente sirve de transporte para capas superiores. La tecnología de conmutación de paquetes ópticos es todavía bastante inmadura.

Supervivencia. La red puede ser configurada de tal forma que, en el caso de fallos, los canales ópticos pueden ser desviados por caminos alternativos de forma automática. Esto proporciona un alto grado de flexibilidad de la red, esta función se conoce como *Recovery* que es diferente que es diferente a la función de protección.

Topología de canal óptico. La topología de canal óptico no es la topología de enlaces físicos de fibra óptica, más bien sería una topología virtual que entrelaza los equipos por ejemplo *routers* en una red IP, es decir los equipos que tributan el tráfico que se desea intercambiar entre equipos. Se le llama topología de canal óptico así a la topología vista por las capas superiores utilizando la capa óptica. En una red IP que residen encima de la capa óptica, los canales ópticos aparecen como vínculos entre enrutadores IP. El conjunto de canales ópticos se puede adaptar para satisfacer las necesidades del tráfico de las capas superiores.

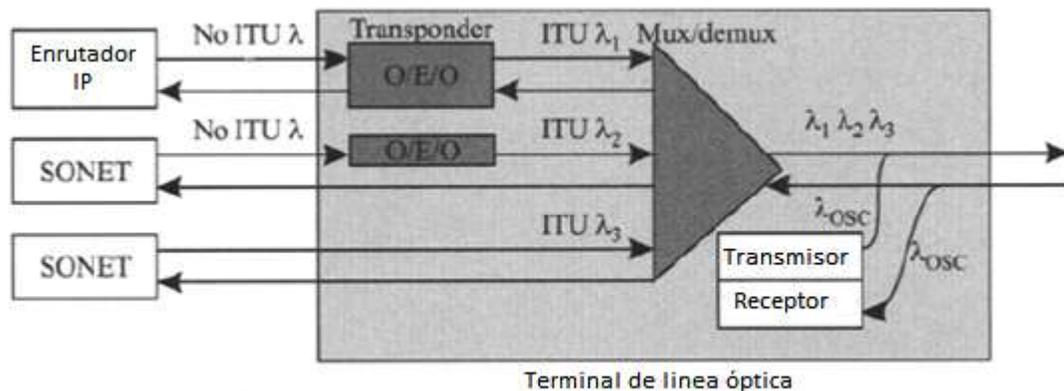
1.1. Terminales de línea óptica

Los OLTs son elementos de la red relativamente sencillos desde el punto de vista arquitectónico. Se utilizan en cada extremo de un punto-a-punto para multiplexar y demultiplexar las longitudes de onda. La figura 3 muestra los tres elementos funcionales dentro de un OLT: transpondedores, multiplexores de longitud de onda, y, opcionalmente, amplificadores ópticos (no se muestran en la figura). Un transpondedor adapta la señal procedente de un cliente de la red óptica en una señal adecuada para el uso dentro de la red óptica y viceversa. La interface entre el cliente y el transmisor puede variar dependiendo del cliente, la tasa de bits, y la distancia y / o la pérdida entre el cliente y el transpondedor. La interface más común es la interface de SONET / SDH de corto alcance (*Short-Reach* SR). También se está viendo la aparición en el mercado de enlaces más baratos de muy corto alcance (*Very Short-Reach* VSR) que son interfaces con velocidades de bits de 10 *Gigabits* por segundo y superiores.

Las longitudes de onda generadas por el transmisor suele ajustarse a las normas establecidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) en una longitud de onda de 1,55 micrómetros como es indicado en la figura 3, la señal de entrada puede ser una señal con longitud de onda de 1,3 micrómetros. El transpondedor puede añadir un encabezado adicional para efectos de la gestión de la red. También puede añadir corrección de errores (*Forward Error Correction* - FEC), en particular para las señales a 10 *Gigabits* por segundo, y tasas más altas. El transpondedor normalmente también monitorea la tasa de error de la señal en la entrada y los puntos de salida en la red. Por estas razones, la adaptación se hace generalmente a través de una conversión óptica a eléctrica a óptico (O / E / O).

En algunas situaciones, es posible que la adaptación esté activa sólo en la dirección de entrada y tener la longitud de onda de la ITU en dirección del cliente directamente a los equipos cliente. En algunas situaciones, se puede evitar el uso de transpondedores por tener la función de la adaptación dentro del equipo cliente que utiliza la red óptica, como un elemento de red SDH. Todo esto se muestra en la parte inferior de la figura 3. Esto reduce el costo y los resultados de una forma más compacta y genera una solución con mayor consumo-eficiencia. Sin embargo, esta especificación de interface de WDM es propiedad de cada proveedor WDM, y no hay normas. Los transpondedores constituyen generalmente la mayor parte de los costos y el consumo de energía en un OLT. Por lo tanto, reducir el número de transpondedores ayuda a minimizar tanto el costo y el tamaño de los equipos en la red.

Figura 3. Diagrama a bloques de una terminal de línea óptica



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 406.

La señal que sale de un transpondedor es multiplexada con otras señales en diferentes longitudes de onda usando un multiplexor de longitud de onda en una fibra. Además, se puede utilizar un amplificador óptico para aumentar la potencia de la señal, si es necesario. En la otra dirección, la señal WDM se

amplía de nuevo, si es necesario, antes de ser enviada a través de un demultiplexor que extrae las longitudes de onda individuales. Estas longitudes de onda son de nuevo terminadas en un transpondedor (si existe) o directamente en el equipo cliente.

Por último, el OLT termina también en un canal de supervisión óptico (OSC). El OSC es llevado en una longitud de onda por separado, diferente a las longitudes de onda para de llevar el tráfico real. Se utiliza para supervisar el rendimiento de los amplificadores en el enlace, así como gestionar los equipos.

1.2. Amplificadores de línea ópticos

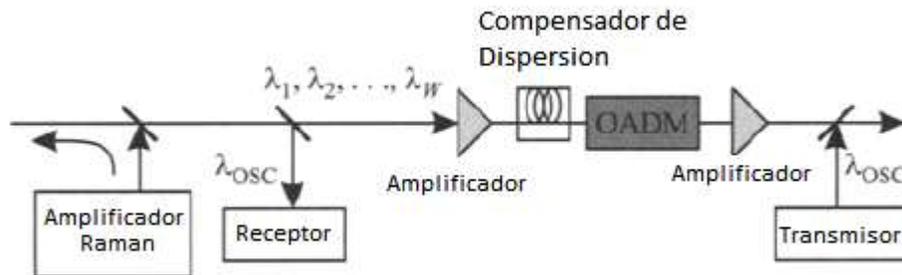
Los amplificadores ópticos de línea se utilizan en intervalos periódicos, por lo general de 80 - 120 kilómetros. La figura 4 muestra un diagrama de bloques de un amplificador de línea óptica bastante estándar. Los amplificadores típicos utilizan dos o más bloques de ganancia en cascada, con acceso llamado *midstage*.

Esta característica permite que algunos elementos de pérdida que se colocan entre las dos etapas del amplificador no tengan un impacto de ruido significativo en la figura global del amplificador. Estos elementos incluyen compensadores de dispersión para compensar la dispersión cromática acumulada a lo largo del enlace. Los amplificadores también se incluyen en el control de ganancia y monitoreo del desempeño de la señal.

También se ve el uso de los amplificadores Raman, donde un láser de alta potencia de la fuente se utiliza en cada sitio de amplificador a la fuente de la fibra en la dirección opuesta a la señal. El OSC se filtra en la entrada y se termina, y se vuelve a añadir a la salida. En un sistema con C y L bandas, las

bandas se separan en la entrada del amplificador y se utilizan EDFAs por separado para cada banda.

Figura 4. Diagrama a bloques de un amplificador típico de línea óptica



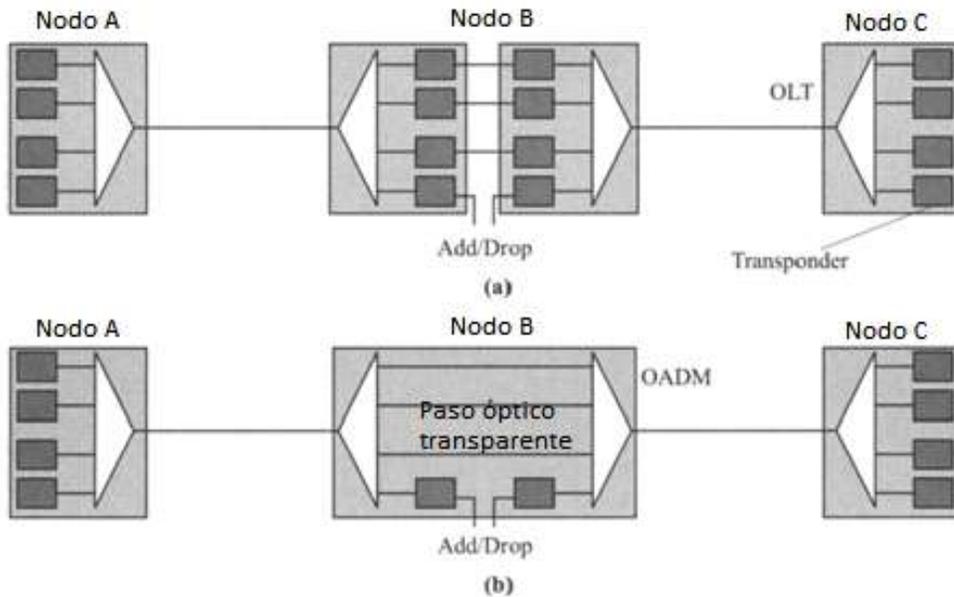
Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 408.

1.3. Multiplexores add / drop ópticos

Los multiplexores add/drop ópticos (OADMs) proporcionan un medio eficaz para el control del paso de tráfico en las redes metro y de larga distancia. Los OADMs se pueden utilizar como amplificador en redes de larga distancia, pero también pueden ser utilizados como elementos individuales de la red, en particular en las redes metro. Para entender los beneficios de los OADMs, se considera una red de tres nodos, por ejemplo, A, B y C, que se muestra en la figura 5, con enrutadores IP localizados en los nodos A, B y C. Esta red permite el tráfico entre A y B, B y C, y A y C. Sobre la base de la topología de red, el tráfico entre A y C pasa a través de nodo B. Para simplificar, se va a suponer *dúplex* completo de los enlaces y conexiones *full-dúplex*. Este es el caso para la mayoría de las redes de hoy. Así, la red de la figura 5 consiste en realidad en un par de fibras para transportar tráfico en direcciones opuestas.

Si se supone que el requisito de tráfico es el siguiente: una longitud de onda entre A y B, una longitud de onda entre B y C, y tres longitudes de onda entre A y C. Se supone ahora que se implementara el sistema WDM punto a punto para soportar esta demanda de tráfico. La solución resultante se muestra en la figura 5 (a). Dos sistemas de punto a punto desplegados, uno entre A y B y otra entre B y C. Cada enlace punto-a-punto utiliza un sistema de puntos OLT en cada extremo del enlace. El OLT incluye multiplexores, demultiplexores, y transpondedores. Estos transpondedores constituyen una porción significativa del costo del sistema.

Figura 5. **Un ejemplo lineal de red de tres nodos para ilustrar el papel de multiplexor add/drop óptico**



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 409.

A continuación se considera lo que se necesita en el nodo B. El nodo B tiene dos OLTs. Cada OLT da fin a cuatro longitudes de onda y por lo tanto requiere de cuatro transpondedores. Sin embargo, sólo una de las cuatro

longitudes de onda está destinada al nodo B. Los transpondedores restantes se utilizan para soportar el paso de tráfico entre A y C. Estos transpondedores están conectados espalda con espalda para proporcionar esta función. Por lo tanto, seis de los ocho transpondedores en el nodo B se utilizan para manejar el paso de tráfico, una proposición muy costosa.

Se puede ver ahora la solución con OADM mostrada en la figura 5 (b). En lugar de despliegue de punto a punto los sistemas WDM, ahora un despliegue de una red de enrutamiento de longitud de onda. La red utiliza un OLT en los nodos A y C y un OADM al nodo B. El OADM baja una de las cuatro longitudes de onda, que luego terminan en transpondedor. Las tres restantes pasan a través de longitudes de onda en el dominio óptico utilizando técnicas de filtrado relativamente simples, sin ser terminadas en transpondedores. El efecto neto es que son necesarios solo dos transpondedores en lugar de los ocho transpondedores necesarios para la solución que se muestra en la figura 5 (a). Esto representa una reducción importante de costos.

Volviendo al ejemplo, se puede hacer una pregunta, por qué los transpondedores son necesarios en la solución de la figura 5 (a) para manejar el tráfico de paso. En otras palabras, ¿por qué no se puede simplemente eliminar los transpondedores y conectar los multiplexores WDM y demultiplexores entre los dos OLTs en el nodo B directamente, como se muestra en la figura 5 (b), en lugar de diseñarlo con OADMs separados?. Si es posible. La utilización de los transpondedores se justifica cuando es necesario regenerar señales ópticas para aplicaciones punto a punto de larga distancia. La regeneración se refiere a 3R en la que se aplica regeneración de tiempo, de forma y amplitud de señal.

1.3.1. Arquitectura OADM

Varias arquitecturas han sido propuestas para construir OADMs. Los OADMs más prácticos utilizan uno o más filtros/multiplexores. Aquí, se ve un OADM como un cuadro negro con dos puertos de la línea que lleva el conjunto total de las longitudes de onda y un número de puertos locales, cada bajada y subida de una longitud de onda específica. Las características clave para buscar en un OADM son las siguientes:

- ¿Cuál es el número total de longitudes de onda que pueden ser compatibles?
- ¿Cuál es el número máximo de longitudes de onda que se pueden bajar o subir en el OADM?
- ¿Existen restricciones sobre si determinadas longitudes de onda se puede bajar o subir? Algunas arquitecturas sólo permiten un cierto conjunto de longitudes de onda para poder bajar / subir y no cualquier longitud de onda arbitraria. Esto tiene un impacto significativo en cómo el tráfico puede ser encaminado en la red, como se verá a continuación.
- ¿Es fácil agregar y quitar canales adicionales? ¿Es necesario interrumpir un servicio (es decir, interrumpir los canales existentes) con el fin de subir / bajar un canal adicional? Este es el caso de algunas arquitecturas, pero no todas.
- ¿La arquitectura es modular, en el sentido de que el costo es proporcional al número de canales bajados? Esto es importante para los proveedores

de servicios, porque prefieren pagar a medida que crecen en lugar de incurrir en un alto costo final.

- ¿Cuál es la complejidad de la capa física (transmisión) con el diseño trazado con OADM y cómo la adición de nuevos canales o nodos afectan a este diseño? Fundamentalmente, si la pérdida global del tráfico de paso visto por los canales es independiente del número de canales creados/eliminados, entonces se puede subir / bajar canales adicionales con un impacto mínimo en los canales existentes.
- ¿Puede el OADM reconfigurable, hacer que los canales seleccionados se puedan bajar / subir o solo pasarlos a través de *software* bajo control remoto? Por ejemplo, si se tiene que soltar un canal adicional a un nodo debido al crecimiento del tráfico en ese nodo, eso sería más sencillo hacerlo por medio de un *software* de control remoto en lugar de enviar personal técnico a esa ubicación.

La figura 6 muestra tres diferentes arquitecturas OADM, y en la tabla I se comparan sus características sobresalientes.

En la arquitectura paralela (figura 6 (a)), son demultiplexados todos los canales de entrada. Algunos de los canales demultiplexados pueden ser bajados a nivel local y otros pueden ser de paso. Así que no hay restricciones sobre qué canales se pueden bajar y subir. Así, la pérdida a través del OADM es fija, independiente de cuantos canales se hayan añadido o eliminado. Luego, agregar y eliminar canales adicionales no afecta a los canales existentes. Lamentablemente, esta arquitectura no es muy rentable para el manejo de un pequeño número de canales de bajada porque, independientemente de cómo se eliminan muchos canales, todos los canales deben ser multiplexados y

demultiplexados juntos de nuevo. Por lo tanto, se tiene que pagar todas las multiplexiones y demultiplexiones necesarias para todos los canales, incluso si se baja un solo canal. Sin embargo, la arquitectura se vuelve rentable si una gran parte del número total de canales se ha bajado, o si se desea una completa flexibilidad con respecto a agregar y quitar cualquier canal.

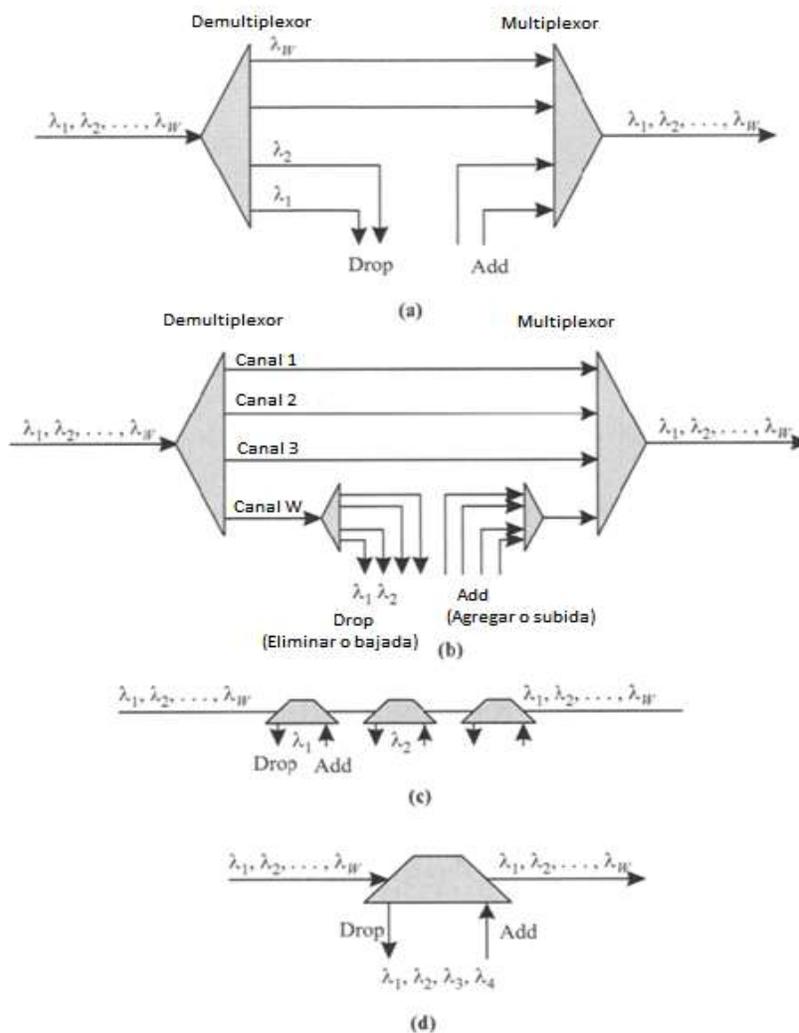
En el diseño de la arquitectura de la figura 6 (b) se puede mejorar los costos. Aquí, la multiplexión y demultiplexión se realiza en dos etapas. La primera etapa de demultiplexión separa las longitudes de onda en las bandas, y la segunda etapa separa de las bandas los canales individuales. Por ejemplo, un sistema de 16 canales puede ser implementado utilizando cuatro grupos, cada uno con 4 canales. Si sólo se bajaron 4 canales en un lugar, los otros 12 canales pueden ser enviados a través de nivel de banda, en vez de ser demultiplexados hasta el nivel de canal individual. Además que los ahorros de costos en los multiplexores y demultiplexores cuenta, el uso de bandas permite que las señales tengan una pérdida óptica más baja y una mejor uniformidad de la pérdida. Varios OADMs disponibles comercialmente utilizan este enfoque. Además, como el número de canales se hace grande, se utiliza un enfoque modular de varias etapas de multiplexión.

En la arquitectura de serie (figura 6 (c)), Es bajado y subido un solo canal de un conjunto de canales de entrada. Se llamara a este dispositivo de un solo canal OADM (SC-OADM).

Con el fin de quitar y añadir múltiples canales, se utilizan varios SC-OADMs en cascada. Esta arquitectura complementa de muchas formas a la arquitectura en paralelo descrita anteriormente. En esta arquitectura agregar y quitar canales adicionales interrumpe los canales existentes. Por lo tanto, es conveniente planificar qué conjunto de longitudes de onda se necesita bajar en

cada lugar antes de tiempo para reducir al mínimo las interrupciones. Por lo tanto, el costo es bajo si sólo un pequeño número de canales son bajados, el costo puede ser muy significativo, ya que varios dispositivos individuales debe estar en cascada. Hay también un impacto indirecto en el costo porque se eliminan los incrementos de pérdidas de más canales, que requieren el uso de la amplificación adicional.

Figura 6. **Diferentes arquitecturas OADM**



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 413.

Tabla I. **Comparación de diferentes arquitecturas OADM**

Característica	Paralela	Serial	Canales de Drop
D	=W	1	<<W
Restricciones de canal	Ninguna	Definido por la planificación de canales	Conjunto fijo de canales
Cambios de trafico	Poco exitoso	Exitoso	Parcialmente exitoso
Planificación de longitud de onda	Mínima	Necesaria	Altamente restringida
Perdida	Fijada	Varia	Fijada en D
Costo (pocas bajadas)	Alto	Bajo	Medio
Costo (muchas bajadas)	Bajo	Alto	Medio

Fuente: elaboración propia.

El aumento de la pérdida con el número de canales bajados desempeña un papel importante en el aumento de la complejidad del despliegue de las redes que usan OADMs en serie. Esto queda ilustrado con el ejemplo simple que se muestra en la figura 7. Si se supone que se tiene un enlace en el cual se crea un canal óptico entre un emisor y un receptor que soporta una pérdida de 25 decibeles. Ahora se considerara la situación cuando un canal óptico nuevo se va a crear en una longitud de onda diferente de un nodo A hacia un nodo C. Con el fin de crear este canal óptico, un SC-OADM adicional debe ser implementado en el nodo C (y en el nodo A) para bajar el nuevo canal óptico. Este OADM introduce una pérdida adicional, por ejemplo, de 3 decibeles, a los canales que pasan por C. La introducción de este nodo OADM aumenta la

pérdida del canal óptico de B a D a 28 decibeles, por lo que es inoperante. Si se supone que para solucionar este problema decidimos volver a regenerar este canal óptico en el nodo C. Con el fin de regenerar el canal óptico, se tiene que bajarlo en el nodo C, enviarlo a través de un regenerador, y subirlo de nuevo. Esto requiere un SC-OADM adicional en el nodo C, que introduce 3 decibeles de pérdida adicional para los canales que pasan por C. Por lo tanto la adición o eliminación de canales adicionales pueden tener un efecto dominó en todos los otros canales ópticos en la red. El uso de amplificadores ópticos, en relación con la cuidadosa ingeniería de enlace puede aliviar algunos de estos problemas. Los SC-OADMs pueden ser agregados hasta que el nivel de la pérdida se cubra, después se puede añadir cualquier otro amplificador.

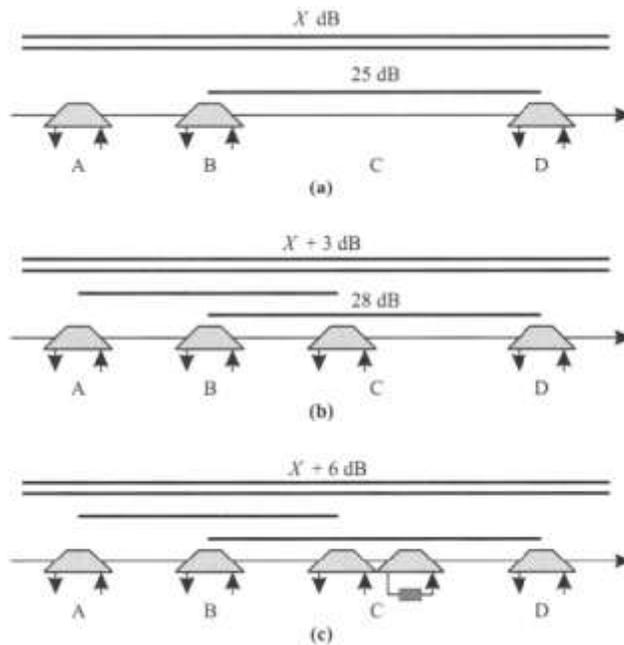
Se tiene que tener en cuenta que los canales de paso no se someten a ningún tipo de filtrado. Como resultado, cada uno de los canales ópticos sólo pasa a través de dos filtros, uno en el nodo de origen y uno en el nodo de destino. Así, las tolerancias de longitud de onda de los multiplexores y los láseres son menos estrictas, en comparación con la arquitectura paralela.

En la arquitectura de bajada (figura 6 (d)), un grupo fijo de los canales se ha bajado y subido del conjunto total de canales. Los canales bajados entonces típicamente pasan por un mayor nivel de demultiplexión donde se separan. Los canales subidos se combinan generalmente con acopladores simples y se añaden a los canales de paso. Una aplicación típica podría ser, por ejemplo, 4 canales adyacentes de 32 canales usando un filtro de banda.

Esta arquitectura trata de entrelazar la arquitectura serial y la arquitectura paralela. El número máximo de canales que se pueden bajar es determinado por el tipo de filtro de banda utilizado. Dentro de este grupo de canales, si se agregan / quitan canales adicionales no afecta a los otros canales ópticos en la

red como si es fija la pérdida de paso para todos los otros canales de este grupo.

Figura 7. **Impacto de los cambios de tráfico en una red mediante OADMs en serie**



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 415.

Sin embargo, esta arquitectura complica la planificación de la longitud de onda en la red y da serias limitaciones en lugares donde se asigna una longitud de onda porque el mismo conjunto de longitudes de onda se eliminan en cada lugar. Por ejemplo, si la longitud de onda λ_1 se añade en un nodo y se baja en el nodo siguiente, todas las otras longitudes de onda, por ejemplo, $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$, en la misma banda que λ_1 también se añaden en el mismo nodo y se bajan en el siguiente nodo. Lo que hace que esto no sea tan ideal es que una vez una longitud de onda se baja, como parte de una banda, probablemente tendrá que ser regenerada antes de que se pueda añadir de nuevo en la red. Así que en

este ejemplo, las longitudes de onda λ_2 , λ_3 , λ_4 tendrán que ser regeneradas en ambos nodos, incluso si están de paso. Es difícil calcular la pérdida del enlace para permitir paso óptico de estas longitudes de onda sin regeneración. Este problema se puede solucionar mediante el uso de diferentes variedades de OADMs, cada uno de ellos baja un conjunto diferente de canales. Esto hace que la planificación de la red sea complicada. Si las bajadas de longitud de onda pueden ser planificadas de antemano la red permanecería sin cambios, esto puede ser una opción viable. Sin embargo, en las redes donde el tráfico cambia con el tiempo, esto no puede ser fácil de planificar.

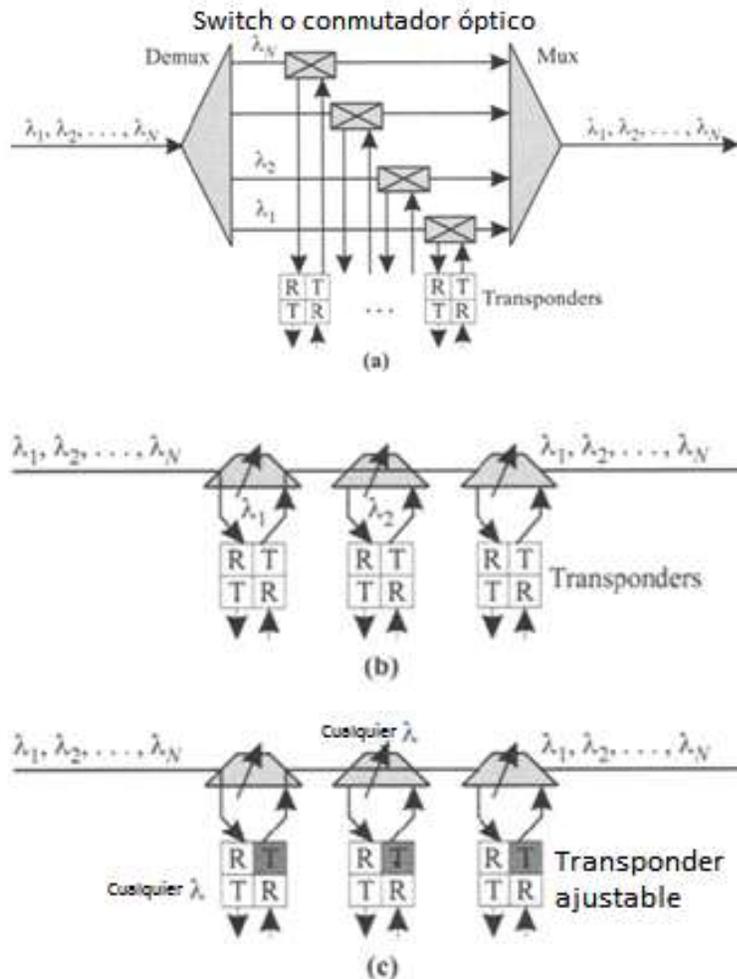
Las arquitecturas que se han comentado anteriormente son las que son factibles basados en la tecnología de hoy, y las implementaciones comerciales de todas estas existen en la actualidad. Es evidente que ninguno de ellos ofrece una solución perfecta que responda a una amplia gama de aplicaciones. Ciertamente, hay una tendencia hacia la construcción de arquitecturas paralelas, mientras se trata de mantener un precio inicial razonable.

1.3.2. OADMs reconfigurables

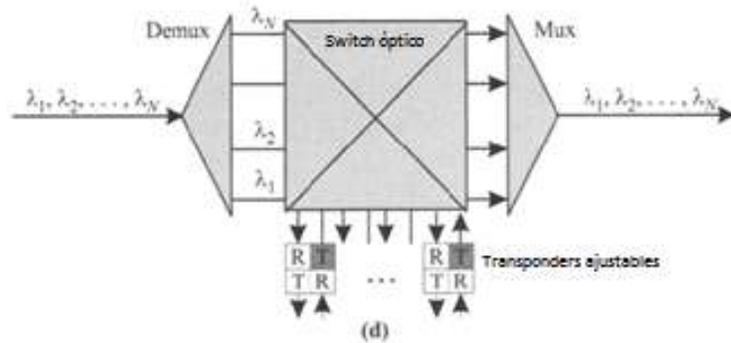
La reconfigurabilidad es una característica muy deseable en un OADM. Reconfigurabilidad se refiere a la capacidad de seleccionar la longitud de onda deseada para ser añadida y / o eliminada sobre la marcha, en lugar de tener que planificar e implementar el equipo adecuado. Esto permite a las compañías ser flexible en la planificación de su red y permite canales ópticos que se crearán y eliminarán de forma dinámica según sea necesario en la red. Las arquitecturas que se han considerado en la figura 6 no son reconfigurables en este sentido.

La figura 8 muestra unas arquitecturas diferentes con OADM reconfigurables. La figura 8 (a) muestra una variación de la arquitectura paralela. Utiliza conmutadores add/drop ópticos de longitudes de onda específicas como y cuando sea necesario. La figura 8 (b) muestra una variación de la arquitectura en serie en la que cada SC-OADM es ahora un dispositivo ajustable que es capaz de bajar y añadir una longitud de onda específica, o pasarla a través.

Figura 8. **Arquitecturas con OADM reconfigurables**



Continuación de la figura 8.



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 418.

Ambas de estas arquitecturas sólo resuelven parcialmente el problema de reconfiguración porque los transpondedores son necesarios para proporcionar la adaptación a la capa óptica. Existen dos tipos de transpondedores: un transpondedor para una determinada longitud de onda, y hay sintonizables. Un transpondedor de longitud de onda fija es el caso hoy en día de la mayoría de los transpondedores. Un transpondedor sintonizable, por otra parte, puede ser configurado para transmitir y recibir en cualquier longitud de onda deseada. Un transpondedor sintonizable utiliza un láser sintonizable WDM y un receptor de banda ancha capaz de recibir cualquier longitud de onda.

Para mostrar el uso de los OADMs reconfigurables y con transpondedores de longitud de onda fija se muestra la figura 8 (a) y (b), se debe implementar los transpondedores de antemano para que estén disponibles cuando sea necesario. Esto lleva a dos problemas: en primer lugar, es caro tener un transpondedor implementado y sin utilizar, mientras que el OADM asociado está pasando la longitud de onda. Pero si se supone que este costo se compensa con el valor añadido de ser capaz de crear y eliminar canales ópticos rápidamente. El segundo problema es que, aunque los OADMs son

reconfigurables, los transpondedores no lo son. Así que todavía se tiene que decidir de antemano en cuanto a qué transpondedor implementar dependiendo del conjunto de longitudes de onda, haciendo el problema de planificación de la red más limitado. Evitar estos problemas requiere el uso de transpondedores sintonizables, y las arquitecturas más flexibles que las que se muestran en la figura 8 (a) y (b).

Por ejemplo, la figura 8 (c) muestra una arquitectura de serie en la que hay reconfiguración completa. Cada SC-OADM sintonizable es capaz de bajar y subir cualquier longitud de onda y dejar el resto solo de paso. La adaptación se realiza mediante un transpondedor sintonizable. Esto proporciona un OADM totalmente reconfigurable. Del mismo modo, la figura 8 (d) muestra una arquitectura paralela con reconfiguración completa. Se tiene que tener en cuenta que esta arquitectura requiere el uso de un conmutador óptico de gran tamaño.

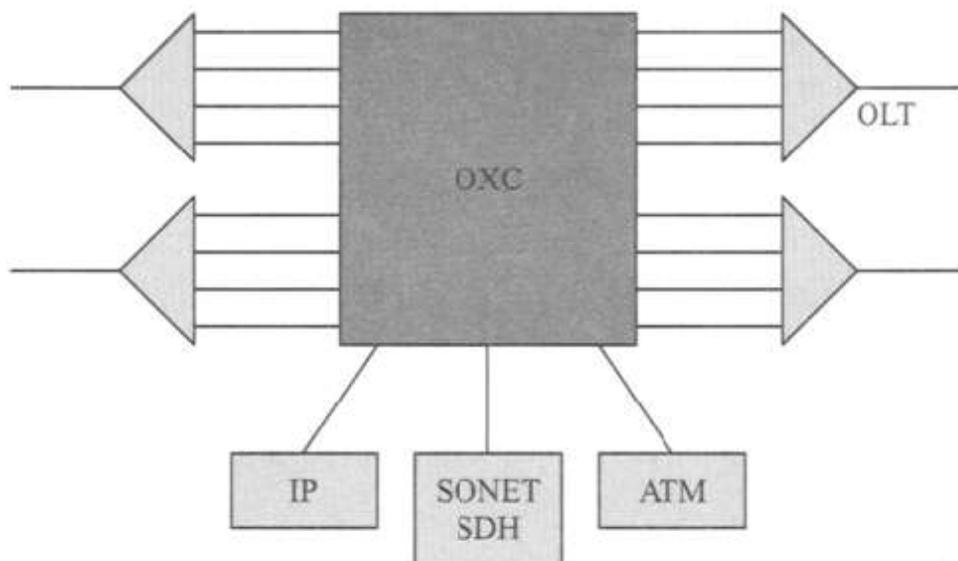
Entonces, ¿cuál sería una mirada a un OADM ideal? Tal OADM (1) sería capaz de ser configurado para bajar un cierto número máximo de canales, (2) que permita al usuario seleccionar qué canales específicos se agregan/eliminan y cuales únicamente pasan mediante el control remoto, incluidos los transpondedores, sin afectar el funcionamiento de los canales existentes, (3) no exige al usuario planificar el futuro en cuanto a qué canales puede ser necesario bajados en un nodo en particular, y (4) mantendría una baja pérdida fija independientemente del número de canales bajados / agregados frente a la generada por los canales de paso.

La arquitectura de la figura 8 (d) cumple estos criterios, pero puede no ser adecuada para los pequeños nodos en los que sólo unos pocos canales deben ser bajados, debido a su relativamente alto costo inicial.

1.4. Crosconector óptico

Los OADMs son elementos útiles de la red para manejar topologías de red simples, tales como la topología lineal que se muestra en la figura 5 o topologías de anillo, y un número relativamente modesto de longitudes de onda. Se requiere un elemento de red adicional para manejar topologías de malla más compleja y un gran número de longitudes de onda, especialmente en lugares donde se concentra una gran cantidad de tráfico. Este elemento es la crosconexión óptica (OXC). Aunque se utiliza el término óptica, un OXC interno podría utilizar una óptica pura o un tejido de conmutación eléctrico. Un OXC es también el elemento clave de la red reconfigurable que permite redes ópticas, donde los canales ópticos se pueden crear o eliminar según sea necesario, sin tener que estar estáticamente previstos.

Figura 9. El uso de un OXC en la red



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 420.

Considere una oficina central de un gran *carrier* o proveedora de transporte de tráfico. Esto podría ser una oficina en una ciudad grande para los proveedores de servicio local o un nodo importante en una red de larga distancia de proveedor de servicios. Esa oficina podría poner fin a varios enlaces de fibra, cada uno con un gran número de longitudes de onda. Algunas de estas longitudes de onda pueden ser que no necesiten ser terminadas en esa ubicación, sino que pasan a través de otro nodo. La OXC que realiza esta función se muestra en la figura 9.

Los OXCs trabajan en conjunto con elementos de la red como SONET / SDH, así como con los *routers* IP, conmutadores ATM, terminales de WDM y multiplexores add/drop como se muestra en la figura 9. Normalmente algunos puertos OXC se conectan a equipos WDM y otros puertos OXC a dispositivos terminales tales como multiplexores add/drop SONET / SDH, *routers* IP o *switches* ATM. Así, un OXC proporciona paso rentable para el tráfico de paso que no terminan en el mismo nodo, así como recoge el tráfico de equipos conectados a la red. Algunas personas piensan en un OXC como un *switch* o conmutador crosconector rodeado de OLTs. Sin embargo, esta definición de OXC no incluye los OLTs que lo rodean, porque las compañías ven crosconectores y OLTs como productos separados y, a menudo compran OXCs y OLTs de diferentes proveedores.

Un OXC presenta varias funciones clave en una gran red:

Provisión de servicios. Un OXC se puede utilizar para canales ópticos previstos de una amplia red de forma automática, sin tener que recurrir a realizar las conexiones en el panel manual de conexiones. Esta capacidad se torna importante cuando se trata de un gran número de longitudes de onda en un nodo o con un gran número de nodos en la red. También se vuelve

importante cuando los canales ópticos en la red necesitan ser reconfigurados para responder a los cambios de tráfico. El manual de operación de enviar a una persona en cada oficina para implementar una conexión en el panel de conexión es costoso y propenso a errores. Un OXC configurable de forma remota se encarga de esta función.

Protección. Los canales ópticos de protección contra los cortes de fibra y fallos de los equipos en la red se están convirtiendo en una de las funciones más importantes que se espera de un crosconector. El crosconector es un elemento de red inteligente que puede detectar fallos en la red y redirige los canales ópticos rápidamente alrededor de la falla. El crosconector permite que se implementen verdaderas redes de malla.

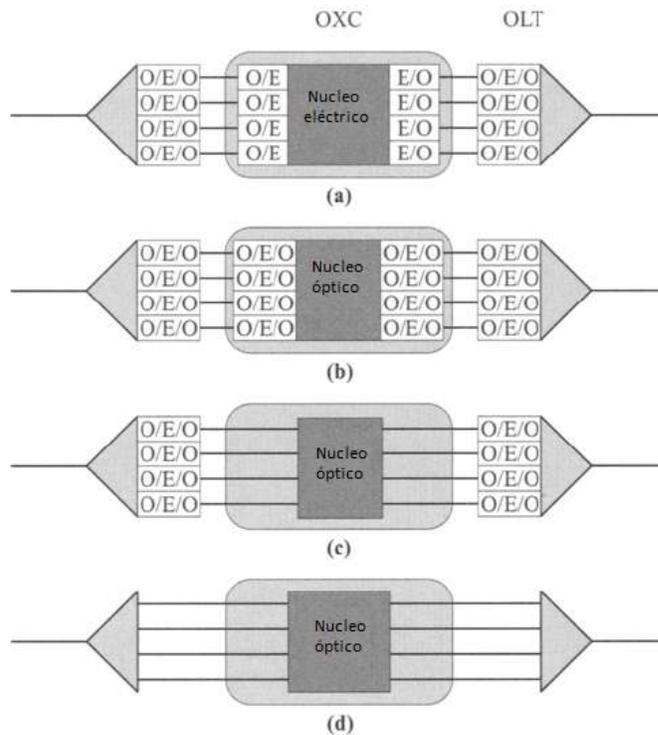
Transparencia de velocidad de bits. La capacidad de cambiar las señales con velocidades arbitrarias y formatos de trama es un atributo deseable de los OXCs.

Monitoreo de rendimiento, acceso de prueba, y la localización de fallas. Los OXCs proveen visibilidad a los parámetros de rendimiento de una señal en los nodos intermedios. Por lo general, permiten que el equipo de prueba pueda ser conectado a un puerto de prueba dedicado donde las señales que pasan a través del OXC se puedan controlar de una manera no intrusiva. El acceso de prueba no intrusiva requiere puente de la señal de entrada. En el puenteo, la señal de entrada se divide en dos partes. Una parte se envía a la base, y la otra parte se pone a disposición en el puerto de acceso de prueba. Los OXCs también ofrecen capacidades de bucle invertido. Esto permite a un canal óptico ser colocado de nuevo en los nodos intermedios para fines de diagnóstico.

Conversión de longitud de onda. Además de la conmutación de una señal de un puerto a otro puerto, los OXC también pueden incorporar capacidades de conversión de longitud de onda.

Multiplexión y agrupación. Los OXC suelen manejar señales de entrada y salida a velocidades de línea óptica. Sin embargo, pueden incorporar capacidades de multiplexión y agrupación para conmutar o *switchar* el tráfico interno de granularidades mucho más finas, como un STS-1 (51 *Megabits* por segundo) o su equivalente en SDH STM - 0. Tenga en cuenta que esta multiplexión por división de tiempo hay que hacerla en el dominio eléctrico y es realmente multiplexión SONET / SDH, pero incorporadas en el OXC, más bien en un apartado de SONET / SDH.

Figura 10. **Diferentes escenarios para el despliegue de OXC**



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 422.

Un OXC puede ser funcionalmente dividido en un núcleo de conmutación y un portuario complejo. El núcleo de conmutación es el que realiza las croconexiones reales. El portuario complejo de tarjetas se utiliza como interfaces para comunicarse con otros equipos. Las interfaces de puerto pueden o no incluir la conversión óptica a eléctrica (O / E) o óptica a eléctrica a óptica (O / E / O) de los convertidores.

La figura 10 muestra los diferentes tipos de OXCs y diferentes configuraciones para la interconexión de OXCs con OLTS u OADMs en un nodo. Los escenarios difieren en cuanto a si el cambio real se hace eléctricamente u ópticamente, en el uso de los convertidores O / E y O / E / O, y cómo el OXC está interconectado con el equipo de los alrededores. La tabla II resume las principales diferencias entre estas arquitecturas.

Las primeras tres configuraciones que muestra la figura 10 son configuraciones opacas, la señal óptica se convierte en el dominio eléctrico, cuando pasa por el nodo. La última configuración (figura 10 (d)) es una configuración totalmente óptica, la señal permanece en el dominio óptico, cuando pasa por el nodo.

En la figura 10 se observa que en las configuraciones opacas el núcleo de conmutación puede ser eléctrico u óptico. Un núcleo conmutador eléctrico puede agrupar tráfico en finas granularidades y normalmente incluye la multiplexión por división de tiempo de circuitos de baja velocidad en la velocidad de línea en los puertos de entrada y salida. Hoy en día, se tienen OXCs con núcleo eléctrico conmutando señales en granularidades de STM – 0 (51 *Megabits* por segundo) o STM - 16 (2,5 *Gigabits* por segundo). En cambio, un

verdadero núcleo conmutador óptico no ofrece ninguna de este tipo de granularidad. Simplemente cambia las señales de un puerto a otro.

Un núcleo conmutador eléctrico está diseñado para tener una capacidad de switcheo o conmutación total, por ejemplo, 1,28 *Terabits* por segundo. Esta capacidad se puede utilizar para switchar o conmutar, hasta 512 OC-48 (2,5 *Gigabits* por segundo) señales o 128 OC-192 (10 *Gigabits* por segundo) señales. El núcleo óptico tiene típicamente la velocidad de bits independiente. Por tanto, un núcleo conmutador óptico de 1000 puertos puede cambiar 1000 OC-48 flujos, 1000 OC-192 flujos, o incluso 1000 OC-768 (40 *Gigabits* por segundo) flujos, todo al mismo costo por puerto. El núcleo óptico es por lo tanto más escalable en capacidad, en comparación con un núcleo eléctrico. En particular, la configuración de la figura 10 (d) permite cambiar de grupo de longitudes de onda o todas las longitudes de onda juntas en una fibra en un único puerto OXC, haciendo la configuración capaz de manejar enormes capacidades globales, y reducir el número de puertos OXC requeridos en un nodo.

Con un poco que aumenten las tasas, el costo de un puerto en un núcleo eléctrico aumentara. Por ejemplo, un puerto OC-192 podría costar el doble que un puerto OC-48. El costo de un puerto en un núcleo conmutador óptico, por el contrario, es la misma independientemente de la velocidad de bits. Por lo tanto a velocidades de bits más alta, será más rentable conmutar las señales a través de un OXC núcleo óptico que en un OXC núcleo eléctrico.

Un núcleo conmutador óptico es también transparente, no le importa si se trata de conmutación de 10 *Gigabits* por segundo Ethernet o una señal SDH de 10 *Gigabits* por segundo. En contraste, los núcleos conmutadores eléctricos requieren tarjetas de puerto diferente para cada tipo de interface, que

convierten la señal de entrada en un formato adecuado para la estructura del conmutador.

La figura 10 (a) muestra un OXC constituido por un núcleo conmutador eléctrico rodeado por convertidores O / E. El OXC interactúa con OLTs a través de la norma no-estándar de WDM de corto alcance (SR) para interfaces ópticas, normalmente a 1310 nanómetros. También se está viendo la implementación de la más barata de interfaces, las de muy corto alcance (VSR). El OLT usa transpondedores para convertir esta señal en la longitud de onda WDM apropiada. Alternativamente, el OXC por sí mismo puede tener los láseres de longitud de onda específica que operan con los OLTs sin necesidad de transpondedores entre ellos.

Tabla II. **Comparación de diferentes configuraciones de OXC**

Características	Núcleo Eléctrico Figura 10(a)	Núcleo Óptico con O/E/O Figura 10(b)	Núcleo Óptico Figura 10(c)	Completamente Óptico Figura 10(d)
Recolección de tráfico de baja velocidad	Si	No	No	No
Capacidad de conmutación	Baja	Alta	Alta	Altísima
Conversión de longitud de onda	Si	Si	Si	No
Interface en OLT	SR/SVR	SR/SVR	IR/Serial VSR	Propietario
Costo por puerto	Medio	Alto	Medio	Bajo
Consumo de energía	Alto	Alto	Medio	Bajo
Rastro	Alto	Alto	Medio	Bajo

Fuente: elaboración propia.

Las figuras 10 (b) - (d) muestran OXCs con un núcleo conmutador óptico. Las diferencias entre las cifras se encuentran en la forma de interactuar con el equipo WDM. En la figura 10 (b), el interfuncionamiento se hace de una manera parecida como en la figura 10 (a) a través del uso de convertidores O / E / O de corto alcance o de muy corto alcance entre las interfaces ópticas, el OXC y el OLT. En la figura 10 (c), no hay convertidores O / E / O y el núcleo conmutador óptico tiene interfaces directas con los transpondedores en la OLT. La figura 10 (d) muestra un panorama distinto, donde no hay transpondedores en el OLT y las longitudes de onda en la fibra son directamente switchadas o conmutadas por el núcleo conmutador óptico en el OXC después de que son multiplexadas / demultiplexadas. El costo y la potencia de todos los nodos mejora a medida que se avanza desde la figura 10 (b) hacia la figura 10 (d). La opción de núcleo eléctrico suele utilizar una potencia más alta, en comparación con la opción de óptica, pero el costo relativo depende del precio de los distintos productos, así como la tasa de bits que operan en cada puerto.

Los OXCs en la figura 10 (a) y (b) tienen acceso a las señales en el dominio eléctrico y por lo tanto puede llevar a cabo un extenso monitoreo del rendimiento (identificación de la señal de error y las mediciones de velocidad de bits). La medición de la tasa de error de bit también se puede utilizar para activar la conmutación de protección.

Los OXCs en la figura 10 (c) y (d) no tienen la capacidad de ver la señal, y por lo tanto no se puede hacer monitoreo extensivo del rendimiento de la señal. Por lo tanto, no pueden, por ejemplo, activar la protección de conmutación basándose en el seguimiento de la tasa de bits errados, sino que podría utilizar la medición de potencia óptica como un disparador. Estos crosconectores necesitan una salida de canal de banda de señalización para el intercambio de información de control con otros elementos de red. Con la configuración de la

figura 10 (c), el equipo conectado debe tener interfaces ópticas que pueden hacer frente a la pérdida introducida por el conmutador óptico. Estas interfaces también tendrán que ser interfaces de fibra óptica monomodo, ya que es lo que la mayoría de los conmutadores ópticos utilizan. Además, se prefieren las interfaces en serie (un solo par de fibras) en vez de interfaces paralelas (varios pares de fibras), ya que cada par de fibras consume un puerto en el conmutador óptico.

La configuración completamente óptica de la figura 10 (d) proporciona una verdadera red totalmente óptica. Sin embargo, en los mandatos de un diseño de capa física más complejo, las señales son mantenidas ahora en el dominio óptico durante todo el camino desde su inicio hasta su final, comienzan conmutadas ópticamente en los nodos intermedios. Dado que la ingeniería del enlace es compleja y por lo general propiedad de los proveedores, no es fácil tener un solo proveedor de OXCs y a veces no operan con OLTs de otro proveedor.

Es posible integrar los sistemas de OXC y OLT juntos en un mismo equipo. Si se hace, aportaría algunos beneficios importantes. Elimina la necesidad de redundancia de convertidores O / E / O en múltiples elementos de la red, permitiría estrecho vínculo entre los dos para generar la protección eficiente, y facilita la señal entre múltiples OXCs en una red utilizando el canal de control óptico disponible en el OLTs. Por ejemplo, en la figura 10 (a), se podría tener interfaces WDM directamente crosconectadas y eliminar la interface de corto alcance.

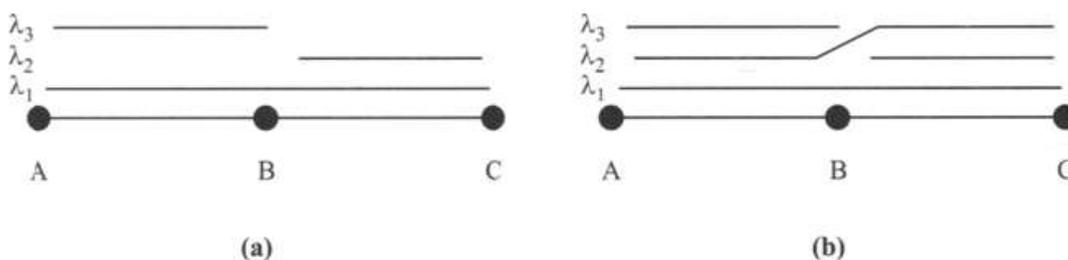
Sin embargo, esta integración también tiene el inconveniente de lo que es una solución de proveedor único. Los proveedores de servicios deben comprar todos los equipos WDM, incluyendo OLTs y OXCs, del mismo fabricante para

realizar esta simplificación. Algunos proveedores de servicios prefieren construir su red mezclando y emparejando al mejor en su clase de equipos de múltiples proveedores. Por otra parte, esta solución no resuelve el problema de hacer frente a situaciones en que los OLTs ya se han implementado y los OXCs se implementaran más tarde.

1.4.1. Configuraciones de OXC completamente ópticas

Ahora se realizara la comprensión de algunas de las cuestiones relacionadas con la configuración completamente óptica de la figura 10 (d). Como se muestra, la configuración puede ser muy rentable en relación a las demás configuraciones, pero no tiene tres funciones principales: agrupamiento de baja velocidad, la conversión de longitud de onda, y la regeneración de la señal.

Figura 11. Ilustración de la necesidad de la conversión de longitud de onda

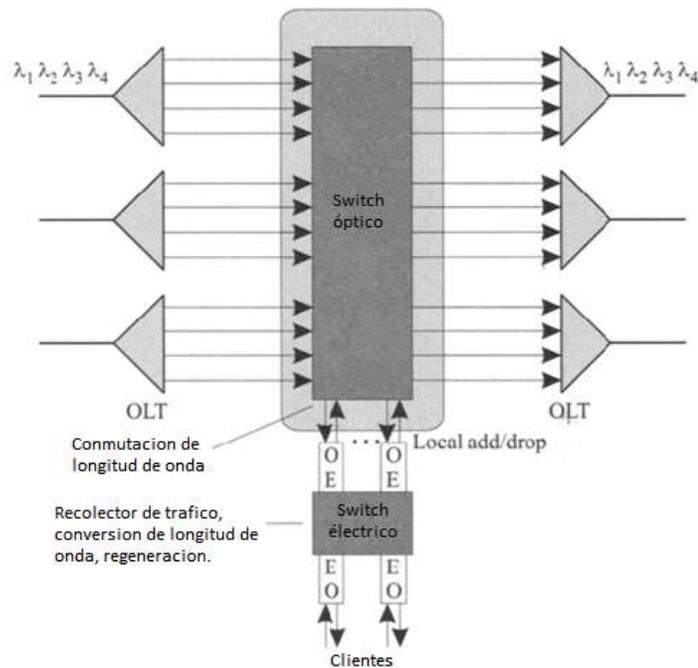


Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p.426.

Se ilustra esto con un ejemplo simple en la figura 11. Cada enlace de la red puede llevar tres longitudes de onda. Se tiene dos canales ópticos actualmente creados en cada enlace de la red como se muestra y se necesita crear un nuevo canal óptico del nodo A al nodo C. La figura 11 (a) muestra el

caso en que el nodo B no puede realizar la conversión de longitud de onda. A pesar de que existen longitudes de onda libre y disponible en la red, la misma longitud de onda no está disponible en ambos enlaces en la red. Como resultado, no se puede crear el canal óptico deseado. Por otro lado, si el nodo B puede convertir las longitudes de onda, entonces se podría crear el canal óptico, como se muestra en la figura 11 (b).

Figura 12. **Un nodo real de red completamente óptico que combina crosconexiones de núcleo óptico con crosconexiones de núcleo eléctrico**



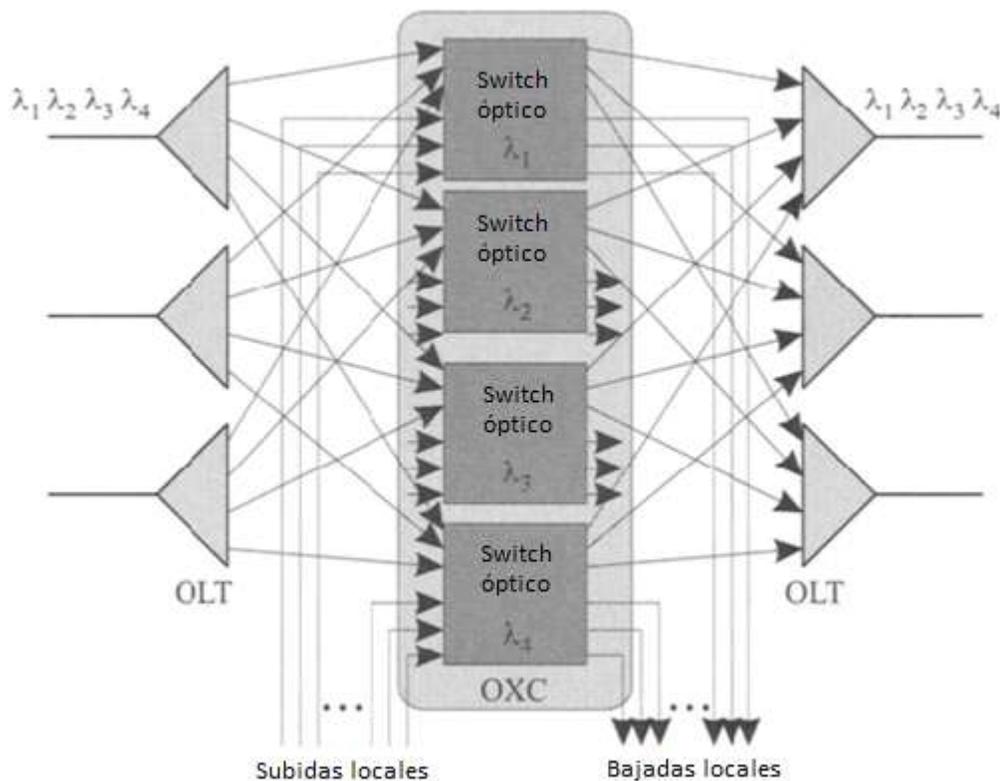
Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 26.

Hay que notar las configuraciones de la figura 10 (a), (b) y (c) todos proveen agrupación de baja velocidad, en el supuesto de que el núcleo eléctrico se ha diseñado para soportar esa capacidad. Con el fin poder tener la agrupación para baja velocidad, la regeneración de la señal, y la conversión de longitud de onda, la configuración de la figura 10 (d) se modifica para incluir un

núcleo eléctrico crosconector como se muestra en la figura 12. Esta configuración permite que la mayoría de las señales se cambien a señales ópticas, minimizando el costo y maximizando la capacidad de la red, además también permite enviar las señales a la capa eléctrica cuando sea necesario.

En cuanto a la figura 12, se nota que el conmutador óptico no tiene que cambiar las señales desde cualquier puerto de entrada a cualquier puerto de salida.

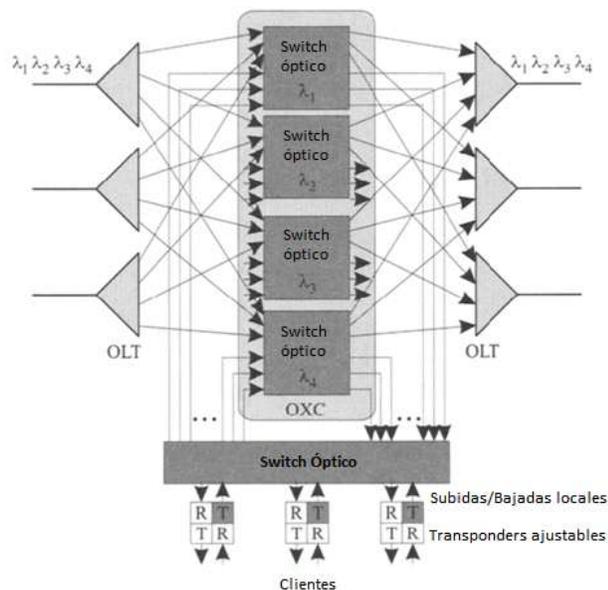
Figura 13. **Un OXC con plano de longitud de onda y núcleo óptico, que consiste en un plano de conmutadores ópticos, uno para cada longitud de onda**



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 428.

La figura 13 muestra un plano de OXC de longitud de onda. Las señales que vienen de diferentes pares de fibra son las que primero se demultiplexan por los OLTs. Todas las señales de una determinada longitud de onda son enviadas a un conmutador dedicado a esa longitud de onda, y las señales de las salidas de los conmutadores son multiplexadas de nuevo por los OLTs. En un nodo con F pares de fibras WDM y W longitudes de onda en cada par de fibras, este arreglo utiliza F OLTs y W $2F \times 2F$ conmutadores. Esto permite que cualquiera o todas las señales en cualquier longitud de onda entrante se bajen a nivel local. Por el contrario, la configuración de la figura 12 utiliza F OLTs y $2WF \times 2WF$ conmutadores para proporcionar las mismas capacidades. Se considera, por ejemplo, $F = 4$, $W = 32$, que son números reales en la actualidad. En este caso, la configuración de la figura 13 utiliza cuatro OLTs y $32 \times 8 \times 8$ conmutadores. En contraste, la figura 10 (b) requiere cuatro OLTs y un conmutador de 256×256 .

Figura 14. **Definición con terminaciones add / drop en un enfoque plano longitud de onda**



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 429.

Basado en la discusión anterior, parece que el enfoque de plano de longitud de onda ofrece una alternativa más barata a gran escala sin el bloqueo de conmutadores ópticos. Sin embargo, se toma en cuenta la forma de optimizar el número de terminales add / drop (que sería transpondedores o interfaces O / E en núcleos conmutadores eléctricos). Tanto en la figura 12 y figura 13 se supone que hay suficientes puertos para cancelar todas las señales de W F. Este casi nunca es el caso, ya que sólo una fracción del tráfico tendrá que bajarse, y las terminaciones son caras. Por otra parte, se observa que si realmente es necesario W F terminaciones en un conmutador eléctrico, la mejor solución es utilizar la configuración de núcleo eléctrico de la figura 10 (a), sin tener los parámetros de plano de longitud de onda.

Si se tiene un total T de terminaciones, todos ellos con láser sintonizable, y se quisiera poder bajar cualquiera de las señales de WF, esto requiere un conmutador óptico adicional T X WF entre los planos de conmutadores de longitud de onda y las terminaciones, como se muestra en la figura 14. Por el contrario, con un gran conmutador, simplemente se conectan las T terminaciones a T puertos de este conmutador, lo que resulta en un conmutador general (WF + T) X (WF + T). Esta situación reduce un poco el recurso de plano de longitud de onda.

En resumen, el enfoque de plano de longitud de onda debe tener en cuenta el número de fibras, la fracción de tráfico add / drop, número de terminaciones, y sus capacidades de optimización de parámetros por separado en el diseño. Con un conmutador de gran escala, se puede dividir los puertos de una manera flexible para considerar las variaciones de todos estos parámetros, la única limitación es el número total de puertos disponible.

2. DISEÑO DE RED WDM

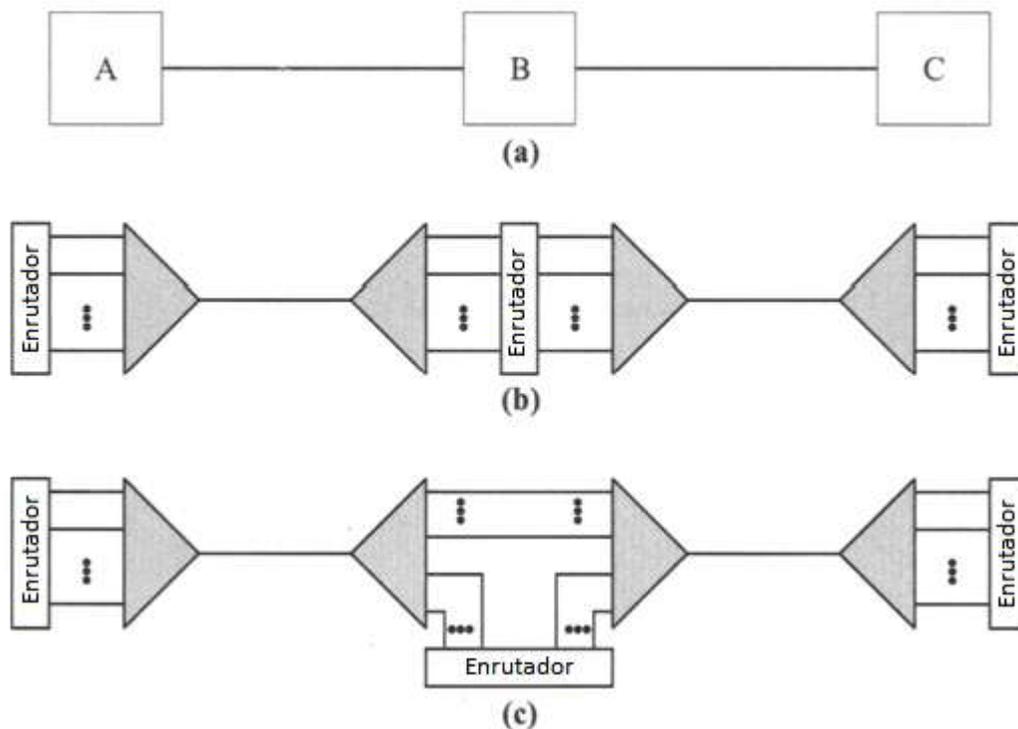
Ahora se sabe que la capa óptica provee alta velocidad de conmutación de conexiones de circuitos o canales ópticos, entre equipos de alto nivel tales como multiplexores SDH, *routers* IP y *switches* ATM. La capa óptica crea estos canales ópticos sobre la fibra física utilizando elementos tales como terminales de línea óptica (OLTs), multiplexores add / drop ópticos (OADMs), y crosconectores ópticos (OXCs). Se nombrará a una red que utiliza canales ópticos una red de enrutamiento de longitud de onda.

Ejemplo 2.1 En la figura 15 (a), hay tres nodos etiquetados A, B y C, conectados mediante enlaces de fibra WDM. Por simplicidad, se supondrá que el tráfico generado es en forma de paquetes IP de los *routers* situados en estos nodos. Para ser concretos, también se asume que todas las interfaces del *router* funcionan a 10 *Gigabits* por segundo, que es también la capacidad de transmisión en cada longitud de onda en los enlaces WDM. Ahora se supondrá que, con base en las estimaciones del tráfico de paquetes IP, se necesitan 50 *Gigabits* por segundo de capacidad entre los tres pares de *routers*: AB, BC y AC. La red puede ser diseñada para manejar ese tráfico de dos maneras.

- Sin Add/Drop ópticos: en el primer método, se han creado 10 longitudes de onda en cada uno de los enlaces AB y BC conectando los *routers* en los extremos de estos enlaces. Se observa que el tráfico que fluye en el enlace AB es de 50 *Gigabits* por segundo (tráfico de A-B) + 50 *Gigabits* por segundo (tráfico de A-C que debe utilizar también el enlace A-B) = 100 *Gigabits* por segundo. Del mismo modo, el tráfico que fluye en el enlace B-C es también 100 *Gigabits* por segundo. Así, las 10 longitudes

de onda en cada uno de los enlaces AB y BC son suficientes para transportar este tráfico. En este caso, se usan 10 puertos del *router* en el nodo A, 20 puertos del *router* en el nodo B, y 10 puertos del *router* en el nodo C, para un total de 40 puertos del *router*. En la capa óptica, los nodos A y C tienen uno, mientras que el nodo B tiene dos que bajan todas las longitudes de onda que pasan a través del nodo B. Esto se ilustra en la figura 15 (b).

Figura 15. Una red de tres nodos



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 438.

- Con Add/Drop óptico: en el segundo diseño, se han creado sólo cinco canales ópticos cada uno en las rutas AB, BC y AC. Los cinco canales ópticos en la ruta CA pasan a través del nodo B dentro de la capa óptica, sin que se convierta en una señal eléctrica. Este diseño requiere sólo 10

puertos del *router* en cada uno de los tres nodos, A, B y C, para un total de 30 puertos de *router*, en comparación con 40 puertos de *router* en el diseño sin *add/drop* óptico. Sin embargo, este diseño requiere que el nodo B tenga un nodo OADM capaz de subir y bajar 10 de los 20 canales ópticos que terminan en el *router* del nodo B, mientras que los otros 10 canales ópticos solo los pasa a través de él(figura 15 (c)).

Así, en el diseño con *add/drop* óptico, se puede compensar el número de puertos IP del *router* en el nodo B (10 frente a 20) al tener *add / drop* óptico en el mismo nodo.

Se podrá ver el problema general del diseño de redes de longitud de onda de la siguiente manera. Que sean especificados la topología de fibra y los requisitos de tráfico (matriz de tráfico). En este ejemplo, la topología de fibra es lineal con tres nodos, y el requerimiento de tráfico es de 50 *Gigabits* por segundo entre cada par de estos nodos. La tarea es diseñar una topología de canales ópticos que una los *routers* IP y realizarla dentro de la capa óptica. En este ejemplo, hay dos topologías de canales ópticos que cumplen con el requerimiento de tráfico se muestran en la figura 16. Se nombrara al primer problema, problema del diseño de topología de canal óptico (*Lightpath Topology Design* - LTD). Se nombrara al problema de la realización de la topología de canal óptico en la capa óptica, problema de ruteo y asignación de longitud de onda (*Routing Wavelength Assignment* - RWA). El problema RWA es fácil de resolver en este ejemplo, porque sólo hay una ruta en la topología de fibra entre cada par de nodos. En una topología general, el problema RWA puede ser bastante difícil. Las realizaciones de las dos topologías de canales ópticos de la figura 16 se muestran en las figuras 15 (b) y (c).

Otro problema en el diseño de redes de enrutamiento de longitud de onda es el de agrupar el tráfico de las capas superiores. Por ejemplo, en la figura 15 (c), todo el tráfico destinado para el nodo B debe ser agrupado en unas pocas longitudes de onda, para que sea necesario bajar en el nodo B sólo estas longitudes de onda. En caso contrario, en el nodo B se tendrá que bajar muchas longitudes de onda, y esto aumentará el costo de la red.

2.1. Combinaciones de costo de red

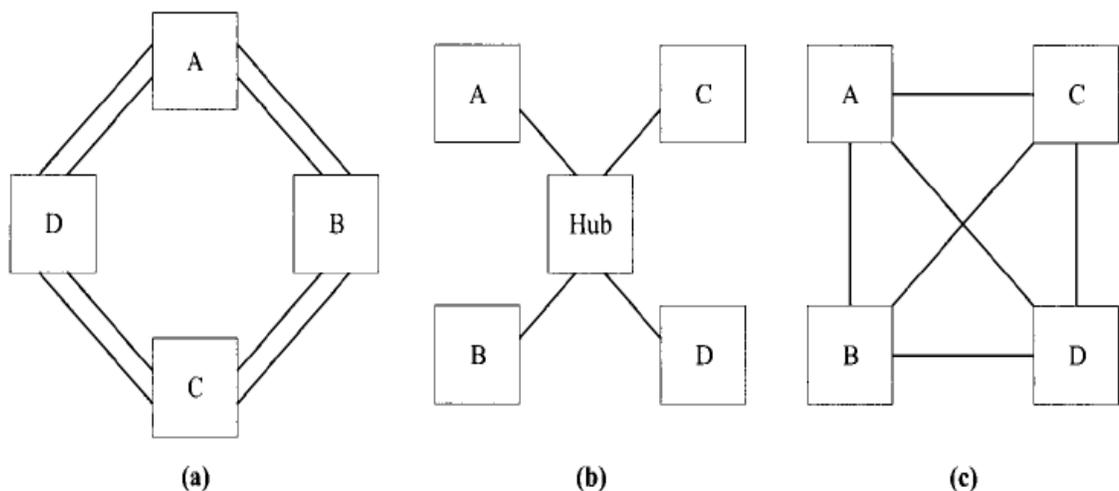
Ahora se consideraran las ventajas y desventajas entre el costo de los equipos de mayor nivel y el equipo de la capa óptica. Se mide el costo de los equipos de mayor nivel por el número de puertos IP del *router* (o terminales de línea SONET/SDH). El número de puertos IP del *router* necesarios es igual al doble del número de canales ópticos necesarios. Un componente importante del costo de la capa óptica es el número de transpondedores necesarios en los y OADMs. Puesto que cada canal óptico requiere un par de transpondedores, se incluyen los costos de los transpondedores con el de los equipos de capas superiores. Esto también incluye el caso en que los transpondedores están presentes en el equipo de las capas superiores (ver figura 3). Se mide el resto del costo de los equipos de capa óptica por el número de longitudes de onda utilizadas en un enlace.

Las topologías de redes suelen ser diseñadas para hacer doble conexión, es decir, tener dos rutas disjuntas entre cada par de nodos en la red. Si bien las topologías de malla de fibra que son arbitrarias, pero protegidas, son más costo-eficiente para grandes redes de topologías de anillo de fibra, estos últimos han sido ampliamente implementados y son buenos para una red no tan grande. Por esta razón se va a considerar topologías de anillo de fibra en este análisis. Una de las razones de la introducción de los anillos se debe a que una

conexión de anillo de N nodos tiene el número mínimo posible de enlaces (sólo N) para una red que esta doblemente conectada, y por lo tanto tiende a tener un costo de implementación de fibra baja.

Se va a considerar una matriz de tráfico en t unidades de tráfico que se dirigen desde un *router* IP a todos los demás *routers* IP en la red. Se puede denotar el número de nodos en la red como N y se asume que el tráfico es uniforme, es decir, $t / (N - 1)$ unidades de tráfico son enrutadas entre cada par de *routers* IP. A efectos de normalización, la capacidad de una longitud de onda se supone que es una unidad. Al igual que en la topología lineal de tres nodos que se vio anteriormente, se divide el problema de diseño de la red en dos: los problemas LTD y RWA. Se consideraran tres topologías de canales ópticos diferentes, los cuales todas son capaces de satisfacer el requerimiento de tráfico. La forma general de estas topologías se muestra en la figura 16.

Figura 16. **Tres diferentes topologías de canal óptico que se puede implementar en una topología de anillo de fibra**



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 442.

La primera topología de canal óptico, que se muestra en la figura 16 (a), es un anillo, al que se llamara un anillo punto a punto WDM (PWDM). En este caso, la topología de canal óptico también es un anillo, al igual que la topología de fibra, excepto que se puede tener canales ópticos múltiples entre nodos adyacentes en el anillo, con el fin de proporcionar la capacidad necesaria entre los *routers* IP.

La segunda topología de canal óptico, que se muestra en la figura 16 (b), es un diseño centralizado. Todos los *routers* están conectados a un *router* central (hub) por uno o más canales ópticos. Por lo tanto todos los paquetes atraviesan dos canales ópticos: del *router* fuente al centro, y desde el centro al *router* destino.

La tercer y última topología de canal óptico, que se muestra en la figura 16 (c), es un diseño totalmente óptico. En este caso, se establecen canales ópticos directos entre todos los pares de *routers*. Así, los paquetes atraviesan un solo canal óptico para llegar del *router* fuente al *router* destino.

El problema RWA es encontrar una ruta para cada paso de luz y asignar una longitud de onda en cada enlace de la ruta. Se supone que a un canal óptico se le debe asignar la misma longitud de onda en todos los enlaces que atraviesa, es decir, la capa óptica no proporciona capacidad de conversión de longitud de onda. Además, no hay dos canales ópticos atravesando el mismo enlace, no se puede asignar la misma longitud de onda.

2.2. Problemas LTD y RWA

El enfoque general de dividir el problema de diseño de redes de enrutamiento de longitud de onda dentro de un problema LTD y un problema de

RWA, que se ha empleado anteriormente en la red lineal de tres nodos y la red del anillo, es una buena heurística para resolver problemas prácticos, porque los dos problemas de una manera combinada es bastante difícil. En ambos ejemplos, si se consideran diferentes topologías de canal óptico y se examina el problema RWA para cada uno de ellos. Esto aclara la compensación de costo entre los diferentes diseños. En la práctica, cada topología de canal óptico, junto con su realización en la capa óptica (la solución del problema RWA) se traduciría en una red, con costo real (monetaria). Entonces, se puede elegir el diseño que resultara con menor costo.

2.2.1. Diseño de topología de canal óptico

Ahora se considera un procedimiento específico, aunque algo simplificado, del problema de diseño de topología de canal óptico y se examina cómo se puede resolver. Se supondrá que no hay limitaciones impuestas por la topología de fibra o la capa óptica.

Se supone que todos los canales ópticos son bidireccionales, es decir, si se usa un canal óptico desde el nodo i al nodo j , entonces también se utiliza un canal óptico desde el nodo j al nodo i . Este es el caso que con mayor frecuencia ocurre en la práctica, ya que casi todos los protocolos de capas superiores son IP y SDH, se asumen enlaces bidireccionales en la capa física.

Una limitación es que en cada nodo se utiliza un *router* IP con la mayoría de sus Δ puertos conectados a otros *routers* IP. (Además, cada *router* tendría interfaces locales a los switches Ethernet, etc.) Esto limita el número máximo de puertos por *router* A y por lo tanto limita indirectamente el costo de los *routers* IP. Esto también limita el número de canales ópticos en la red a $n\Delta$, donde n es el número de nodos de la red, ya que cada canal óptico comienza y

termina en un puerto IP del *router*. Esta restricción es equivalente a una restricción en los costos de canal óptico, si se supone que la tarifa para un canal óptico es el mismo, independientemente de sus extremos.

Cuando se diseña una topología de canal óptico, también se tiene que resolver el problema de conexiones de canal óptico. Esto se debe a que si una determinada topología soporta el tráfico requerido depende tanto de la misma topología y el algoritmo de enrutamiento que se utiliza.

2.2.2. Ruteo y asignación de longitudes de onda

En la sección 2.1, se vio que el problema de diseño global implica una compensación entre los equipos de capa óptica (esencialmente, el número de longitudes de onda) y equipos de la capa superior (por ejemplo, los puertos del *router* IP o terminales de línea SONET/SDH). En la sección anterior, se estudió el problema LTD. Aquí se estudia el problema RWA, que se define de la siguiente manera. Dada una topología de red y un conjunto de requisiciones de canal óptico de extremo a extremo (que podrían obtenerse, por ejemplo, al resolver el problema LTD), determinar una ruta y la longitud de onda (s), utilizando el mínimo número posible de longitudes de onda .

- Dos canales ópticos no pueden tener la misma longitud de onda asignada en un enlace determinado.
- Si no existe conversión de longitud de onda, entonces se le debe asignar una misma longitud de onda a un canal óptico en todos los tramos de un enlace determinado.

Se supondrá que la red así como los canales ópticos está sin dirección. Las combinaciones de tipos de canales ópticos y tipos de redes son posibles,

se muestran en la tabla III. La combinación que se propone explorar aquí corresponde a una red que tiene un par de enlaces de fibra unidireccional en sentido contrario entre los nodos y se supone que todos los canales ópticos son bidireccionales, con la misma ruta y la longitud de onda elegida para ambas direcciones del canal óptico. Desde un punto de vista operativo, la mayoría de canales ópticos serán completamente *dúplex*, ya que el flujo de tráfico de alto nivel (por ejemplo, SDH) son completamente *dúplex*. Por otra parte, los operadores de redes prefieren asignar la misma ruta y la longitud de onda para los dos sentidos por simplicidad operacional. Se nota sin embargo, que es posible reducir el número de longitudes de onda necesarias en algunos casos mediante la asignación de longitudes de onda diferentes en diferentes direcciones del canal óptico.

Un borde sin dirección también puede representar un enlace de fibra bidireccional con la transmisión en ambas direcciones sobre una sola fibra. Se considerara este caso en el ejemplo siguiente.

Tabla III. **Las diferentes combinaciones de tipos de canales ópticos y los bordes de la red**

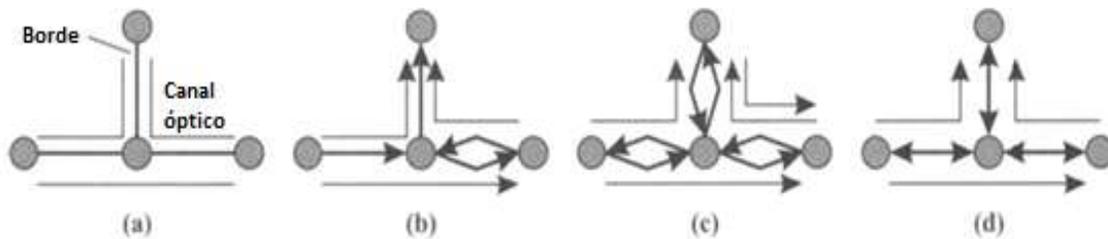
Canales ópticos no dirigidos, bordes no dirigidos	Canales ópticos dirigidos, bordes no dirigidos
Canales ópticos no dirigidos, bordes dirigidos	Canales ópticos dirigidos, bordes dirigidos

Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 455.

El problema de la ruta y la longitud de onda pueden también ser estudiados en el contexto de las combinaciones que se indican en la tabla III. Este es el caso más general.

Ejemplo 2.2. En este ejemplo, se va a ilustrar las diferencias entre los diferentes modelos de red considerados en la tabla III, usando un ejemplo. (Se supone que no es posible la conversión de longitud de onda.) Hay que tener en cuenta la red en estrella simple de cuatro nodos que se muestra en la figura 17. En la figura 17 (a), se tiene una red con los bordes sin dirección con tres canales ópticos. Hay que notar que aunque cada borde sin dirección utiliza dos canales ópticos, se necesitan tres longitudes de onda para soportar este tráfico.

Figura 17. **Diferentes modelos de red correspondiente a bordes dirigidos / no dirigidos y canales ópticos dirigido / no dirigidos**



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 456.

Se considerara ahora una red con los bordes y canales ópticos dirigidos como se muestra en la figura 17 (b). Hay que notar que el número de canales ópticos en cada borde es de nuevo no más de dos, pero sólo dos longitudes de onda se requieren en este caso.

La figura 17 (c) y (d) muestran dos casos, tanto con los bordes sin dirección y canales ópticos dirigidos. En la figura 17 (c), se representa el borde no dirigido por dos bordes unidireccionales. Esto corresponde a que tiene una fibra en cada dirección en la red real y tienen W longitudes de onda en cada

fibra. En este caso, hay que tener en cuenta que sólo dos longitudes de onda son necesarias para soportar este patrón de tráfico.

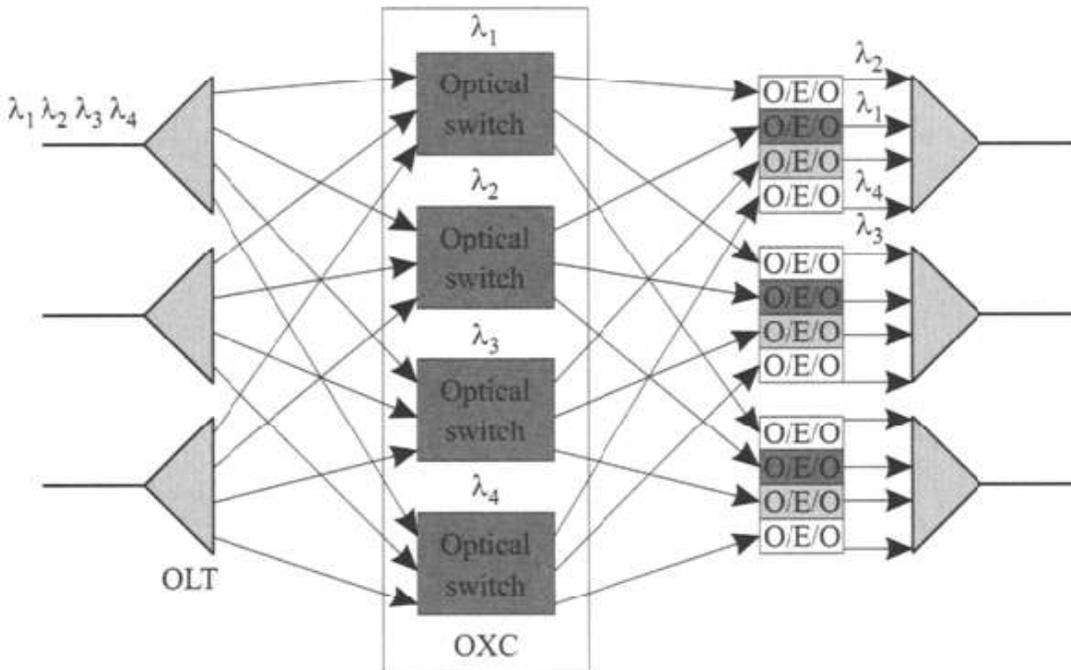
El último caso es la figura 17 (d), donde representan el borde no dirigido por un borde bidireccional. Esto corresponde a haber una sola fibra sobre la que la transmisión se lleva a cabo en ambas direcciones. Hay un número fijo total de longitudes de onda, algunas longitudes de onda se transmiten en una dirección, y las restantes en la dirección opuesta. Se puede suponer que esta tarea puede hacerse de manera flexible según sea necesario para el patrón de tráfico. En este caso la restricción de asignación de longitud de onda es algo diferente. Si se utiliza una longitud de onda en una dirección del enlace, no se puede utilizar en la otra dirección. Tenga en cuenta que en este caso la dirección de un canal óptico no afecta a la asignación de longitud de onda. En la práctica, los sistemas bidireccionales tienen un conjunto fijo de longitudes de onda en cada dirección, lo que limita aún más este caso.

2.2.3. Conversión de longitud de onda

En el capítulo 1 se desarrollo el tema de conversión de longitud de onda, en concreto con referencia de la crosconexión óptica.

Este tipo de conversión de longitud de onda se llama conversión de longitud de onda completa, y un nodo capaz de realizar conversión de longitud de onda completa puede cambiar la longitud de onda de un canal óptico de entrada a cualquiera de las longitudes de onda de salida. Los crosconeectores mostrados en la figura 10 (a) - (c) son capaces de realizar conversión de longitud de onda completa, mientras que el crosconeector de las figuras 10 (d) y 13 no tienen capacidad de conversión de longitud de onda.

Figura 18. **Un nodo con capacidad de conversión de longitud de onda fija**

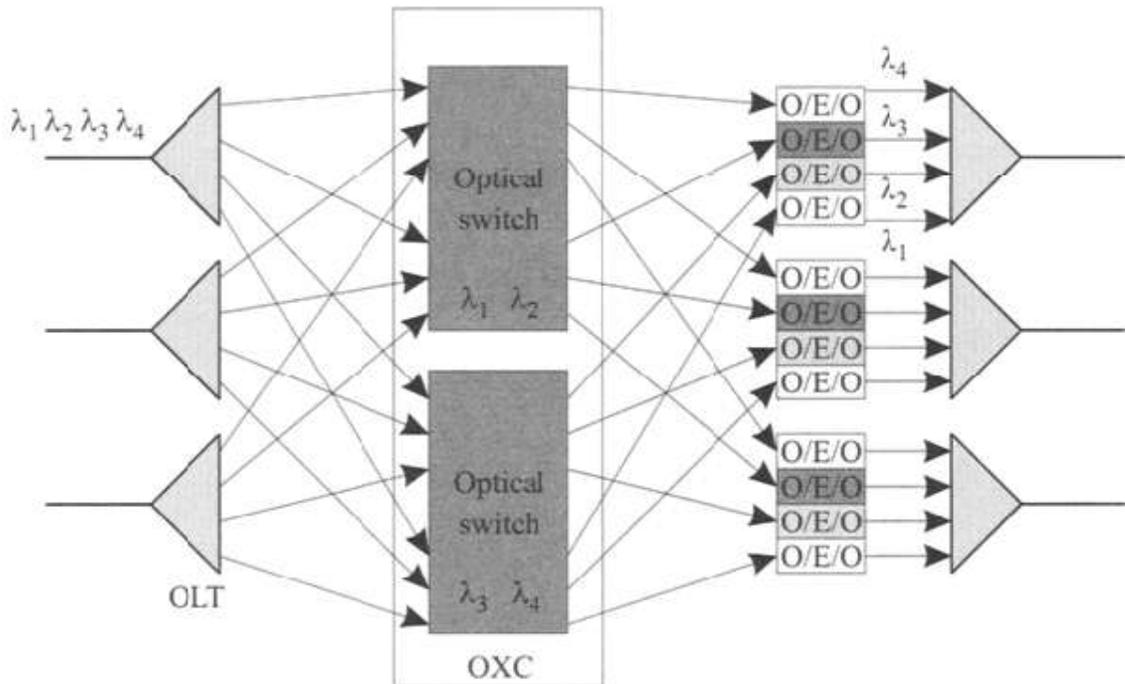


Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 457.

Otros dos tipos de conversión de longitud de onda son conversión fija y conversión limitada. En conversión de longitud de onda fija, un canal óptico entrando en un nodo en una longitud de onda particular λ_i siempre sale del nodo en una determinada longitud de onda λ_j . El mapeo entre la entrada y la longitud de onda de salida se fija en el momento de diseño de la red y no puede ser variado. Una aplicación de este enfoque se muestra en la figura 18. En la conversión de longitud de onda limitada, a una señal se le permite convertirse en una longitud de onda de un subconjunto limitado de otras longitudes de onda. Por ejemplo, se puede permitir que una señal pueda ser convertida de una longitud de onda a otras dos longitudes de onda determinada.

La figura 19 muestra una implementación de este enfoque, donde puede ser cada longitud de onda de entrada puede ser convertida en una de las otras dos longitudes de onda. En este caso, se puede decir que el nodo proporciona la conversión limitada de grado 2.

Figura 19. **Un nodo con capacidad de conversión de longitud de onda limitada**

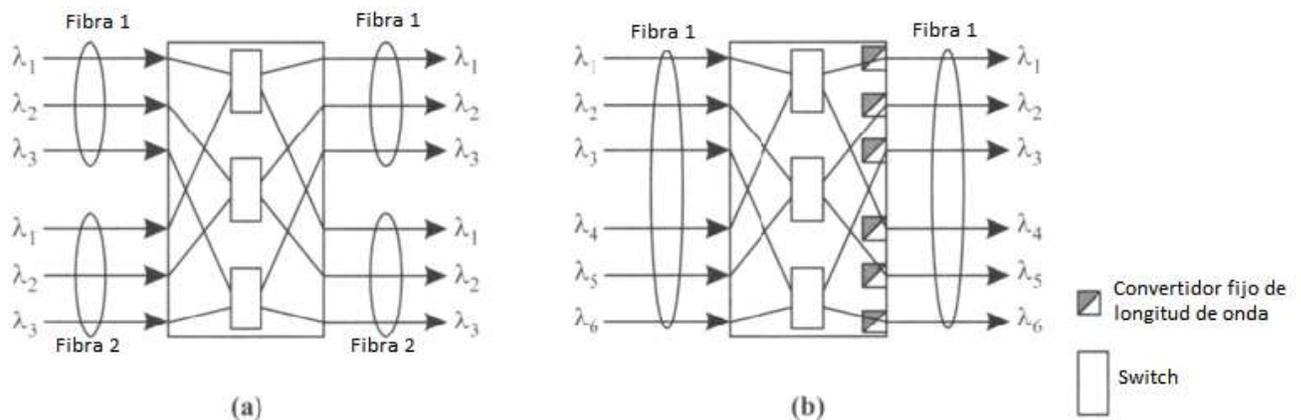


Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 458.

En muchas situaciones, las redes pueden usar varios pares de fibra entre los nodos para proporcionar mayores capacidades. Ahora se va a ver que tener varios pares de fibra es equivalente a tener un único par de fibra, pero con algunas capacidades de conversión limitada longitud de onda en los nodos. La figura 20 (a) muestra una red con dos pares de fibra entre los nodos y no existe conversión de longitud de onda en los nodos. Cada par de fibra lleva W

longitudes de onda. En cada nodo, las señales de un par de fibras se pueden cambiar a otro par de fibras. La figura 20 (b) muestra una red con un par de fibras entre los nodos, llevando 2W longitudes de onda. Los nodos tienen conversión limitada de grado 2. Estas dos redes son equivalentes en términos de su capacidad de tráfico. Cualquier conjunto de canales ópticos en una red puede ser soportado por otra red de otros también. Por lo tanto, se puede caracterizar múltiples redes de fibra sin conversión por el equivalente redes de fibra única con la conversión de longitud de onda limitada en los nodos.

Figura 20. **Equivalencia entre redes con fibra múltiple y redes con fibra única**



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p.459.

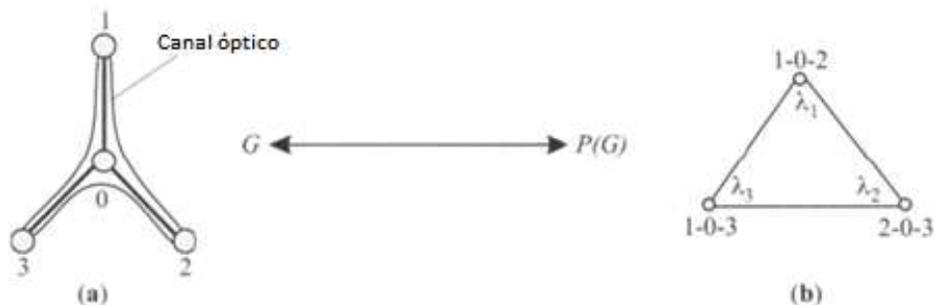
Se usara los sufijos NC, CF, CC y CL para denotar la No Conversión, Conversión Fija, Conversión Completa, y Conversión Limitada respectivamente.

En los casos de conversión total, limitada y fija, el problema WA debe ser convenientemente modificado.

2.2.4. Relacionamiento con gráfica de colores

Resulta que el problema WA descrito anteriormente está estrechamente relacionado con el problema de la coloración de los nodos en un gráfico. Para entender esto mejor, se considera una representación gráfica de la red G , donde los vértices de la grafica representan nodos de la red, con un borde no dirigido entre dos vértices que corresponde a un enlace de fibra óptica entre los nodos correspondientes. La figura 21 (a) es un ejemplo. La ruta para cada canal óptico corresponde a un camino en G , y por lo tanto el conjunto de rutas que se han especificado para los canales ópticos corresponde a un conjunto de caminos, por ejemplo, P . Ahora se considera otro gráfico, el gráfico de la ruta G , denotado por $P(G)$, que se construye de la siguiente manera. Cada camino en G corresponde a un nodo en $P(G)$, y dos nodos en $P(G)$ están conectados por un borde (sin dirección), si los caminos correspondientes en P comparten un borde común en G . La figura 21 (b) muestra la trayectoria gráfica de la figura 21 (a).

Figura 21. Ilustración de la relación de coloreo de lambdas



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 462.

Resolver el problema de WA es entonces equivalente a la resolución del problema de la clásica coloración de la gráfica en $P(G)$, es decir, se tiene que

asignar un color a cada nodo de $P(G)$ tal que a nodos adyacentes se asignan colores distintos y el número total de los colores se reduce al mínimo. Estos colores corresponden a longitudes de onda utilizadas por los caminos de G . El número mínimo de colores necesarios para colorear los nodos de una gráfica de este modo se llama el número cromático de la gráfica. Así, el número mínimo de longitudes de onda necesarias para resolver el problema WA es el número cromático de $P(G)$.

2.3. Dimensionamiento de ruteo y longitud de onda

El aspecto clave del diseño de enrutamiento de longitud de onda de red es la determinación del número y, en general, el conjunto de longitudes de onda que se debe proporcionar en cada enlace WDM. Se nombrara a esto el problema de dimensionamiento de longitud de onda.

En la mayoría de las situaciones prácticas de hoy, la red está diseñada para soportar un tráfico determinado, con una matriz fija. La matriz de tráfico puede ser en términos de canales ópticos o en términos de las capas superiores de tráfico (IP, SONET). En el primer caso, sólo hay que resolver el RWA, mientras que en este último caso, deben ser resueltos tanto el problema LTD y como el RWA (en conjunto o por separado). En general, este es el enfoque utilizado en la práctica de hoy para diseñar el enrutamiento y la longitud de onda de de redes. La solución del problema RWA determina el conjunto específico de longitudes de onda que se debe proporcionar en cada enlace para realizar la topología de canal óptico necesario, y por lo tanto se soluciona el problema de dimensionamiento. Este es el problema RWA en línea ya que se dan todos los canales ópticos a la vez, y es útil en la etapa de planificación de la red. Una vez que la red esté operativa, el problema RWA

tiene que ser resuelto canal óptico por canal óptico a la vez, cuando sea necesario un canal óptico se creará. Este es el problema RWA en línea.

Mientras que el conjunto específico de longitudes de onda obtenidos al resolver el problema RWA en línea puede ser previsto en una red sin OXCs, los OXCs se utilizan donde se necesita flexibilidad en el manejo de diferentes matrices de tráfico. Sin los OXCs, los canales ópticos deben ser establecidos por una matriz estática o una a priori asignación, de longitudes de onda de entrada a longitudes de onda de salida en cada nodo. Cuando los OXCs están implementados, según sea apropiada la configuración de los OXCs, la capa óptica puede cambiar la topología de canal óptico y por lo tanto, adaptarse a las diferentes necesidades de tráfico. Así, este enfoque puede soportar cualquiera de varias y diferentes topologías de canal óptico, y, en consecuencia, las necesidades de tráfico en la capa superior, sobre la misma topología de fibra con el mismo equipo de la capa óptica. Dado que los requerimientos de tráfico de la capa superior son por lo general desconocidos, esta flexibilidad es muy importante en la construcción de una red óptica para el futuro.

2.4. Dimensionamiento de modelos estáticos

Hay dos clases de modelos estadísticos de tráfico que se pueden utilizar en la solución del problema de dimensionamiento. Estos modelos difieren en sus supuestos sobre lo que se conoce sobre el conjunto o conjuntos de canales ópticos que debe ser soportado. En algunos casos, estos modelos también suponen que cada enlace soporta el mismo número (y conjunto) de longitudes de onda, pero esto no siempre puede ser apropiado.

Modelo de primer paso: en este modelo, la red se supone que comienza sin canales ópticos en absoluto. Los canales ópticos llegan en forma aleatoria

de acuerdo con un modelo estadístico y tiene que crearse en la capa óptica. Algunos canales ópticos podrá reservarse, pero se supone que, en promedio, el número de canales ópticos seguirá aumentando y, finalmente, se tendrá que rechazar una solicitud de canal óptico. (Así, la tasa de llegada de las solicitudes de canal óptico será superior a la tasa de terminación de canales ópticos, y la red no está en equilibrio.) Como se está interesado en el dimensionamiento los enlaces WDM dado que el primer rechazo de solicitud canal óptico se producirá, con alta probabilidad, después de un período determinado de tiempo, T .

Este es un modelo razonable, ya que los canales ópticos son de larga vida. Esta longevidad, junto con el costo de un canal óptico de gran ancho de banda hoy en día, significa que no es probable que los operadores de red rechacen una solicitud de canal óptico. Por el contrario, les gustaría mejorar sus redes mediante la adición de más capacidad en los enlaces existentes, o por la adición de más enlaces, con el fin de dar cabida a las solicitudes de canales ópticos. El período de tiempo T corresponde aproximadamente a la hora en que los operadores deben instituir dichas actualizaciones a fin de evitar rechazar las solicitudes canal óptico.

Modelo de bloqueo: en este modelo, las solicitudes de canal óptico son tratadas de la misma manera que una red de telefonía trata las llamadas telefónicas. Las solicitudes se supone que llegan y salen en instantes aleatorios de acuerdo a un modelo estadístico. (Sin embargo, la red se supone que estar en equilibrio, es decir, la tasa de llegada y la tasa de terminación de canales ópticos son iguales.) El supuesto es que la mayoría de las solicitudes deben ser atendidas, pero a veces las solicitudes podrán ser bloqueadas. El objetivo es volver a la dimensión de los enlaces WDM para que el bloqueo de los eventos sea relativamente raro (por ejemplo, una fracción del 1%). Este es un modelo futurista dado que los canales ópticos hoy son relativamente de larga vida, pero

es muy posible que los canales ópticos sean proporcionados por la demanda de algunos operadores en el futuro. En tal escenario, sería razonable utilizar este modelo con el fin de dimensionar los enlaces WDM.

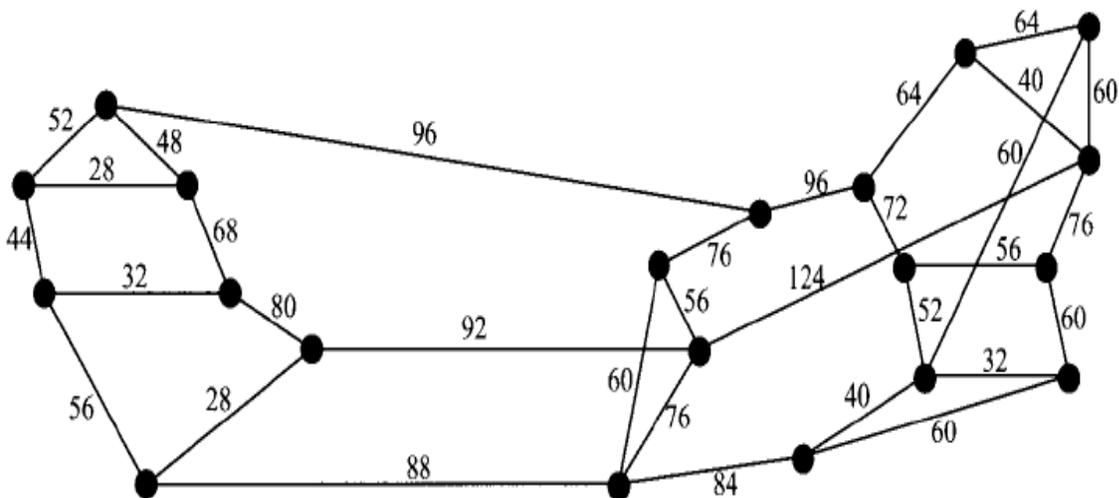
Para estos modelos estadísticos, el análisis de problemas es más fácil de resolver que el problema de diseño. Por ejemplo, en el modelo de bloqueo, es más fácil calcular las probabilidades de bloqueo en cada uno de los enlaces dadas las capacidades del enlace (y el modelo de tráfico) que es el diseño de las capacidades del enlace para lograr predecir las probabilidades de bloqueo. Del mismo modo, en el modelo de primer paso, es más fácil calcular la (estadísticamente) primera vez en la que el operador de red tendrá que bloquear una solicitud de canal óptico por las capacidades de un enlace dado, por esta razón se realiza el diseño de las capacidades de enlace para lograr aproximado del primer paso del tiempo T . Sin embargo, el problema de la capacidad de diseño o dimensionamiento puede ser resuelto por la iteración en el análisis de problemas. Por ejemplo, se puede calcular las probabilidades de bloqueo para un determinado conjunto de capacidades, y si el bloqueo no es aceptable en algunos enlaces, aumentar las capacidades de esos enlaces y volver a calcular las probabilidades de bloqueo.

2.4.1. Modelo de primer paso

En este modelo, se supone que la red se supone comienza sin canales ópticos, pero las capacidades del enlace son dadas. El modelo es analíticamente tratable sólo si se asume que las solicitudes de canal óptico siguen un comportamiento de Poisson y su duración se distribuye de manera exponencial. (Este es el supuesto estándar en las redes telefónicas para las estadísticas de las llamadas telefónicas. Por lo tanto, esto equivale a suponer que las solicitudes de canal óptico son como las llamadas telefónicas.) La red

puede ser modelada como una cadena de Markov en donde el estado de la cadena de Markov representa el conjunto de las llamadas en curso. Se puede considerar tanto OXCs con conversión total de longitud de onda y OXCs sin capacidad de conversión. El enfoque de cadena de Markov es algo manejable sólo en el caso de la conversión de longitud de onda completa.

Figura 22. **Una red de 20 nodos y 32 enlaces que representa el esqueleto de ARPANET**



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 466.

No se describen los detalles matemáticos del modelo analítico que se pueden encontrar, pero se presentan los resultados de dicho análisis para una red de tamaño moderado.

La red considerada se muestra en la figura 22. Cuenta con 20 nodos y 32 enlaces y representa el esqueleto de la ARPANET original. La solicitud de canales ópticos en cada una de las 190 posibles rutas se supone que llegará a un ritmo de una solicitud por mes (pero con una distribución de Poisson). El tiempo medio de arrendamiento de canal óptico se supone que es un año (con

una distribución exponencial). Se supone que la capacidad de cada enlace puede ser un múltiplo de cuatro longitudes de onda. Las capacidades de los enlaces se muestra en la figura 22 se determina de tal manera que la probabilidad de que cualquiera de estos enlaces necesite una actualización de la capacidad dentro de dos años es inferior al 15%.

2.4.2. Modelo de bloqueo

En este modelo, se supone que la llegada y terminación de un canal óptico siguen un patrón estadístico. Se puede permitir que algunas peticiones de canal óptico se bloqueen y se hará enfoque entonces en disminuir la probabilidad de bloqueo. En este caso, una medida del tráfico de canal óptico es la carga ofrecida, que se define como la tasa de llegada de las solicitudes de canal óptico multiplicado por la duración media de un canal óptico.

En la práctica, la probabilidad máxima de bloqueo se especifica, por ejemplo, el 1%. Como el interés es determinar la carga máxima ofrecida que la red puede soportar. Una métrica más conveniente es el factor de reutilización de longitud de onda, R , que se define como la carga ofrecida de longitud de onda que la red puede soportar con la probabilidad de bloqueo especificada. Claramente, R puede depender de (1) la topología de la red, (2) la distribución del tráfico en la red, (3) el algoritmo RWA utilizado, y (4) el número de longitudes de onda disponible.

En principio, si se entrega (1) - (4), se puede determinar el factor de reutilización R . Sin embargo, este problema es difícil de resolver analíticamente para determinados algoritmos RWA. Cuando las rutas entre los nodos de origen-destino en la red son fijas (rutas fijas) y las longitud de onda disponibles son elegidas al azar, las probabilidades de bloqueo (y por lo tanto el factor de

reutilización) puede ser analíticamente estimado para un número razonable de longitudes de onda (hasta 64). Los resultados de este análisis se pueden utilizar para dimensionar los enlaces para una probabilidad de bloqueo como en el caso del modelo de primer paso mencionado anteriormente.

Cuando la ruta no es fija, la estimación de las probabilidades de bloqueo o factores de reutilización son analíticamente intratables, y en la práctica, la mejor manera de estimar R , incluso para pequeñas redes es por simulación. Es posible calcular analíticamente el valor máximo de R cuando el número de longitudes de onda es muy grande para redes pequeñas y sirve como un límite máximo en el factor de reutilización de los valores prácticos de la serie de longitudes de onda. Cuando el número de longitudes de onda es pequeño, las técnicas de simulación pueden ser utilizadas para calcular el factor de reutilización. También se compararan los resultados de la simulación con el límite superior calculado analíticamente en el factor de reutilización. Se utilizaran los gráficos escogidos al azar para modelar la red, se asumira un proceso de llegada de Poisson con tiempos de espera exponencial, si se supone una distribución uniforme de tráfico, y utilizar el siguiente algoritmo RWA.

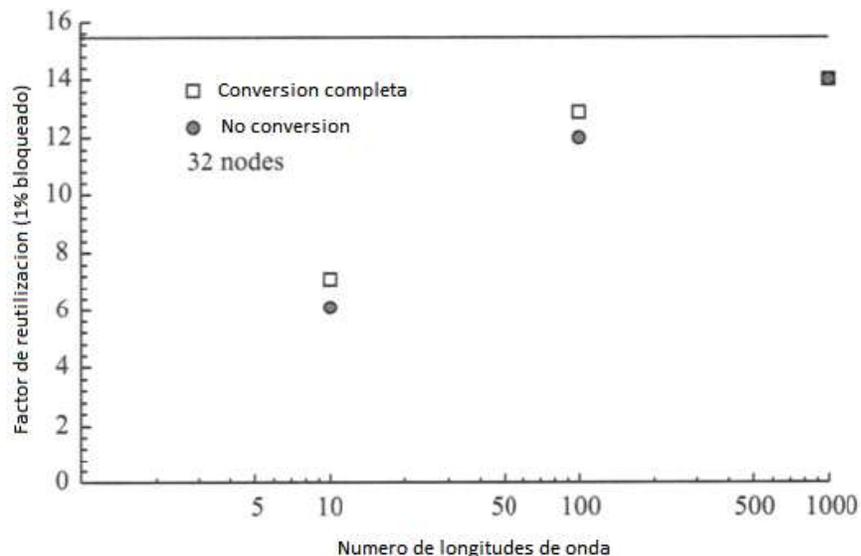
Algoritmo 2.1

- Numere las W longitudes de onda disponibles a partir del 1 de W .
- Para una solicitud de canal óptico entre dos nodos, asignarle la primer longitud de onda disponible en una ruta fija corta entre los dos nodos.

La figura 23 muestra el factor de reutilización contra el número de longitudes de onda para una grafica de 32 nodos aleatorios con un promedio de

grado 4. La figura también muestra el valor de la probabilidad de bloqueo que se puede lograr con un número infinito de longitudes de onda, que puede calcularse analíticamente como se mencionó antes. El factor de reutilización es ligeramente superior con la conversión completa. El punto interesante a señalar es que el factor de reutilización se mejora a medida que aumenta el número de longitudes de onda.

Figura 23. **Factor de reutilización contra el número de longitudes de onda para una gráfica aleatoria de 32 nodos con un grado promedio de 4**



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 468.

Esto se debe a un fenómeno conocido como eficiencia *trunking*, que es familiar a los diseñadores de las redes telefónicas. Esencialmente, la probabilidad de bloqueo se reduce si se cambia la escala de la capacidad de tráfico y capacidades de los enlaces por el mismo factor. Para ilustrar este fenómeno, considere un único enlace con llegadas de Poisson con carga ofrecida ρ y con W longitudes de onda. La probabilidad de bloqueo en este enlace está dada por la fórmula de Erlang-B:

$$P_b(\rho, W) = \frac{\frac{\rho^W}{W!}}{\sum_{i=0}^W \frac{\rho^i}{i!}}.$$

Se puede comprobar que si tanto el tráfico ofrecido y el número de longitudes de onda son escalados por un factor $\alpha > 1$, entonces

$$P_b(\alpha\rho, \alpha W) < P_b(\rho, W)$$

y

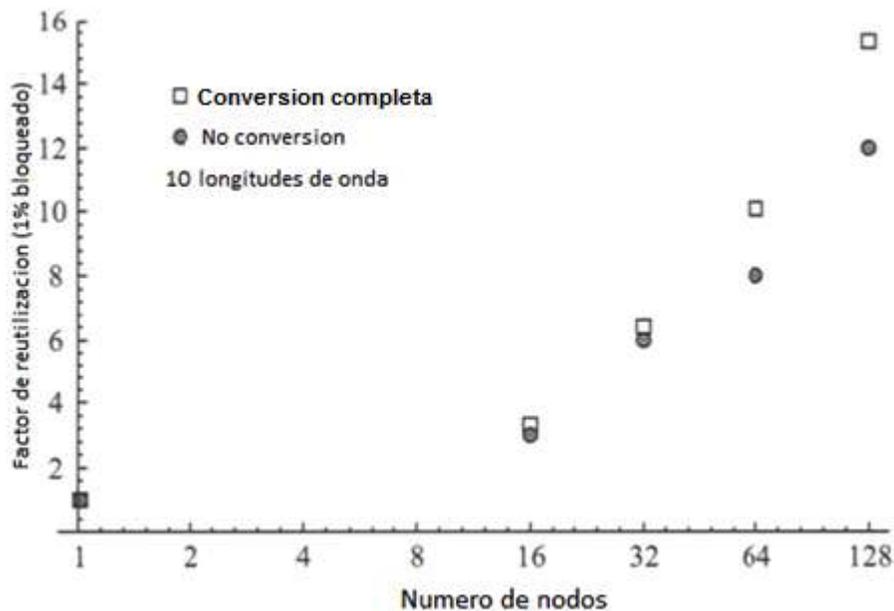
$$P_b(\alpha\rho, \alpha W) \rightarrow 0 \text{ como } \alpha \rightarrow \infty \text{ si } \rho \leq W.$$

La figura 24 muestra el factor de reutilización contra el número de nodos N . El valor de R para cada N se obtiene promediando los resultados simulados en tres diferentes gráficos al azar, cada uno de grado promedio 4. La figura muestra que (1) R aumenta con N , y (2) la diferencia entre no tener y tener la conversión y esta también aumenta con N . Note la observación (1) es de esperar debido a la longitud promedio de canal óptico (con respecto a número de saltos) en la red crece como $\log(N)$, mientras que el número de enlaces en la red crece como N . Por lo tanto se espera que el factor de reutilización de aumentara más o menos como $N / \log(N)$. La razón para la observación (2) es que la longitud promedio de la ruta (o saltos) de un canal óptico en la red aumenta con N . Se observara que los convertidores de longitud de onda son más eficaces cuando la red tiene más caminos.

Una simulación similar se ha realizado para redes de anillo. En general, el aumento en el factor de reutilización obtenidos después de usar de conversión de longitud de onda se encontró que era muy pequeño. Esto puede parecer contradictorio al principio porque las longitudes de saltos en los anillos son

bastante grandes en comparación con redes de malla. En los anillos, que se superponen canales ópticos tienden a hacerlo en un número relativamente grande de enlaces, en comparación con las redes de malla.

Figura 24. **Factor de reutilización de registrarse en el número de nodos de grafos aleatorios con un grado promedio de 4**



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p. 470.

2.5. Modelos de dimensionamiento de máxima carga

Desde una perspectiva de dimensionamiento, la propiedad fundamental que distingue a las redes de enrutamiento de longitud de onda de las tradicionales redes electrónicas de circuitos conmutados es la ausencia de conversión de longitud de onda completa. Se supondrá que tanto los canales ópticos y los bordes de la red están sin dirección.

Los resultados se pueden clasificar en dos categorías: las solicitudes fuera de línea y las solicitudes en línea. El problema fuera de línea corresponde a un

problema estático de diseño de la red, donde debe soportarse un conjunto único de canales ópticos. Este conjunto se ve obligado a ser tal que se puede soportar en una red con nodos capaces de conversión de longitud de onda completa, con a lo sumo L longitudes de onda por enlace, ya que es una ruta que no pone más que L rutas en cualquier enlace. Por lo tanto, la carga máxima de este conjunto de canales ópticos se dice que es L .

RWA en línea corresponde al caso dinámico de diseño de la red donde los canales ópticos surgen uno a la vez y tienen que ser asignadas las rutas y longitudes de onda cuando la solicitud llega, sin esperar que sean conocidas futuras solicitudes. Sin embargo, las solicitudes y enrutamiento son tales que no más de L canales ópticos pueden utilizar cualquier enlace en cualquier momento dado. Así, una red con crosconexiones de conversión de longitud de onda total que proporciona L longitudes de onda en cada enlace sería capaz de soportar todas las solicitudes.

En este caso, la tarea consiste en comparar el número necesario de longitudes de onda adicionales para soportar a los mismos conjuntos de canales ópticos sin crosconexiones de conversión de longitud de onda.

Uno de los defectos de este modelo de carga máxima es que el número de longitudes de onda requerido puede ser excesivamente grande para soportar todos los conjuntos de canales ópticos con carga máxima L .

Si se permite no soportar a una pequeña fracción de estos conjuntos de canales ópticos, puede ser posible reducir considerablemente el número de longitudes de onda necesarias. En este sentido, el modelo de carga máxima es el peor caso de los métodos de dimensionamiento.

2.5.1. Solitud de canal óptico fuera de línea

En esta sección se estudiarán los resultados de las solicitudes de canal óptico fuera de línea.

Teorema 2.1 Dada la ruta de un conjunto de canales ópticos con carga L en una red G con M bordes, con el número máximo de saltos en un canal óptico iniciando en D , el número de longitudes de onda suficientes para satisfacer esta solicitud es $W \leq \min [(L - 1) D + 1, (2L - 1) \sqrt{M} - L + 2]$.

Prueba. Observe que cada canal óptico pueden interceptarse con un máximo de otros $(L - 1)D$ canales ópticos. Así, el grado máximo de la gráfica de ruta $P(G)$ $(L - 1) D$. Cualquier gráfico con un grado máximo puede ser de color con $A + 1$ colores por un algoritmo de color codiciosos simple, y por lo tanto, el gráfico de ruta de acceso puede ser de color utilizando $(L - 1) D + 1$ colores. Así $W \leq (L - 1) D + 1$.

Para probar el resto del teorema, suponga que hay k canales ópticos de longitud $\geq \sqrt{M}$ saltos. La carga promedio debido a estos canales ópticos en un borde es

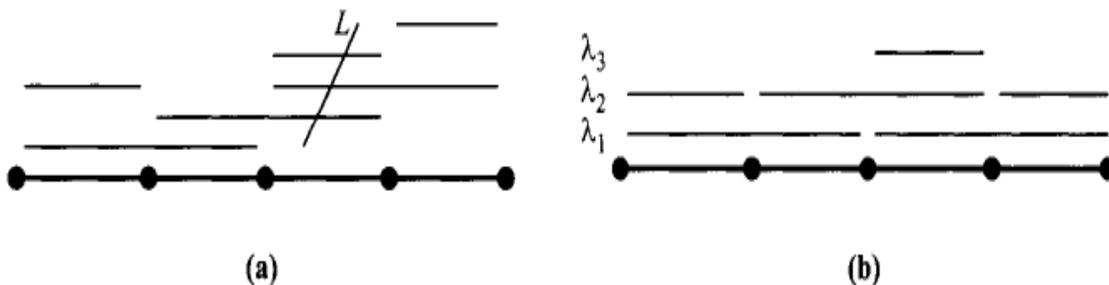
$$\frac{K \sqrt{M}}{M} \leq L$$

por lo que $K \leq L\sqrt{M}$. Se asignará $L\sqrt{M}$ longitudes de onda por separado a estos canales ópticos. Hay que considerar ahora los canales ópticos de longitud $\leq L\sqrt{M} - 1$ saltos. Cada uno se intercepta con un máximo de $(L - 1)(\sqrt{M} - 1)$ de otros canales ópticos, y así se necesita un máximo de $(L - 1)(\sqrt{M} - 1) + 1$ longitudes de onda adicionales. Así se obtiene:

$$W \leq L\sqrt{M} + (L - 1)(\sqrt{M} - 1) + 1 = (2L - 1)\sqrt{M} - L + 2$$

lo que demuestra el teorema.

Figura 25. (a) Gráfico de intervalos. (b) la asignación de longitud de onda realizada por el algoritmo 2.3



Fuente: RAMASWAMI, Rajiv. Optical networks a practical perspective. p.476.

Una línea de red, que se muestra en la figura 25, es simplemente una red de nodos interconectados en una línea. También se muestra en la misma figura un conjunto de muestras de las solicitudes de canal óptico. En este caso, no hay ningún aspecto de enrutamiento, existe sólo el problema de asignación de longitud de onda. El problema WA-NC es equivalente al problema de coloración de intervalos en una línea. El siguiente algoritmo lleva a cabo la coloración usando L longitudes de onda. El algoritmo es ambicioso, en el sentido de que nunca da marcha atrás y cambiara un color que haya sido asignado cuando asigne el mismo color a un nuevo intervalo.

Algoritmo 2.3

- Numerar las longitudes de onda de 1 a L . Comenzando con el primer canal óptico de la izquierda y asignarle la longitud de onda 1.

- Ir al siguiente canal óptico a partir de la izquierda y asignarle el número más pequeño de longitud de onda posible, hasta que todos los canales ópticos sean coloreados.

En un anillo, hay dos rutas posibles para cada canal óptico. Dado un conjunto de solicitudes de canales ópticos, hay un algoritmo que hace la ruta con la mínima carga posible L_{min} . Este algoritmo puede involucrar que ciertos canales ópticos tomen la ruta más larga alrededor del anillo. Una alternativa más sencilla es utilizar la ruta más corta de enrutamiento para canales ópticos, que, sin embargo, produce una mayor carga.

3. OTRAS TECNOLOGÍAS

Para comprender las ventajas que brinda ROADM, es necesario que se comprenda las características y limitantes de otras tecnologías de transporte. El análisis para un mejor entendimiento debería ser extenso sin embargo para fin de comprensión se hará corto y conciso. Existen tecnologías que actualmente son las encargadas de transportar los servicios en el área metropolitana y regional, actualmente en Guatemala se encuentran redes con las tres tecnologías que a continuación se describen.

3.1. MPLS

MPLS (*Multiprotocol Label Swiching*) es un estándar emergente del IETF (RFC 3031) que surgió para consensuar diferentes soluciones de conmutación multinivel, propuestas por distintos fabricantes a mitad de los 90s. Se debe considerar MPLS como un gran avance en la evolución de las tecnologías de *routing* y *forwarding* en las redes IP, lo que implica una evolución en la manera de construir y gestionar estas redes.

Los problemas que presentan las soluciones actuales de IP sobre ATM, tales como la expansión sobre una topología virtual superpuesta, así como la complejidad de gestión de dos redes separadas y tecnológicamente diferentes, quedan resueltos con MPLS. Al combinar lo mejor de cada nivel (la inteligencia del *routing* con la rapidez del *switching*) en un único nivel, MPLS ofrece posibilidades en la gestión de *backbones*, así como en la provisión de nuevos servicios de valor añadido. Es necesario considerar MPLS como una tecnología fuerte en cuanto al transporte de servicios.

3.1.1. Características de MPLS

Multiprotocolo Label Switching (MPLS) opera independientemente de la tecnología de red de acceso. Generalmente se utiliza como columna vertebral para redes de acceso diferentes, como *Frame Relay*, ATM, Ethernet o paquetes sobre SDH (PoS).

Las etiquetas utilizadas en MPLS son identificadores fijos de longitud. El encabezado de pila de MPLS contiene la etiqueta MPLS al que el *Switch Routers* (LSR) enviará el paquete. Pueden apilarse encabezados (por ejemplo, en VPNs MPLS).

Los protocolos de enrutamiento IP mejorados distribuyen la topología y restricción de base de datos. Los protocolos de distribución de etiqueta son los protocolos de establecimiento de conexión estándar a través de la cuales los LSRs establecen una ruta completa desde la entrada LSR a la salida LSR. Esta ruta es conocida como un *Label Switched Path*. Configurar un LSP también se llama fase de señalización.

MPLS es una plataforma para la construcción de servicios sobre redes de telecomunicaciones avanzadas. Ha sido diseñado para satisfacer los requerimientos de los proveedores de servicios que necesitan ampliar las tecnologías de conmutación de paquetes más y más profundamente en sus redes de acceso. Al hacerlo, proporciona la tranquilidad de una plataforma de verdadera clase portadora que permite crear e implementar nuevos servicios.

La incorporación de la tecnología IP/MPLS crea una plataforma única sólida, escalable y manejable para brindar servicios de voz y datos de la generación actual. Los servicios que se prestan a través de redes IP/MPLS

son regidos por el modelo OSI mostrado en la figura 26, en IP/MPLS se pueden llegar a desplegar servicios de capa1, capa 2 y hasta capa 3.

Figura 26. **Modelo OSI**



Fuente: elaboración propia.

Las troncales físicas de mayor capacidad es decir los enlaces de MPLS con mayor capacidad que se pueden encontrar actualmente son de 10 *Gigabits* por segundo.

Los equipos de con tecnología MPLS sirven para proporcionar cuatro servicios básicos:

- Transporte móvil para RAN 2G y 3G.
- Servicios gestionados de Ethernet.

- IP VPNs gestionadas.
- Agregación de servicios de banda ancha.

Los equipos hoy por hoy que trabajan con tecnología MPLS tienen como límite de capacidad máxima de tráfico interfaces de 42 *Gigabits* por segundo.

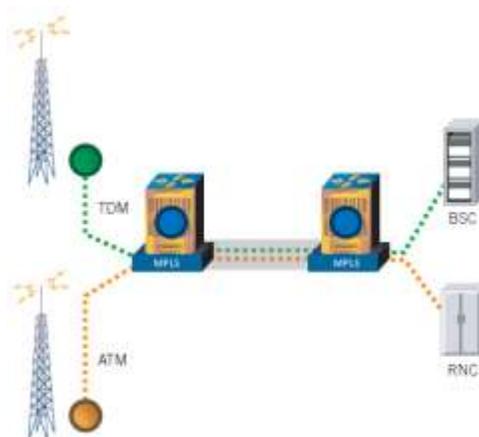
3.1.2. Aplicaciones de MPLS

Las principales aplicaciones que hoy en día tiene MPLS son:

- Ingeniería de tráfico.
- Diferenciación de niveles de servicio mediante clases (CoS).
- Servicio de redes privadas virtuales (VPN).

MPLS es una tecnología de enrutamiento que utiliza la capa uno como servicio, y da servicio a tecnologías de capa dos y tres, según modelo OSI. En Guatemala, la aplicación que se le da a esta tecnología está representada en la figura 27.

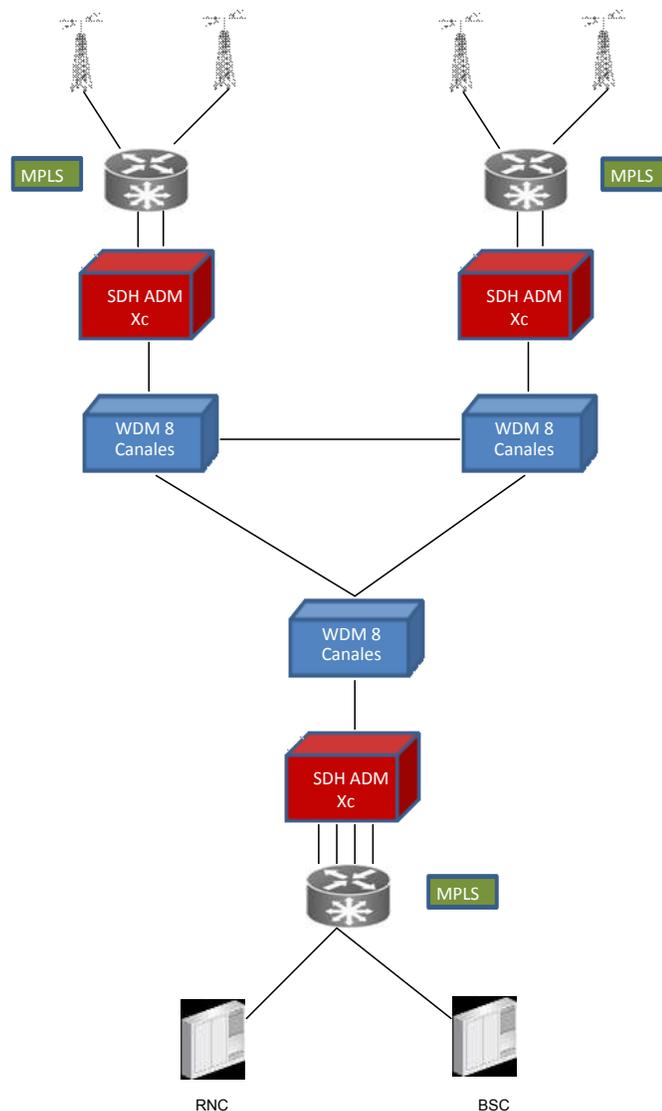
Figura 27. **Aplicación de MPLS en Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

El transporte de servicios de telefonía lo ejecutan redes de MPLS, debido a su capacidad para transportar servicios de tecnologías como TDM (2G) y ATM (3G) entre otras. Una limitante es la distancia que son capaces de cubrir, MPLS se limita a alcances metropolitanos, una solución y muy utilizada en otros países se representa en la figura 28.

Figura 28. **Redes MPLS sobre redes SDH y/o DWDM, para cubrir áreas regionales**



Fuente: elaboración propia.

Aunque la solución es válida, tiene desventaja en que se infiere en gastos de inversión al doble o triple debido a que si el ancho de banda utilizado es demasiado grande deberá implementarse no únicamente una red SDH sino que también una red DWDM.

3.2. DWDM

Multiplexión por división de longitud de onda densa (DWDM), la cual es una innovación importante en las redes ópticas. A continuación se examinan las diferencias entre los tradicionales *Time Division Multiplexing* (TDM) y la multiplexión por división de longitud de onda (WDM).

DWDM es el acrónimo, en inglés, de *Dense Wavelength Division Multiplexing*, que significa Multiplexión por división de longitudes de onda densa.

La introducción de nuevos servicios de valor añadido tales como vídeo bajo demanda o aplicaciones multimedia requiere de una gran cantidad de ancho de banda para satisfacer las necesidades de los usuarios. Las soluciones que tienen los proveedores de servicio para satisfacer este aumento de la demanda de tráfico son diversas. Por una parte pueden instalar más fibra, aunque ésta es una solución cara y en algunos casos inviable. Otra solución consiste en utilizar técnicas de multiplexión por división en el tiempo (TDM), donde el aumento de capacidad se consigue por medio de ranuras de tiempo más pequeñas que permiten transmitir mayor cantidad de bits (datos) por segundo. Esta tecnología ha sido utilizada en las redes de transporte basadas en los estándares SDH/SONET. No obstante, el principal problema al que se enfrentan los proveedores de servicio es el relacionado con el salto a una capacidad mayor. Basándose en la jerarquía SDH, la capacidad

inmediatamente superior a los 10 *Gigabits* por segundo son los 40 *Gigabits* por segundo, por lo que se obtiene más capacidad de la que pudiera necesitarse en un principio, con el correspondiente desembolso económico pues hay que actualizar todos los transmisores y receptores del sistema.

La tercera alternativa consiste en DWDM, que permite aumentar de una forma económica la capacidad de transporte de las redes existentes. Por medio de multiplexores, DWDM combina multitud de canales ópticos sobre una misma fibra, de tal modo que pueden ser amplificados y transmitidos simultáneamente. Cada uno de estos canales, a distinta longitud de onda, puede transmitir señales de diferentes velocidades y formatos: SDH/SONET, IP, ATM, etc. Es decir, DWDM puede multiplexar varias señales TDM sobre la misma fibra.

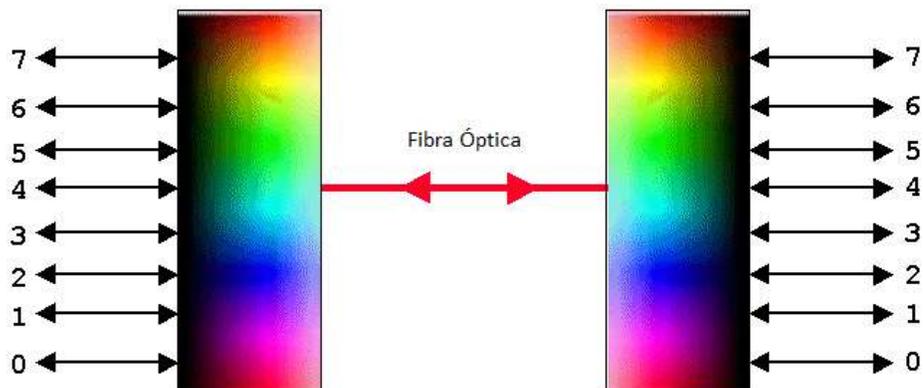
Tras evolucionar las comunicaciones analógicas a las digitales, y de PDH a SDH, hoy por hoy en Guatemala aun se está pasando SDH a DWDM. Así, considerando la capacidad de las diferentes tecnologías como la tasa de transmisión de bits utilizada y el factor de multiplexión ofrecido por los nodos de conmutación y multiplexión.

3.2.1. Características de DWDM

En su núcleo, DWDM consta de un pequeño número de funciones de nivel físico. Cada canal funciona con una longitud de onda específica. La longitud de onda se expresa (usualmente en nanómetros) como un punto absoluto en el espectro electromagnético. La luz efectiva a una determinada longitud de onda se confina estrechamente alrededor de su longitud de onda central. En la figura 30 se muestra un diagrama a bloques de cómo se multiplexa y demultiplexa una señal que puede ser de SDH (STM-16) o Ethernet (1 o 2 *Gigabits* por segundo)

debido a que la capacidad máxima de sobre DWDM es de 2,5 *Gigabits* por segundo por cada canal.

Figura 29. Diagrama a bloques de un enlace DWDM



Fuente: <http://sx-de-tx.wikispaces.com/DWDM+y+CWDM>. Consulta: 15 de agosto de 2011.

El sistema realiza las siguientes funciones principales:

- Generación de la señal. La fuente, un láser de estado sólido, debe suministrar una luz estable dentro de un ancho de banda específico y estrecho, que transporta los datos digitales modulados como una señal analógica.
- Combinación de señales. Los modernos sistemas DWDM emplean multiplexores para combinar las señales. Hay alguna pérdida inherente asociada a la multiplexión y demultiplexión. Esta pérdida depende del número de canales pero se puede mitigar con amplificadores ópticos que amplifican todas las longitudes de onda a la vez sin conversión eléctrica.

- Transmisión de señales. Los efectos de diafonía y la degradación o pérdida de la señal óptica deben ser tenidos en consideración en la transmisión por fibra óptica. Estos efectos pueden ser minimizados mediante el control de las variables tales como el espaciado entre canales, la tolerancia de la longitud de onda, y los niveles de potencia del láser. En un enlace de la transmisión, se puede necesitar una amplificación de la señal.
- Separación de las señales recibidas. En el lado del receptor, las señales multiplexadas deben ser separadas. Aunque esta tarea parece ser simplemente el opuesto a la combinación de señales, en la actualidad es técnicamente más difícil.

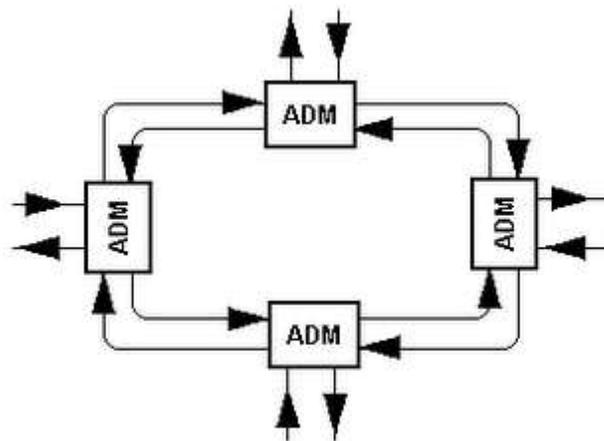
Las redes ópticas a diferencia de las SONET/SDH no dependen del procesamiento eléctrico de datos. Así su desarrollo estará más ligado a la óptica que a la electrónica. En su forma anterior, como se ha descrito previamente, el WDM era capaz de transportar señales sobre dos longitudes de onda espaciadas y de ancho espectro y a una distancia relativamente corta.

Para moverse más allá de este estado inicial, WDM necesitó mejoras de las tecnologías existentes e inventar nuevas tecnologías. Las mejoras en filtros ópticos y láseres de banda estrecha permiten al DWDM combinar más de dos longitudes de onda en una fibra. La invención de un amplificador óptico de ganancia plana acoplado a la línea de fibra amplificando la señal óptica, incrementó dramáticamente la viabilidad de los sistemas DWDM extendiendo de forma importante la distancia máxima.

DWDM es una tecnología a utilizar en el corazón de una red de transporte óptico. Los componentes esenciales del DWDM se pueden clasificar por su posición en el sistema de la manera siguiente:

Dado que los sistemas DWDM envían señales de varias fuentes sobre una sola fibra, se deben incluir algunos dispositivos para combinar las señales de entrada. Esto lo hace un multiplexor, que toma las longitudes de onda ópticas de múltiples fibras y las convierte en un solo rayo. En el extremo receptor, el sistema debe poder separar los componentes de luz así que puedan ser discretamente detectados. En la figura 30 se muestra un anillo DWDM en topología de anillo.

Figura 30. **Anillo DWDM**



Fuente: <http://sx-de-tx.wikispaces.com/SONET+y+SDH>. Consulta: 16 de agosto de 2011.

Los demultiplexores realizan esta función desglosando el rayo receptor en sus componentes de longitud de onda y acoplándolos a la fibra individual. La demultiplexión se debe hacer antes de la detección de la luz, porque los fotodetectores inherentemente son dispositivos de banda ancha y no pueden selectivamente detectar una sola longitud de onda.

Los multiplexores y los demultiplexores en Guatemala son en su mayoría pasivos. Los principales retos en estos dispositivos es minimizar la diafonía y maximizar la separación de canal. La diafonía es una medida de cuanto están separados los canales, mientras que la separación de canales se refiere a la posibilidad de distinguir cada longitud de onda.

3.2.2. Aplicaciones DWDM

El objetivo de DWDM es multiplicar la capacidad de transmisión de datos a través de una fibra óptica.

Actualmente existen dos tipos de equipos.

- Equipos para redes de larga distancia *long-haul*.
- Equipos para redes metropolitanas.

Para las redes de *long-haul*, esta tecnología es de suma importancia, debido a que muchos de los proveedores de servicios de telecomunicaciones estaban muy limitados al crecimiento, porque el expandir sus redes era sumamente costoso y tardado. Se tenía que pensar en tender fibra óptica y no nada más hacia las zonas donde se quería llegar, si no también crecer en el *backbone* de la red para evitar cuellos de botella.

Con DWDM es sumamente sencillo expandir estas redes existentes y aumentar la capacidad de transporte, lo cual se traduce en poder brindar más servicios, poder llegar a más clientes y ser más competitivos.

La propuesta de DWDM es sencillamente aumentar la capacidad de la fibra existente, y mantener la tecnología instalada, simplemente es añadir equipos con esta tecnología en puntos estratégicos e inmediatamente tener mucha más capacidad de transporte a un costo accesible.

Los equipos de redes metropolitanas al igual que los equipos para redes *long-haul* ayudan a aumentar la capacidad de las fibras ópticas tendidas en las ciudades, con esto los proveedores de servicios son capaces de rentar no solamente fibras oscuras sino también entran a un nuevo nicho de oportunidades como lo son la renta de lambdas o longitudes de onda.

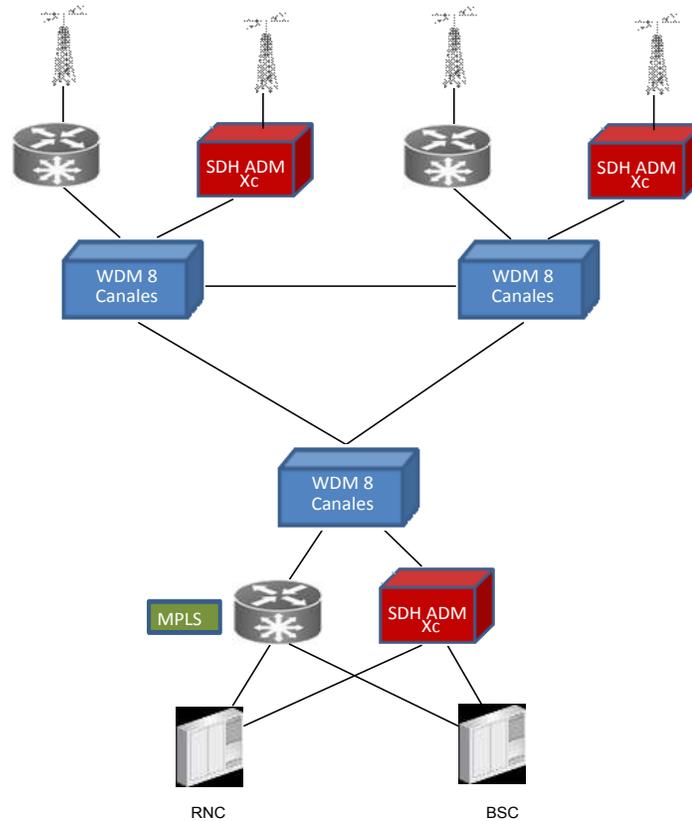
Con la tecnología que existe actualmente se pueden transmitir información a velocidades de 2,5 *Gigabits* por segundo a través de cada una de las 8 lambda, y esto es una ventana de oportunidades tanto a empresas del sector corporativo como a *carriers* de volverse más competitivos en sus negocios adoptando esta tecnología y hacer uso de aplicación demandantes de ancho de banda. Esta tecnología es independiente al protocolo, con lo cual simplifica las comunicaciones de las empresas debido a que todavía se manejan una gran diversidad de éstos.

Las aplicaciones que actualmente se están usando son:

- Redes proveedoras de transporte de datos, Ethernet, voz sobre ip, etc.
- Redes convergentes de voz, datos y video a distancias considerables.
- Aplicaciones de SAN (*Storage Area Network*), que con DWDM es posible interconectar dispositivos de almacenamiento masivo y verlos como una sola entidad.
- Expansiones de redes metropolitanas.
- Integración de redes transnacionales.
- Soluciones de ancho de banda.

La aplicación que se le da a esta tecnología en Guatemala está representada en la figura 31.

Figura 31. **Aplicación de DWDM en Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

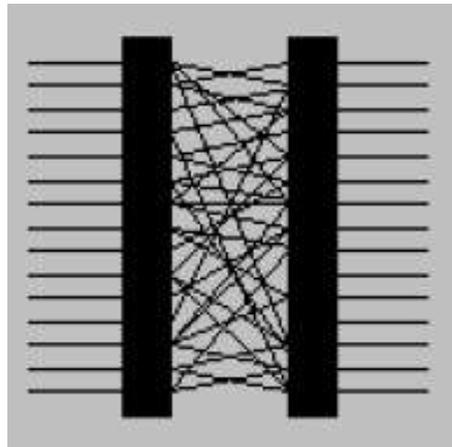
3.3. SDH

SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) es un estándar para redes de telecomunicaciones específicamente de jerarquía digital síncrona. Este es un sistema de transporte digital realizado para proveer una infraestructura de redes de telecomunicaciones más simple, económica y flexible.

Las viejas redes fueron desarrolladas en el tiempo en que las transmisiones punto a punto eran la principal aplicación de la red. Hoy en día

los operadores de redes requieren una flexibilidad mucho mayor. La figura 32 muestra la distribución de trama de un nodo de crosconexión plesioncrono.

Figura 32. **Estructura de una red PDH punto a punto**



Fuente: <http://conocimientotechnology.com/2010/07/pdh.html>. Consulta: 15 diciembre 2012.

El objetivo de la jerarquía SDH, nacida en los años 80, era normalizar las velocidades superiores a 140 *Megabits* por segundo que hasta ese momento eran propietarias de cada compañía.

3.2.3. Generalidades de SDH

La tecnología SDH, ofrece a los proveedores de redes las siguientes ventajas:

- Los sistemas SDH logran velocidades de 10 *Gigabits* por segundo (STM – 64). SDH es la tecnología más adecuada para los *backbones*, que son realmente las superautopistas de las redes de telecomunicaciones.

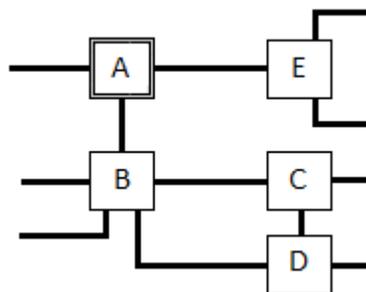
- La función simplificada de inserción/extracción, comparado con los sistemas PDH tradicionales, ahora es mucho más fácil extraer o insertar canales de menor velocidad en las señales compuestas SDH de alta velocidad. Esto se debe a que en la jerarquía SDH todos los canales están perfectamente identificados por medio de una especie de etiquetas que hacen posible conocer exactamente la posición de los canales individuales por medio de coordenadas KLM.
- Las redes SDH incluyen varios mecanismos automáticos de protección y recuperación ante posibles fallos del sistema. Esta protección se puede realizar mediante una reservación de ancho de banda en la ruta de protección de un servicio. Un problema en un enlace o en un elemento de la red no provoca el colapso de toda la red, lo que podría ser un desastre financiero para el proveedor. Estos circuitos de protección también se controlan median un sistema de gestión.
- SDH es la plataforma ideal para multitud de servicios, desde la telefonía tradicional, las redes RDSI o la telefonía móvil hasta las comunicaciones de datos (LAN, WAN, etc.) y es igualmente adecuada para los servicios más recientes, como el video bajo demanda (VoD) o la transmisión de video digital vía ATM.
- Permitir la interconexión de redes de diferentes operadores, por lo que fue necesario fijar un estándar de señalización común con respecto a la longitud de onda, la temporización y la estructura de los marcos o *frames* empleados.

- Unificar los sistemas digitales estadounidense, europeo y japonés, que se basan en modulaciones por modificación de pulsos codificados PCM de 64 kilobits por segundo incompatibles entre sí.
- Proporcionar apoyo a la operación, la administración y el mantenimiento de la red, cuestiones que no habían sido abordadas en estándares anteriores.

3.2.4. Aplicaciones de SDH

Como toda evolución, debe realizarse gradualmente. Los equipos de telefonía y de datos antiguos deben cambiarse poco a poco. La clave del SONET/SDH es que permite interfaces con fuentes asíncronas por lo que los equipos existentes pueden ser sustituidos o soportados por la red SDH. De esta forma las transiciones se pueden realizar gradualmente. En SDH en las redes de telecomunicaciones es el croscconector que permite reordenar, derivar e insertar señales, sobre todo si las mismas son de niveles bajos, por ejemplo 2 *Megabits* por segundo en 620 *Megabits* por segundo, ya que en SDH no es necesaria la demultiplexión como en la asincrónica. Los equipos croscconectores se definen por su nivel de acceso y por su nivel de conmutación.

Figura 33. **Red de administración**



Fuente: elaboración propia.

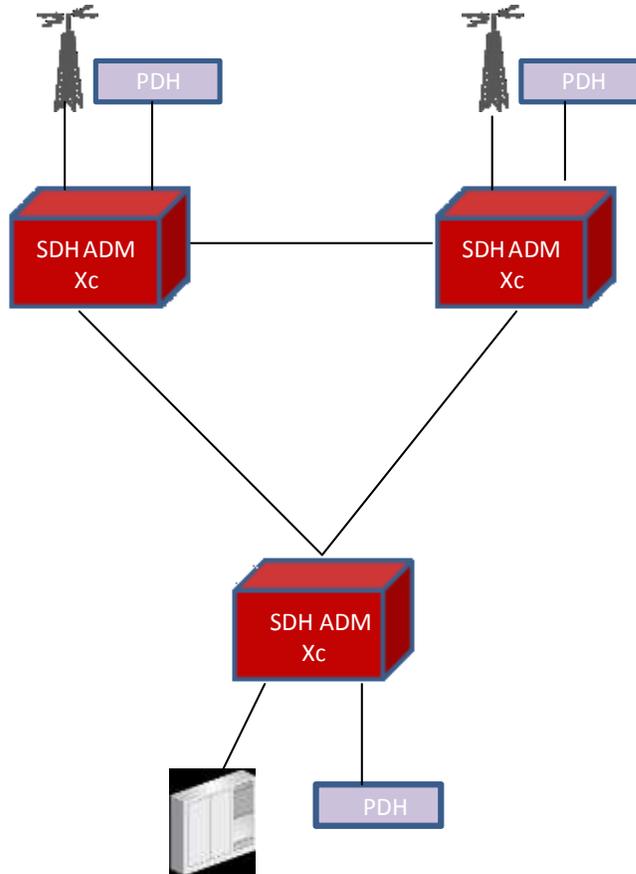
La aplicación de estos equipos redundante en una mayor flexibilidad de las redes. Si se analiza el ejemplo de la figura 33, desde una estación central de administración de la red A, puede controlarse la capacidad de transmisión entre cada una de las estaciones B, C, D y E, comandando por ejemplo las crosconexiones (CC) o los add/drop en esos nodos. En algún caso puede quedar interrumpido el enlace B-C, pudiendo reorientarse el tráfico a través de B-D-C, eligiendo directamente los canales a transferir de ruta. En otro caso puede ocurrir que en D se produzca una demanda transitoria importante con motivo de algún evento especial, debiéndose incrementar la ruta B-D.

En un tercer caso puede requerirse un alquiler de troncales punto a punto exclusivos entre D y E. Todos estos casos y muchos otros se resuelven de una manera mucho más sencilla con la estructura SDH, dando lugar al concepto de manejo integral de redes de telecomunicaciones (TMN, *Telecommunications Management Network*).

Siendo SDH por así decirlo la segunda generación de redes de transporte en Guatemala (transportando y luego reemplazando a PDH), se adoptó como el transporte por excelencia para telefonía y datos a pequeña escala en Guatemala. Aunque SDH mundialmente está desapareciendo, se mantendrá fuertemente muchos años en las redes de Guatemala. La aplicación que se le da a esta tecnología en Guatemala está representada en la figura 34.

Las redes DWDM, SDH y MPLS, constituyen redes de transporte actuales que están en funcionamiento hoy en día, tal es el caso de Guatemala. Cada una de estas, como se indicó en este capítulo, tienen sus propias características y aplicaciones. La descripción de estas tecnologías aquí descritas servirá de base para describir el impacto que tiene la introducción de ROADM en las redes de transporte.

Figura 34. **Aplicación de SDH en Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS COMPARATIVO

Ahora que se tienen claras las características con las que cuenta cada una de las tecnologías que son las dominantes en la actualidad, se procede a realizar un análisis comparativo con la tecnología ROADM.

4.1. Propósito de una red de transporte

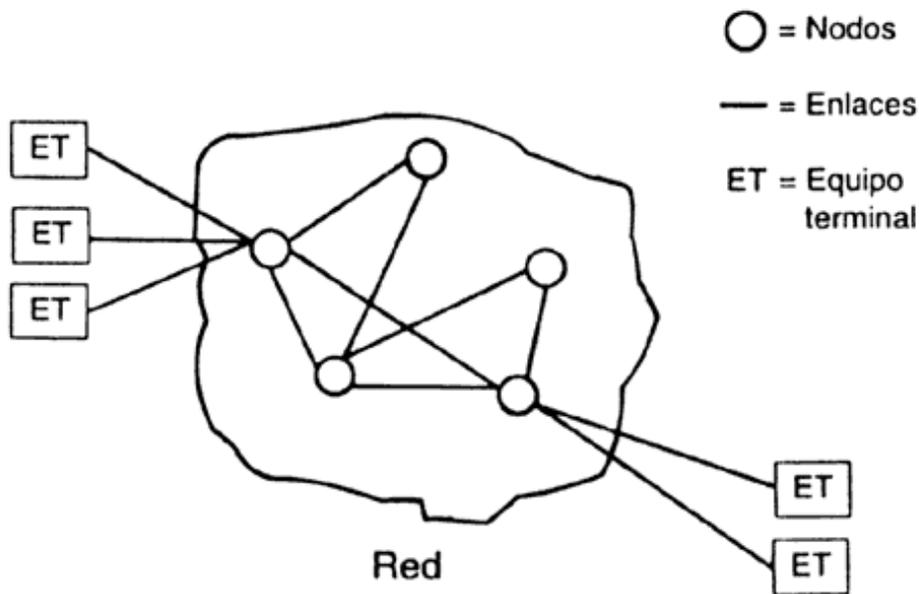
El propósito de una red de transporte de telecomunicaciones será ofrecer el intercambio de información entre equipos terminales, manteniendo la información intacta desde su fuente hasta su destino, sin importar la distancia entre equipos terminales.

Un sistema de telecomunicaciones consiste en una infraestructura física a través de la cual se transporta la información desde la fuente hasta el destino, y con base en esa infraestructura se ofrecen a los usuarios los diversos servicios de telecomunicaciones, figura 35. Se denominará red de telecomunicaciones a la infraestructura encargada del transporte de la información. Para recibir un servicio de telecomunicaciones, un usuario utiliza un equipo terminal a través del cual obtiene entrada a la red por medio de un canal de acceso. Cada servicio de telecomunicaciones tiene distintas características, puede utilizar diferentes redes de transporte, y, por tanto, el usuario requiere de distintos equipos terminales.

La red es la infraestructura de comunicaciones utilizada por el operador para ofrecer sus servicios, en una Red Todo Óptica esta infraestructura estaría compuesta por nodos de conmutación ópticos interconectados por enlaces de

fibra óptica. En su origen se utilizó exclusivamente en enlaces de larga distancia pero con el tiempo su uso se ha ido extendiendo por todos los segmentos de la red llegando recientemente hasta el hogar a través de los servicios conocidos como FTTH (Fibre To The Home).

Figura 35. **Red de telecomunicaciones**



Fuente: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/149/htm/sec_8.htm.

Consulta: 28 de noviembre 2011.

Una red FTTH no es exactamente una red todo óptica, en una red FTTH tanto los enlaces entre el usuario y la central de acceso como entre los nodos de conmutación de la red utilizan fibra óptica. Sin embargo las tecnologías de conmutación actuales (Ethernet, IP, SDH...) están basadas en equipamiento electrónico que necesita realizar conversiones optoelectrónicas en sus puertos de conexión de fibra. Por tanto una red con accesos de fibra, pero con equipos electrónicos de conmutación, no sería una Red Todo Óptica.

4.2. Comparación de distintas tecnologías con respecto a tecnología ROADM

Hasta ahora, se han abordado las tecnologías de vanguardia por separado, a continuación se realizara una comparación matricial en donde se resaltarán las características más importantes de cada una, el resultado será la visibilidad de las ventajas de ROADM sobre el resto de tecnologías de transporte.

4.2.1. Comparaciones técnicas

Las transformaciones de los servicios y las redes continúan impulsando la evolución de las Redes de Transporte de Banda Angosta orientadas a Voz hacia las Redes de Transporte de Banda Ancha orientadas a tráfico IP (*Broadband Transport Networks* - BTN). Entonces el despliegue de una Red de Transporte Óptico de Banda Ancha orientada a tráfico IP y basada en la Red de Transporte Óptico (*Optical Transport Networks* - OTN) según la norma G.709 permitirá que los operadores preparen el terreno para una infraestructura de red de servicios múltiples optimizada.

ROADM es una solución por la que los proveedores de transporte de datos a larga distancia han esperado durante muchos años.

El problema es que los *carriers* desean construir una red de fibra SDH, proveyendo conexiones de alta velocidad, pero debido a la alta demanda es imposible reabastecer el ancho de banda desde una *workstation*, esto ha sido imposible en las redes en el área metropolitana, donde crear y eliminar conexiones de longitudes de onda ópticas de alta capacidad para el transporte de servicio se ha imposibilitado debido a los exorbitantes costos de la

configuración manual. La configuración de ADM siempre ha sido una tarea larga y compleja, que se consolida a una configuración específica para un lugar.

Tabla IV. **Comparación de ROADM frente a otras tecnologías**

ROADM frente a tecnologías DWDM, SDH MPLS					
	Red de transporte de alta capacidad de larga distancia	Integración de Interfaces	Protección de redes	Flexibilidad de configuración	Restauración de redes
ROADM	ROADM se ajusta bien a dar este servicio	Tiene interfaces de capa 1 y capa 2 de alta capacidad (10 GB)	ROADM trabaja bien en configuración de anillo y mesh	ROADM esta integrado a sistemas de configuración y gestión centralizado	ROADM tiene integrado la aplicación "Control Plane" que facilita la restauración de
DWDM	ROADM tiene mas alta capacidad cuando se compara 88 (10GB) canales contra 8 (2.5GB) de DWDM	ROADM integra interfaces de mas capacidad que DWDM al comparar 10 GB con 2.5 GB	ROADM aventaja a DWDM al trabajar en configuración mesh, DWDM se ajusta bien a configuración en anillo	ROADM y DWDM tienen igual nivel de integración a sistemas de gestión	DWDM no tiene esta aplicación
MPLS	ROADM puede dar soporte como red de transporte a MPLS	ROADM al ser capa de transporte de MPLS puede transportar los interfaces	Puede dar soporte a redes MPLS en configuración anillo o mesh	ROADM y MPLS tienen igual nivel de integración a sistemas de gestión	MPLS utiliza sistemas de restauración de capa 2 RSVP
SDH	ROADM tiene mas alta capacidad cuando se compara 88 canales contra 1 de SDH	ROADM integra interfaces de mas capacidad que SDH al comparar 10 GB con 1 GB o	ROADM aventaja a SDH al trabajar en configuración mesh, SDH se ajusta bien a configuración en anillo	ROADM y SDH tienen igual nivel de integración a sistemas de gestión	SDH no tiene esta aplicación

Fuente: elaboración propia.

La solución que ROADM ofrece es que permite al proveedor de servicio sentarse en una Workstation, y dinámicamente proveer un servicio punto a punto, enlaces entre oficinas que estén separadas por miles de kilómetros, a través de un anillo DWDM/SDH. El cual puede ser cualquier servicio de alta velocidad. Si un anillo es configurado con múltiples ROADMs, las capacidades de reconfiguración se realizan de forma análoga a una configuración de VPN en

MPLS. El administrador puede hacer *click* en los puntos extremos y listo. En la siguiente tabla se visualiza una síntesis de las compensaciones técnicas con las que cuentan estas tecnologías de transporte en donde se visualiza de mejor manera las ventajas que provee ROADM frente al resto de tecnologías.

La tecnología ROADM destaca dos elementos, la selección de la longitud de onda y su demultiplexión. La selección de dicha longitud de onda se hace mediante *software*, así los usuarios pueden elegir qué longitud de onda o grupo de longitudes de onda se pueden habilitar en un sitio particular de una red de ROADM. En el sitio donde se hace bajada, ROADM permite demultiplexar el grupo de longitudes de onda por en canales individuales que posteriormente son entradas de recepción de dispositivos de cliente tales como *switches* Ethernet y *Switches Fibre Channel*. Para una mejor percepción destaca en la tabla IV las características de mayor peso entre ROADM y el resto de tecnologías para el transporte de servicios.

4.2.2. Análisis económico detallado

La clave de este ahorro de costes se encontraría en la reducción de las matrices de conmutación electrónicas y de las conversiones O / E / O asociadas a éstas. Las conversiones O / E / O para enlaces de alta capacidad metropolitanos y de larga distancia requieren el uso de tecnologías muy complejas y de alto costo. Por ejemplo, el costo de un puerto a 10 *Gigabits* por segundo de larga distancia en un *router* IP puede superar los 10 000 euros en países europeos por ejemplo, y este costo se incrementaría en enlaces a 40 *Gigabits* por segundo y 100 *Gigabits* por segundo que requieren una tecnología bastante más compleja.

Si en el futuro se realizase un despliegue masivo de FTTH a 100 *Megabits* por segundo y se mantuviese la arquitectura de red del núcleo IP de larga distancia actual en Europa, entonces el costo asociado a los puertos de conmutación a 10 *Gigabits* por segundo, 40 *Gigabits* por segundo y 100 *Gigabits* por segundo podría rondar los 400 millones de euros. Para llegar a esta cifra se realiza un cálculo muy sencillo: suponiendo que existen 4 millones de usuarios, que el tráfico que llega al núcleo es sólo de 20 *Megabits* por segundo (el resto se queda en la red metropolitana) y que existe una tasa de concurrencia del 10% entonces el tráfico cursado por el núcleo de red sería de 4 *Terabits* por segundo, asumiendo un costo de 10 000 euros por *Gigabits* por segundo se obtiene la cifra de 400 millones de euros.

Según los resultados de los estudios tecno económicos realizados el uso de una red todo óptica para el transporte de flujos de tráfico a 10 *Gigabits* por segundo reduciría la utilización de núcleo IP en un 65%. Por tanto se puede estimar que los ahorros en puertos de conversión optoelectrónica en el núcleo de red podrían rondar los 260 millones de euros. Para desarrollar el análisis económico de aplicación, se simulara el desarrollo de un proyecto, así como la implementación de un anillo de cuatro nodos, que para el nivel de capacidad de estos equipos en Guatemala es un tamaño de red considerable, el anillo se implementara con tecnología ROADM y con dos grados.

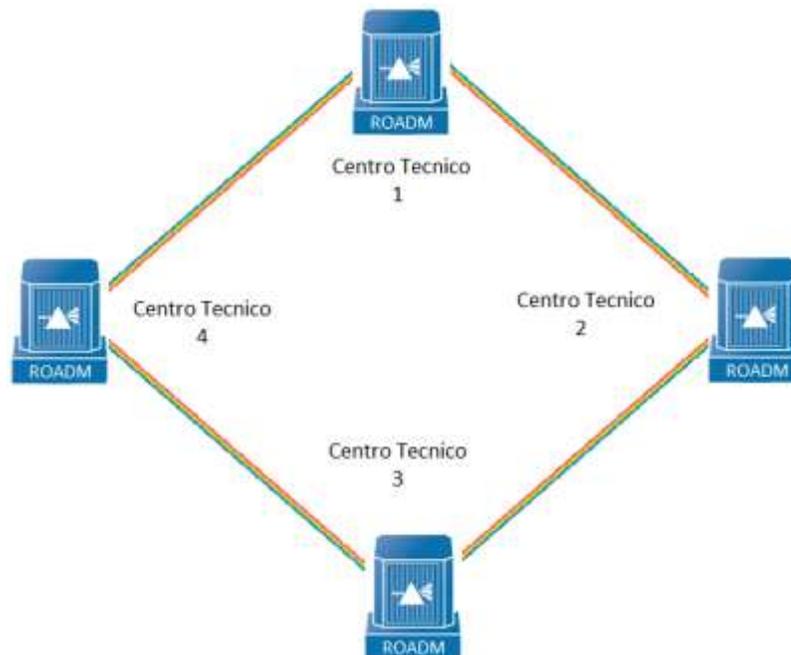
Descripciones generales:

- Se contemplara el anillo de tal forma que generara única y exclusivamente el transporte de servicios, es decir que no se realizara el análisis de la inversión de ningún *router* ni de terminales SDH o cualquier otro equipo de acceso, el transporte será transparente.

- Los servicios que este anillo podrá brindar serán: 5 anillos STM-64, 5 anillos de 10 Gigabits por segundo, 4 anillos STM-16 y 10 anillos de 1 Gigabits por segundo.
- Los cuatros sitios contarán con el mismo equipamiento.

El bosquejo de este proyecto se ve representado en la figura 36. Bajo estas condiciones, que son las que actualmente más tendencia tienen en la industria guatemalteca de telecomunicaciones se puede dar inicio al análisis económico. Se dará por sentado que se contará con las infraestructuras necesarias para la implementación de los equipos, es decir no habrá que incurrir en gastos para la alimentación de energía, se contarán con el espacio físico necesario para la correcta implementación de los equipos.

Figura 36. **Diagrama esquemático de anillo ROADM**



Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Tamaño del proyecto**

Tamaño de proyecto		
	Total	Total servicios instalados
Cuatro nodos		
20 puertos 1 Giga por nodo	80	64
10 puertos 10 Giga por nodo	40	30
8 Puertos SDH STM-16 por nodo	32	24
10 Puertos SDH STM-64 por nodo	40	32

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Tabla de inversión**

Inversión			
	Única vez	Monto	Total
Inversión de equipo en primer período	1	700 000,00	700 000,00
Inversión Planta Externa en primer período	1	150 000,00	150 000,00
Servicios de instalación primer período	1	50 000,00	50 000,00
Total			900 000,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Capital de trabajo**

Capital de trabajo			
	Única vez	Monto	Total
Capital	1	1 200 000,00	1 200 000,00
Total			1 200 000,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Otros valores**

Otros Valores	
Tasa de retorno capital	25%
Tasa de impuesto	30%
Tiempo de vida útil de Planta Externa (años)	15
Tiempo de vida útil equipo (años)	5
Incremento costos operación momento 2	40%
Incremento costos operación momento 3	30%
Incremento costos operación momento 4	20%
Incremento costos operación momento 5	10%
Valor desecho Planta Externa	125 000,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Egresos por período**

Egresos por período			
	Cantidad por período	Precio por período	Total
Pago de servicios de repuestos	1	20 000,00	20 000,00
Costos administrativos (Incluye ventas)	1	200 000,00	200 000,00
Costos de operación	1	400 000,00	400 000,00
Costos fijos	1	200 000,00	200 000,00
Total			

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Cantidad de servicios vendidos por período**

Cantidad de servicios vendidos por período									
	Cantidad Total	Precio Unitario por período	T1	T2	T3	T4	T5	Total	Total
Servicios Giga	64	25 000,00	3	11	21	36	64	64	1 600 000,00
Servicios 10 Giga	30	200 000,00	1	4	8	16	30	30	6 000 000,00
Servicios STM-16	24	50 000,00	1	5	9	15	24	24	1 200 000,00
Servicios STM-64	32	150 000,00	2	6	11	19	32	32	4 800 000,00
Total									13 600 000,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Flujo de ingresos por período**

Ingresos						
Renglón	T0	T1	T2	T3	T4	T5
Servicios Giga		75 000,00	275 000,00	525 000,00	900 000,00	1 600 000,00
Servicios 10Giga		200 000,00	800 000,00	1 600 000,00	3 200 000,00	6 000 000,00
Servicios STM-16		50 000,00	250 000,00	450 000,00	750 000,00	1 200 000,00
Servicios STM-64		300 000,00	900 000,00	1 650 000,00	2 850 000,00	4 800 000,00
Total		625 000,00	2 225 000,00	4 225 000,00	7 700 000,00	13 600 000,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Cálculo valor desecho planta externa

Cálculo Valor Desecho Planta Externa	
Ingreso	125 000,00
Valor Libros	100 000,00
Utilidad	25 000,00
Imp , 30%	7 500,00
Valor desecho	117 500,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Detalle por períodos

	Flujo de Caja	PERIODOS					
		0	1	2	3	4	5
Ingresos y Egresos afectos a impuestos	Ingresos		625 000,00	2 225 000,00	4 225 000,00	7 700 000,00	13 600 000,00
	Repuestos		-20 000,00	-28 000,00	-36 400,00	-43 680,00	-48 048,00
	Costos administrativos		-20 000,00	-280 000,00	-364 000,00	-436 800,00	-480 480,00
	Costos de operación		-400 000,00	-560 000,00	-728 000,00	-873 600,00	-960 960,00
	Costos Fijos		-200 000,00	-200 000,00	-200 000,00	-200 000,00	-200 000,00
Gastos no desembolsables	Depreciación Equipo		-140 000,00	-140 000,00	-140 000,00	-140 000,00	-140 000,00
	Depreciación Planta Externa		-10 000,00	-10 000,00	-10 000,00	-10 000,00	-10 000,00
Cálculo de Impuestos	Utilidad		-345 000,00	1 007 000,00	2 746 600,00	5 995 920,00	11 760 512,00
	Impuesto		103 500,00	-302 100,00	-823 980,00	-1 798 776,00	-3 528 153,60
	Utilidad neta		-241 500,00	704 900,00	1 922 620,00	4 197 144,00	8 232 358,40
Ajustes por gastos no desembolsables	Depreciación Equipo		140 000,00	140 000,00	140 000,00	140 000,00	140 000,00
	Depreciación Planta Externa		10 000,00	10 000,00	10 000,00	10 000,00	10 000,00
Ingresos y Egresos no afectos a impuestos	Inversión de equipo	-700 000,00					
	Inversión Planta Externa	-150 000,00					
	Servicios de instalación	-50 000,00					
	Capital trabajo	-1 200 000,00					
	Valor de recupero CT						1 200 000,00
	Valor de desecho Planta Externa						117 500,00
	Flujo del proyecto	-2 100 000,00	-91 500,00	854 900,00	2 072 620,00	4 347 144,00	9 699 858,40

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resultados**

Valor del proyecto	
VAN	4 394 157,22
TIR	65%

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar la implementación de un proyecto con tecnología ROADM arroja resultados muy prometedores, esto se debe a la reducción de costos que se genera en el despliegue de fibra óptica, y todo lo relacionado con planta externa.

De la misma forma se observa que la diversidad de transporte con respecto a servicios permite incurrir en la recuperación inmediata de la inversión inicial, dado que se realiza una renta mensual más alta por algunos servicios aunque no así tanto por otros. ROADM permite brindar ambos satisfaciendo las necesidades de los proveedores de transporte así como del usuario final.

4.2.3. Aplicación de ROADM en Guatemala

En todo el mundo se exige al máximo la optimización de fibra óptica, esto debido a que una empresa de transporte internacional necesita generalmente de los servicios de empresas que cuentan y se dedican a la renta de fibra óptica, si se traslada a fibras submarinas como es el ejemplo de una de las empresas que renta su fibra para el transporte de servicios de una empresa de telefonía de Guatemala hasta Miami en Estados Unidos, es una cantidad considerable de dinero mes a mes, si se lleva al plano regional para la misma empresa realizar transporte de servicios a nivel centroamericano si no cuenta con la infraestructura o tiene problemas para implementarla recaería en la

necesidad de rentar fibra óptica. Y si se lleva al plano nacional los impuestos que la misma empresa paga por levantar y sostener tramos de fibra en el país es una considerable suma de dinero mensual. Con todo esto se espera recalcar la importancia de la optimización del ancho de banda en un mismo par de hilos de fibra óptica, y ROADM es por excelencia el *carrier* de la actualidad.

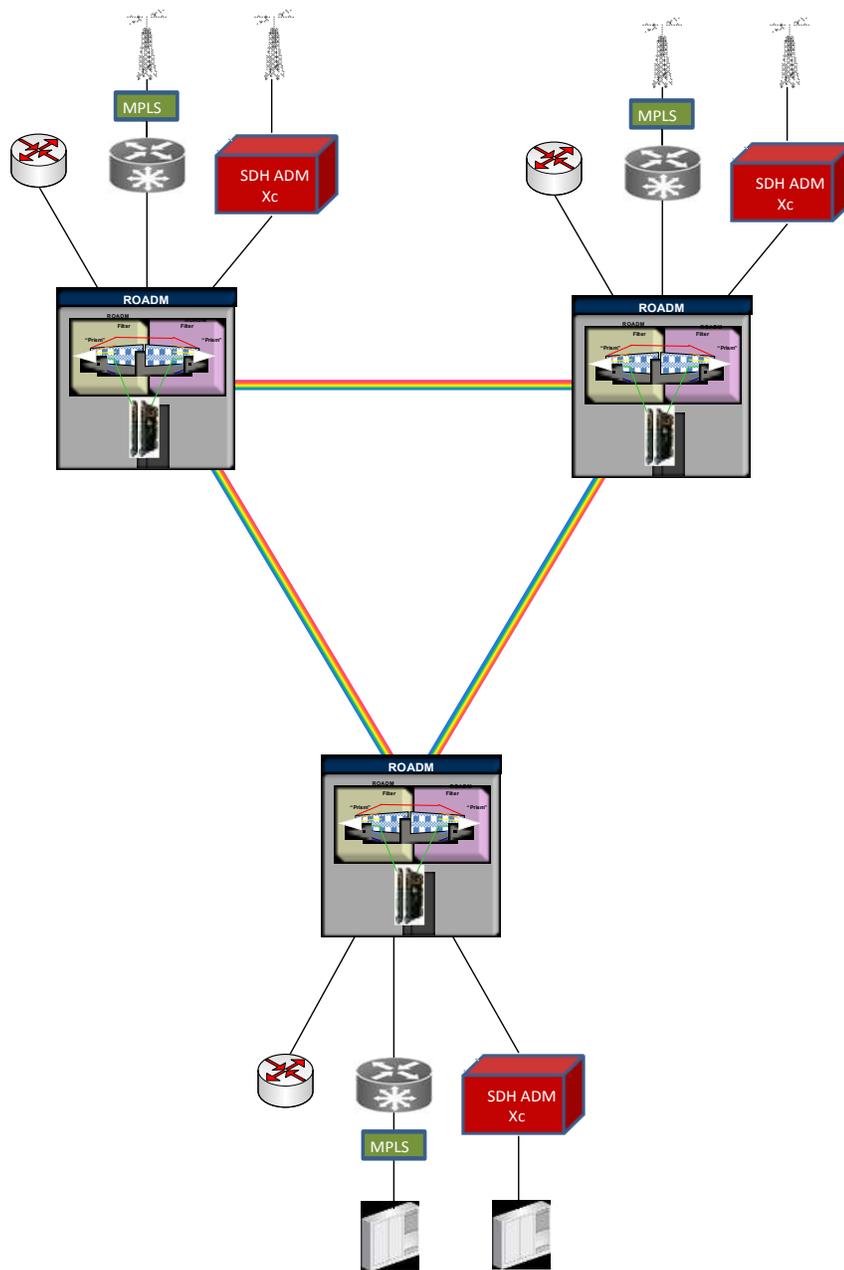
En Guatemala como se describió en el capítulo 3, se cuenta con redes de transporte MPLS, DWDM y redes SDH, pero en todas ellas se utilizan hilos de fibra diferentes, es entonces hasta ahora con la aparición de ROADM es que se puede optimizar al máximo la fibra óptica.

En la figura 37 se ilustra la aplicación que se le da a ROADM en Guatemala actualmente, transportando servicios de MPLS, SDH y Ethernet en el mismo par de hilos de fibra, transportando servicios como lo son STM-64, STM-16, 10 Gigabits por segundo y 1 Gigabits por segundo hasta el día de hoy. ROADM en Guatemala se ha desplegado para este año única y exclusivamente a nivel metropolitano, se puede observar entonces que ROADM infiere en las redes de transporte dando un soporte al cambio generacional de redes de transporte paulatinamente, es decir que los equipos de acceso necesitan interfaces diferentes a las que se utilizan ahora, se necesitaría una inversión para implementar unidades que soporten las interfaces de los equipos de acceso, o en su defecto la sustitución completa de la red lo cual sería una pérdida en equipo e inversión en nuevo equipo desmesurada e inabordable para las empresas de transporte de servicios.

Por otro lado como se observa en la figura 38, ROADM transporta diferentes tecnologías al mismo tiempo por el mismo hilo de fibra, incluso sobre la misma lambda, esto se logra debido a que ROADM es una tecnología que

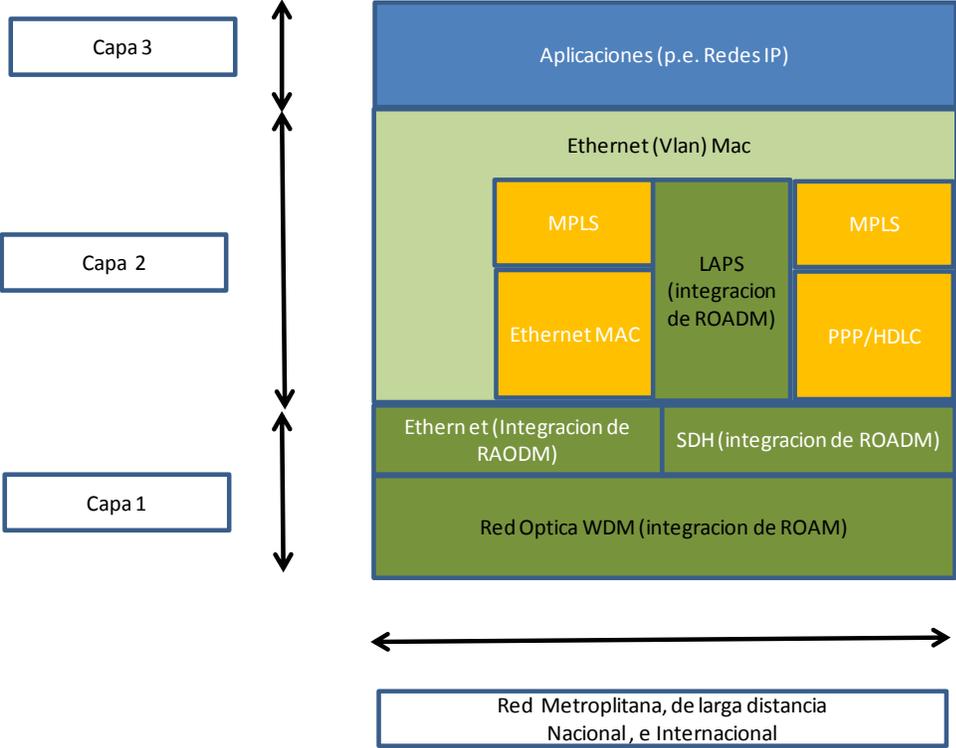
trabaja en la capa 1, y es capaz de soportar protocolos de capa superior como se ha venido recalcando en capítulos anteriores.

Figura 37. **Aplicación de ROADM en Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

Figura 38. ROADM insertado en la capa física



Fuente: elaboración propia.

4.2.4. Ventajas a futuro y perspectivas

Comercialmente una red todo óptica facilitaría la provisión de nuevos servicios que requieran bajos retardos y un gran consumo de ancho de banda en todos los segmentos de red. En la siguiente tabla se muestran algunos ejemplos de aplicaciones que cumplen con estos requisitos y que, por tanto, podrían ofrecerse sobre una red todo óptica.

Por otro lado, la otra gran ventaja de una Red Todo Óptica es que reduciría los costes tanto de inversión como de operación de una red con accesos FTTH de muy alta capacidad. En la figura 39 se muestra un ejemplo de una posible distribución de servicios sobre una conexión FTTH a 100 *Megabits* por segundo.

Tabla XV. **Servicios que requieren gran ancho de banda en la red**

Servicios		Ancho de banda
Servicios empresariales	VPN óptica	1-100 Gbps
	Replicación de base de datos	1 Gbps
Tele-cirugía	Video de alta definición sin codificar	1 Gbps
Contenidos en tiempo real para salas de cine	Ultra HDTV (UHDTV)	400 Mbps
Servicios residenciales	TV / Videoconferencias 2D alta definición	10-15 Mbps por canal
	Juegos de red	1 Mbps
	TV / Videoconferencias 3D (definición estándar)	50 Mbps por canal

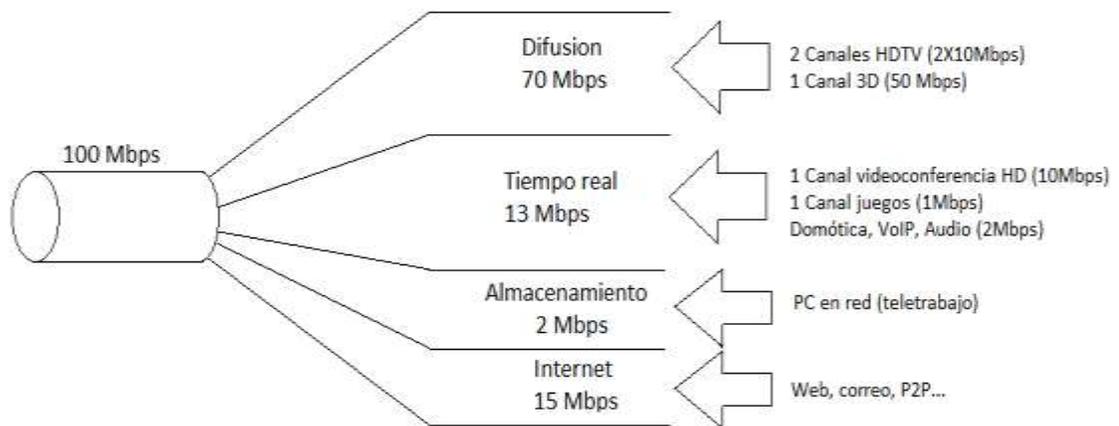
Fuente: elaboración propia.

El sistema de transmisión es el responsable de recolectar el tráfico desde los puntos de presencia y optimizarlo a manera que sea posible su diseminación en un canal de comunicación. Luego de viajar por el canal, el sistema, es el encargado de entregar los datos verificando, previamente, la integridad de los mismos.

Actualmente el sistema de transmisión en soluciones tradicionales, lo componen las interfaces y líneas troncales entre centrales, típicamente integradas por multiplexores TDM con interfaces SDH y Ethernet sobre DWDM en la capa de transporte, pero también pueden existir mecanismos basados en redes IP/MPLS para efectuar las tareas cotidianas, que son la minoría de las listadas en la tabla 1, esto quiere decir que es necesaria la implementación de redes todo ópticas en la infraestructura de transporte.

En la tabla XV se listan los servicios que se podrían llegar a brindar con la implementación de redes FTTH.

Figura 39. **Ejemplo de distribución de servicios sobre una conexión FTTH a 100 Megabits por segundo**

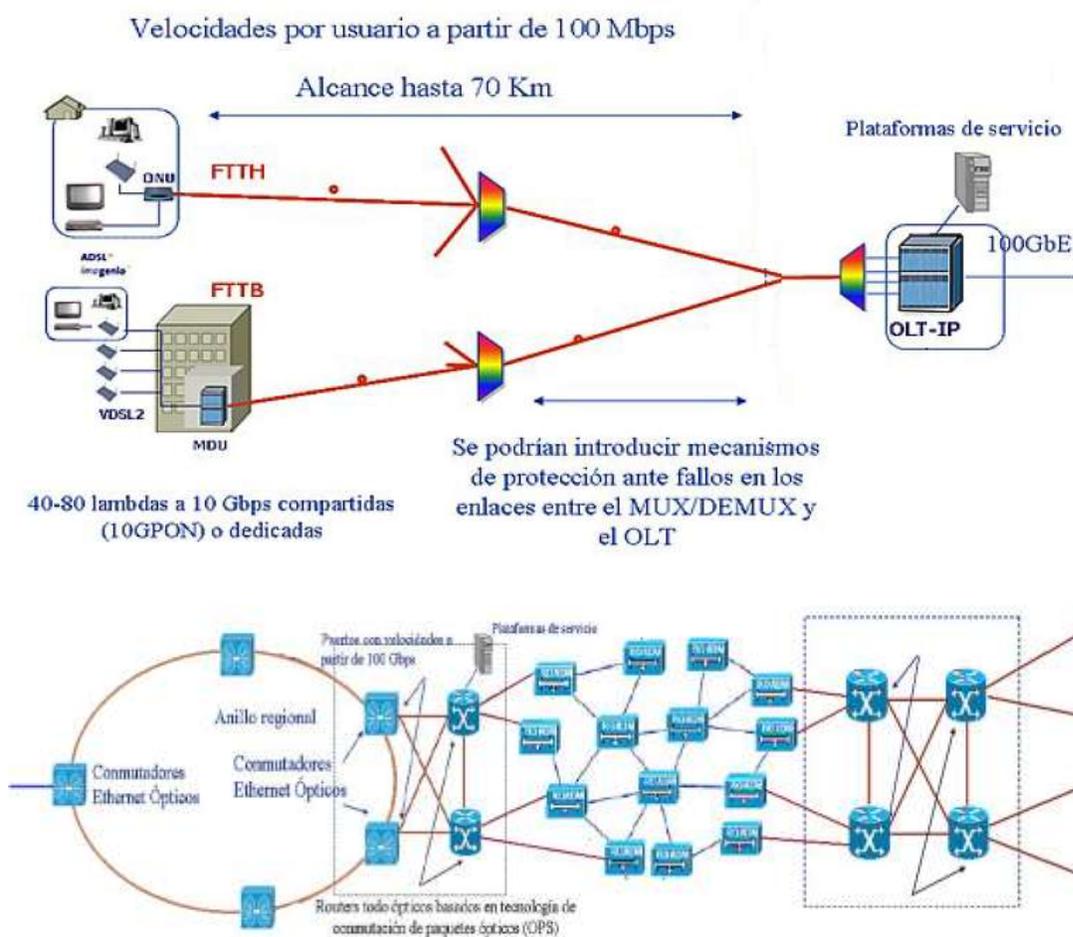


Fuente: elaboración propia.

A continuación se hará una breve descripción de una arquitectura de Red Todo Óptica basada en tecnologías que actualmente se encuentran en una fase experimental y que en el 2015 podrían encontrarse en el mercado. La arquitectura global de esta red se muestra en la figura 40.

Este gran ancho de banda en telecomunicaciones tendrá las siguientes repercusiones en todo el mundo, Para el 2020, las redes de comunicaciones estarán aún más integradas que hoy en la vida diaria, tanto en casa como en el trabajo. La tecnología impulsada por redes será un componente clave de las actividades cotidianas, al tiempo que resultará todavía más transparente para el usuario, que no tendrá que preocuparse de cómo funciona y simplemente disfrutará de sus beneficios.

Figura 40. **Arquitectura global de red todo óptica**



Fuente: www.telos.com/año_2020_una_todo_óptica. Consulta: 14 de febrero de 2012.

La red del futuro creará un entorno híper conectado. La inteligencia capacitada por tecnologías de comunicaciones formará parte integral de todo lo que se pueden imaginar y de algunas cosas que aun no se pueden ni imaginar. Aunque ya están en marcha muchas de las novedades que serán moneda corriente en 2020, algunos descubrimientos parecen sacados de una novela de ciencia ficción. Estas innovaciones afectarán a todos los entornos posibles. Por ejemplo:

- **Atuendo.** Algunos dispositivos como gafas o visores llevarán cámaras que grabarán y retransmitirán al mismo tiempo. Pantallas discretas enviarán información continua al usuario, como por ejemplo el menú al entrar a un restaurante o asistencia técnica mediante una demostración de realidad virtual. Los chalecos de *gaming* transmitirán sensaciones para reforzar la impresión de realidad.
- **Hogar.** El hogar inteligente con comunicaciones de fibra servirá de plataforma para gestionar todas las funciones del ecosistema digital, desde la seguridad y la gestión de la energía hasta la supervisión médica, el teletrabajo y la educación a distancia. Las neveras dispondrán de superficies táctiles que mostrarán listas de la compra y cupones, además de detectar el contenido para controlar las existencias de forma instantánea.
- **Salud.** El dispositivo inalámbrico de un paciente le recordará cuándo tiene que tomarse un medicamento o recibir un tratamiento, los dispositivos para el hogar generarán estadísticas diarias que facilitarán la atención preventiva y los pacientes consultarán con especialistas en otras ciudades mediante conexiones de video de tres dimensiones de alta definición.

Muchas personas llevarán sensores inalámbricos diminutos capaces de detectar los signos vitales.

- Gobierno. Aplicaciones urbanas se encargarán de informar sobre las condiciones de tráfico y estacionamiento con detectores de GPS que generarán notificaciones instantáneas e incluso supervisarán la calidad del aire y el agua de la ciudad. Las labores policiales se apoyarán en video-vigilancia con contexto que comunicará actividades inusuales. Los servicios civiles se adaptarán a cada persona, con la ayuda de sistemas públicos completamente integrados.
- Empresas. Las empresas tradicionales se servirán de modelos en la nube para vender capacidades como servicios totalmente independientes y diferentes a sus servicios normales. El porcentaje de teletrabajadores y nómadas digitales, sin un lugar de trabajo fijo, aumentará radicalmente, con la capacidad de trabajar y establecer videoconferencias en un dispositivo que puede conectarse en cualquier sitio.

La combinación de redes poderosas e inteligentes y aplicaciones y dispositivos innovadores hará surgir nuevas formas de dirigir el hogar, la empresa, la comunidad y la economía. Pero esto solo existirá si la posibilidad de generar el transporte de tal magnitud de ancho de banda esté disponible.

4.3. Conclusiones

- ROADM supera en capacidad de transporte debido a la capacidad de manejo de ancho de banda.

- ROADM se diversifica para brindar transporte a diferentes tipos de equipos de acceso.
- ROADM está un paso delante de la tecnología que actualmente se maneja en Guatemala, en los años venideros se explotara al máximo todos los beneficios que esta tecnología puede brindar.
- ROADM representa un costo de inversión grande en comparación con la inversión que se utilizaría en otras tecnologías para generar el mismo transporte de servicios, pero en las expansiones es donde ROADM genera grandes ahorros a las empresas de transporte.
- ROADM genera ahorro de inversión debido a que no se limita a longitudes metropolitanas, sino mas bien su alcance es regional, lo cual representa ahorro en costos por regeneración de señal.

5. APLICACIÓN DE ROADM

Teniendo una base sólida de conocimiento teórico de tecnología ROADM se puede pasar a la aplicación del mismo. Este será el tema de desarrollo en este capítulo.

5.1. Estudios de sitio

Los estudios de sitio (*site survey*) son necesarios para establecer las necesidades físicas para la implementación de equipos. Se puede decir que sin un estudio de sitio sería imposible determinar la inversión necesaria para implementar los equipos ROADM de una manera rentable y eficiente cumpliendo con los estándares apropiados. Los estudios de sitio son necesarios tanto para nuevas instalaciones, así como expansión de capacidad.

Un estudio de sitio se realiza mediante una visita previa a la instalación, en estas se determinan la dificultad de acceso al nodo o lugar donde se realizara la instalación. Esto para determinar el medio necesario para movilizar el equipo de manera que no se realice ningún daño no perceptible a la vista, y que se pueda ver reflejado en el funcionamiento incorrecto del equipo. De la misma forma se toma dato si existe proveedor de materiales eléctricos y materiales de construcción cerca del sitio.

5.1.1. Ejecución de estudio de sitio

Estando en el sitio cuando se busca realizar un estudio de sitio, se ejecutan los siguientes pasos:

- Inspección detallada del área:
 - Toma de fotos a detalle para posibles futuras consultas.
 - Toma de medidas detalladas, largo, ancho y altura de la sala.
 - Definir si el sitio cuenta con escalerillas necesarias, es decir una escalerilla para cada tipo de tendido (eléctrico, fibra óptica, cobre etc.)
 - Definir si la humedad del sitio es aceptable.
 - Definir la temperatura del sitio.
 - Definir si cuenta con aire acondicionado.

- Inspección detallada de alimentación de energía:
 - Definir si cuenta con planta propia o banco de baterías.
 - Definir si cuenta con espacio suficiente para la instalación de equipos o en su defecto espacio suficiente para la instalación de un *rack* nuevo.
 - Posiciones disponibles para energizado principal del equipo o en su defecto que es necesario para obtenerlas.
 - Definir si la relación consumo/capacidad de energía de donde se realizara la toma principal es suficiente para alimentar los equipos.
 - Definir ruta de cableados de toma principal.
 - Definir tipo de conductor y terminales necesarios para la toma de energía principal.
 - Posiciones disponibles para energizado de protección del equipo o en su defecto que es necesario para obtenerlas.
 - Definir si la relación consumo/capacidad de energía de donde se realizara la toma de protección es suficiente para alimentar los equipos.

- Definir ruta de cableados de toma de protección.
 - Definir tipo de conductor y terminales necesarios para la toma de energía de protección.
 - Definir si cuenta con barra de tierras.
 - Definir tipo de conductor y terminales necesarios para el aterrizaje de los equipos.
 - Definir ruta de cableado de tierra.
- Inspección detallada de interconexión de equipos:
 - Definir ruta de tendido de fibra entre equipos tributación y ROADM.
 - Definir distancia entre equipos tributarios y equipos ROADM.
 - Definir cantidad de fibras y tipos de conectores para la interconexión entre equipos.
 - Definir ruta de tendido de fibra entre equipos ROADM y ODF acceso.

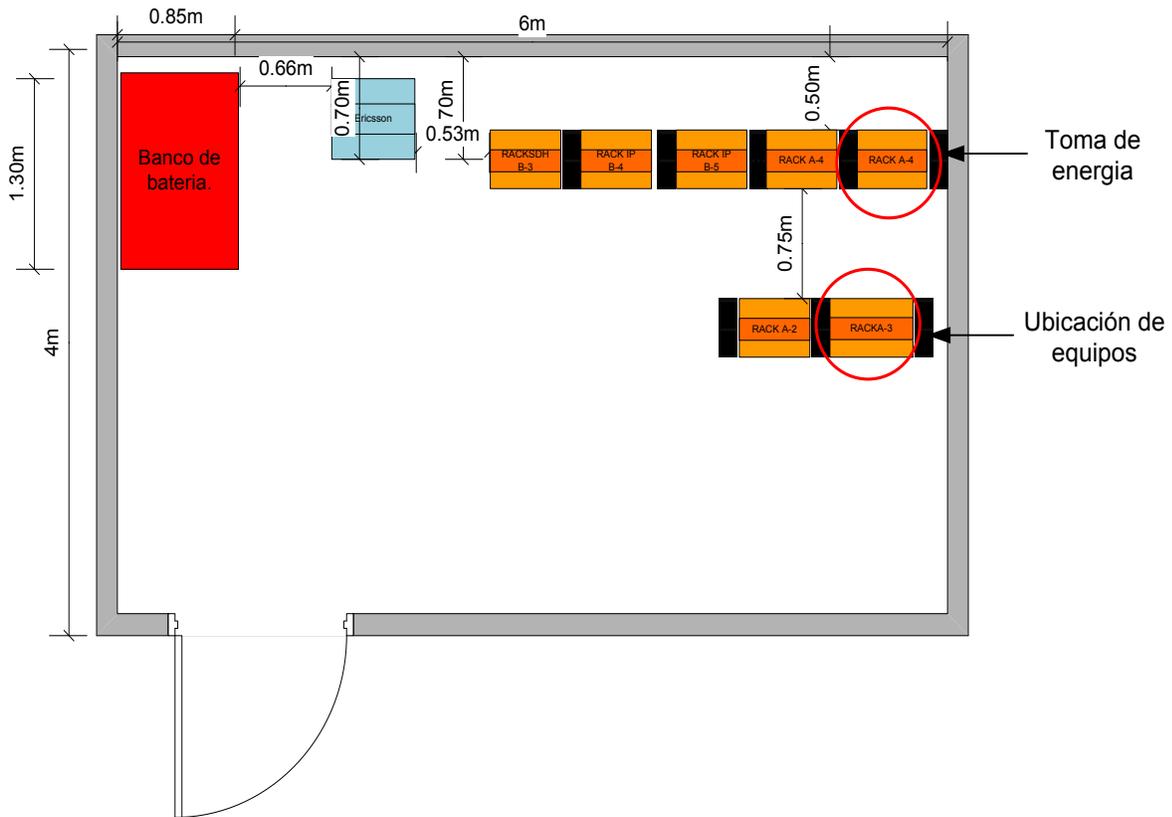
5.1.2. Resultados de un estudio de sitio

Una vez recaudada la información, se procede a la digitalización de la misma, esto con el objetivo de realizar una mejor planeación de la instalación, tal como la aprobación del sitio para la implementación es decir si cumple con los requisitos mínimos para la implementación, materiales necesarios y previsión de percances.

A continuación, se presentan ilustraciones de la digitalización de la información recaudada, siendo lo más importante:

- *Floor plan* del sitio: en este se muestra la propuesta de instalación de equipos de acuerdo al espacio disponible.

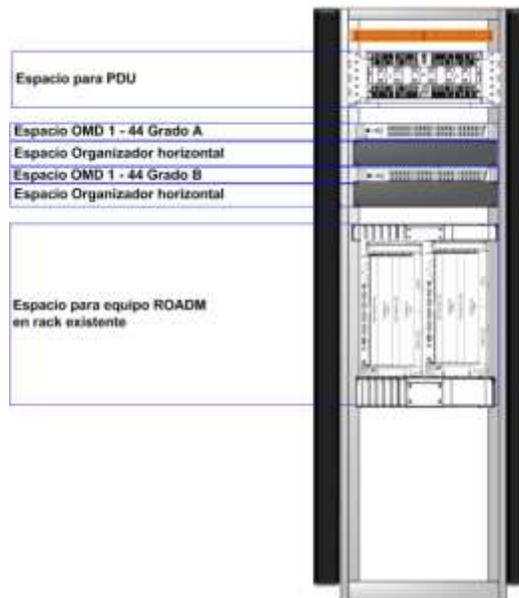
Figura 41. **Floor plan sitio a implementar ROADM**



Fuente: elaboración propia.

- Espacio disponible: se ilustra una propuesta o proyección de la instalación de los equipos, por medio del mismo se deberá respetar el orden presentado.

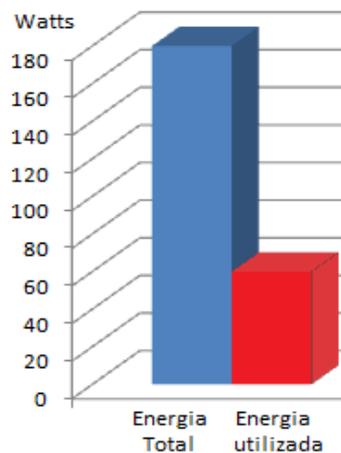
Figura 42. **Distribución de equipos en rack existente**



Fuente: elaboración propia.

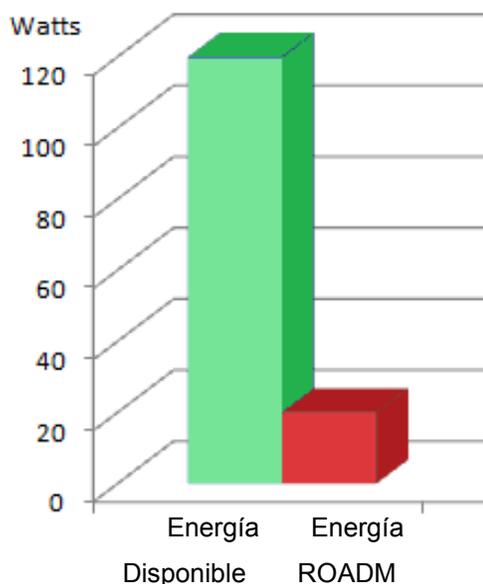
- Capacidad de alimentación de energía principal y de protección para el equipo.

Figura 43. **Comparación de energía total y energía utilizada**



Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Comparación de energía disponible y energía necesaria para ROADM**



Fuente: elaboración propia.

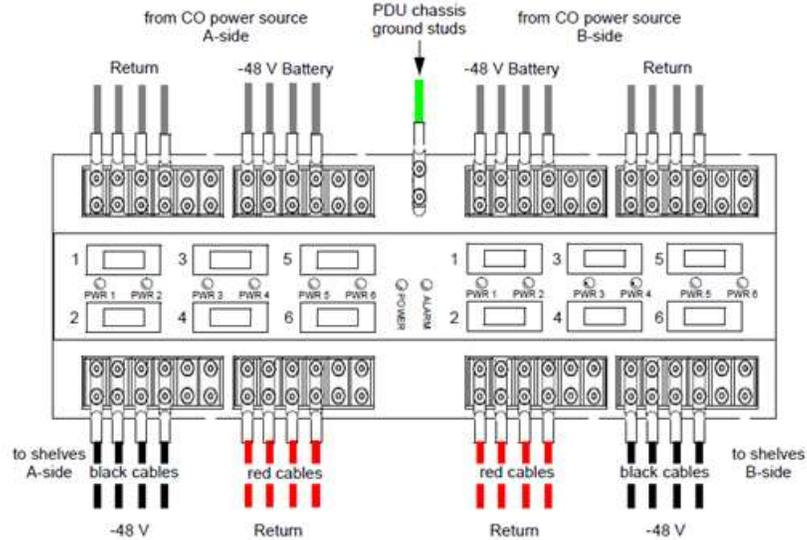
5.2. Armado y comisionamiento

Los equipos ROADM constan de partes principales tales como:

5.2.1. PDU (Power Distribution Unit)

Unidad de distribución de poder, la alimentación de energía principal y de protección se realiza hacia este. Luego se distribuye a los diferentes equipos ROADM que puedan necesitarse. El PDU cuenta con distribuciones principal y de protección además cuenta con su respectivo aterrizaje para protección de descargas. El PDU a su vez cuenta con *breakers* de igual forma principal y de protección para habilitar o deshabilitar todas las posiciones una a una.

Figura 45. **PDU (Power Unit Distribution) para ROADM**



Fuente: TELLABS, 7100 *Optical Transport System. 76.71NFP51/7, Rev B.* p. 132.

5.2.2. Chasis

El chasis es el componente donde se ensamblan todas las partes del equipo, tarjetas de control de gestión, tarjetas de tráfico, tarjetas de energía, tarjetas de protección etc.

Figura 46. **Chasis de ROADM**



Fuente: TELLABS, 7100 *Optical Transport System. 76.71NFP51/7, Rev B.* p. 87.

5.2.3. FAN

Es un dispositivo que produce flujo de aire, a menudo para el enfriamiento del equipo. Un FAN a menudo consta de varios dispositivos corriendo simultáneamente, la velocidad del FAN está controlada mediante el monitoreo de la temperatura del equipo, la cual es leída por la tarjeta de control del equipo. La ventaja de velocidad controlada es que en el momento de la falla de uno de los dispositivos realiza la compensación mediante el aumento de la velocidad en los dispositivos restantes.

Figura 47. Ejemplos de módulos FAN

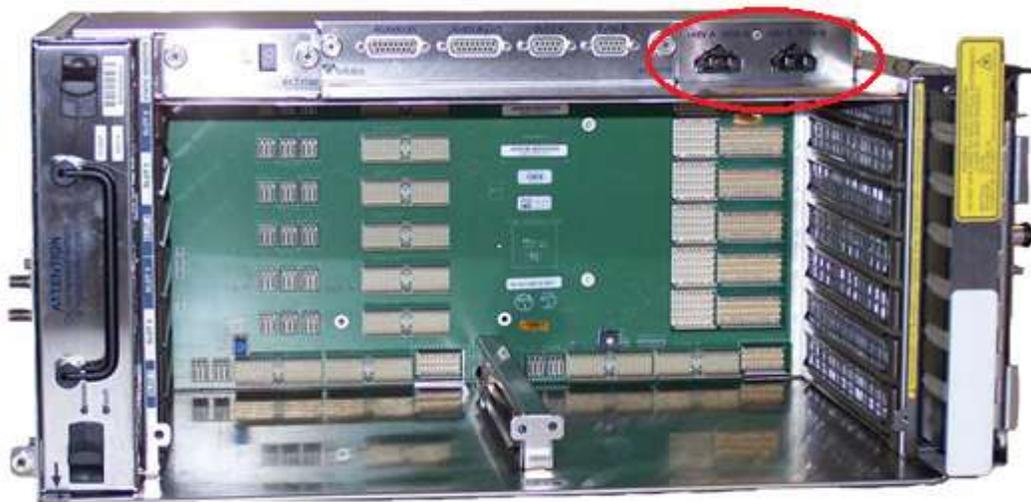


Fuente: TELLABS, Hardware Instalation Manual, MA261 / Revision C3. p. 74.

5.2.4. Fuente de poder (*Power Source*)

Todo equipo por seguridad cuenta con dos alimentaciones independientes de energía. La entrada de poder principal sostenida por la fuente de alimentación más estable y segura por ejemplo la alimentación directa del sitio la cual previamente rectificada es la cual tiene la menor probabilidad de fallo. Y la entrada de poder de protección será sostenida por otra fuente de alimentación de emergencia la cual puede ser generadores de energía eléctrica o bien un banco de baterías. Cada equipo también consta de su respectiva terminal de aterrizaje como protección contra descargas.

Figura 48. Fuentes de poder principal (A) y de protección (B)

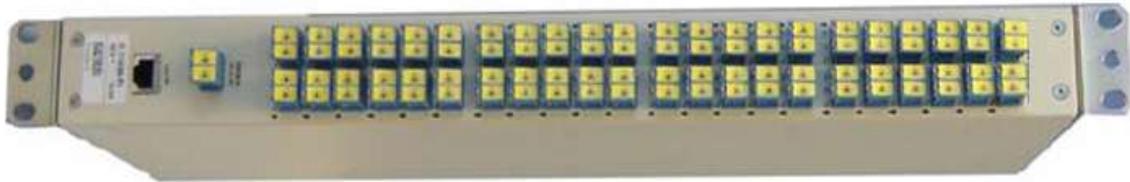


Fuente: TELLABS, 7170A Main Shelf and 7170B Port Shelf, 76.8107170A/B. p. 1

5.2.5. OMD (Multiplexor-Demultiplexor Óptico)

Un OMD es un dispositivo pasivo, es decir no necesita de ninguna alimentación de energía. El OMD es el encargado de multiplexar y demultiplexar las longitudes de onda mediante un arreglo de fibras que permite el llamado coloreo de cada una de las longitud de onda.

Figura 49. **Ejemplos de OMD**



Fuente: TELLABS, 7100 *Optical Transport System. 76.71NFP51/7, Rev B.* p. 107.

Estas son las partes principales que componen un equipo de ROADM, contando con todas las partes y también con los recursos de espacio y energía se procede a montarlo en el *rack* de la implementación.

5.2.6. OADM (Optical Add Drop Multiplexer)

En ROADM se denominaran a los enlaces ópticos entre equipos como grados. Los grados serán establecidos entre equipos ROADM por medio de fibras ópticas, a través de ellos se podrá levantar hasta 88 canales ópticos de hasta 10 Gigabits por segundo, o bien su equivalente en 1 STM-64.

Figura 50. **Ejemplo de OADM en ROADM**



Fuente: TELLABS, 7100 *Optical Transport System*. 76.71NFP51/7, Rev B. p. 62.

5.2.7. Unidades tributarias (Tribute Units)

Las unidades tributarias son transpondedor y se dedican a la recolección y distribución del tráfico en los grados, por medio de ellas se realiza el *add / drop* en cada sitio donde fuese necesario.

Físicamente son tarjetas que se insertan en determinados *slots* o unidades del chasis, existe una gran gama de tarjetas para soportar las necesidades de tráfico con respecto al tipo o tecnología, granularidad o capacidad. Existen tarjetas con la versatilidad para soportar tráfico de tecnologías y diferentes capas de servicio como SDH y Ethernet.

5.2.8. Comisionamiento

Debido a que en el idioma español no existe la palabra comisionamiento y que en la literatura técnica es común, la adaptación de palabras porque son de difícil traducción o porque abarcan conceptos técnicos exclusivos, se usará

como traducción de la palabra *commissioning* del inglés, que se define como el proceso sistemático para garantizar que los sistemas que conforman una nueva construcción ó proyecto, interactúen entre sí de acuerdo con la documentación originada en los procesos de planeación, diseño e implementación de los proyecto.

El comisionamiento debe verificar que tiene disponible los modos de operación necesarios y demuestra su capacidad para realizar la operación para la que fue diseñado, especifica sus condiciones iniciales de entrada en servicio, con lo que se inicia el historial de tal elemento. Los parámetros operacionales del equipo deben ser medidos para tener la caracterización completa del comportamiento del instrumento, inicialmente como elemento aislado o independiente (prueba en banco) así como su comportamiento integrado a la red de transporte.

El comisionamiento para un equipo ROADM se dará por bien finalizado al cumplir con los siguientes puntos:

- Instalación física del equipo cumpliendo con los estándares adecuados.
- Correcta interconexión de sus componentes.
- Correcto funcionamiento de todas sus tarjetas, y componentes.
- Versión actualizada de *software* en el equipo.

5.3. Instalación mecánica

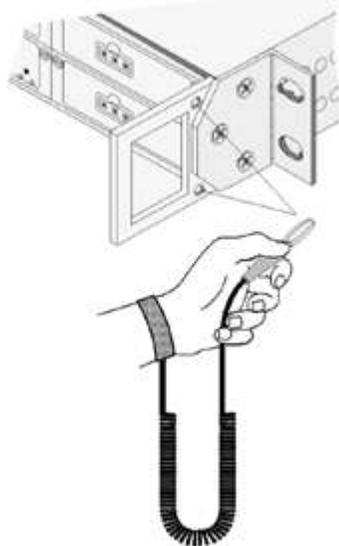
La instalación mecánica es la parte en la cual se ejecuta lo planificado en base al estudio de sitio. Una instalación en el sitio se da por finalizada cuando se llega a tener el equipo instalado, energizado, totalmente conectado y comisionado de tal forma que no haya necesidad de una nueva visita al sitio.

Se da por sentado que habrá espacio disponible en un *rack* existente, de manera tal que se procede a la instalación del equipo de acuerdo al estándar de instalación interno de la empresa u estándar entregado por la empresa cliente.

5.3.1. Montaje de equipo

Para realizar cualquier manipulación física en el equipo, se debe estar aterrizado, esto para evitar posibles descargas de energía electrostática almacenadas en el propio cuerpo, tal como se muestra en la siguiente figura. El montaje de equipo consiste en atornillar los equipos al *rack*, se debe de contar con la cantidad de tornillos necesaria para que no exista el riesgo de que el equipo pueda caerse, no se debe dejar ningún espacio en donde insertar un tornillo vacío, ya que el diseño de los equipos ha sido presamente para garantizar su montaje.

Figura 51. Aterrizaje de para manipulación de equipo



Fuente: TELLABS, Hardware Instalation Manual, MA261 / Revision C3. p. 23.

Figura 52. **Orificios para el montaje de equipos en rack**



Fuente: TELLABS, 7100 *Optical Transport System*. 76.71NFP51/7, Rev B. p. 11.

Un equipo ROADM totalmente montado en el *rack* debería lucir como en la siguiente figura:

Figura 53. **Equipo ROADM montado en rack ETSI**



Fuente: Cuarta central de TIGO en Fraijanes.

5.3.2. Aterrizaje de equipos

Todo equipo de telecomunicaciones y en general, debe estar aterrizado, es decir debe existir una conexión entre el equipo y la tierra física del sitio. Por lo general existe una barra de tierra máster en cada sitio. En otros sitios existe una armadura de tierra bajo piso falso por medio del cual se llega a cualquier parte de la sala. Esta conexión es necesaria para conducir las posibles descargas eléctricas provocadas por fallos de equipo hacia tierra, sin que pasen por el equipo y eviten dañarlo. Se debe realizar esta actividad antes de cualquier otra para una mejor protección del equipo.

Con el tendido de cable de tierra se debe de tener cuidado de no formar ángulos cercanos a los 90°. Y se debe de seguir la ruta más corta hacia la barra de tierra máster.

Figura 54. **Conexión de tierra física en equipo**



Fuente: Cuarta central de TIGO en Fraijanes.

Figura 55. **Conexión de tierra física en equipo**



Fuente: Cuarta central de TIGO en Fraijanes.

5.3.3. Tendido de energía

El tendido de energía consiste en conducir el cable físico entre los equipos ROADM y los distribuidores de energía. Se debe considerar que para todo energizado hay tomar dos rutas (si fuera posible), una para la energía principal y otra ruta diferente para la energía de protección.

Esto debido a que si por alguna razón existiera un sobrecalentamiento de calves debido a un corto circuito o un fenómeno parecido, el daño se vea reflejado únicamente en el daño de una de las dos rutas.

Los cables deberán tenderse de manera ordenada o como se le llama comúnmente peinados de manera tal que no obstruyan el paso de otros tendidos de cable, y ocupen el menos espacio posible en las escalarias.

Los tendidos de cables deberán de contar con una pequeña holgura que sea lo suficientemente grande para poder ingresar algún otro cable o alguna actividad parecida, pero lo que no lo sea tanto como para ocupar espacio que pueda ser utilizado para cableados de otros equipos.

Figura 56. **Peinado de cables de energía**



Fuente: Cuarta central de TIGO en Fraijanes.

5.3.4. Limpieza y tendido de fibra

Con tecnología ROADM, se debe tener especial cuidado con la limpieza de fibras, la limpieza de fibras se debe realizar antes de conectar a cualquier puerto del equipo, esto debido a que si la fibra se encuentra sucia puede ser trasladada al puerto, de igual forma todos los puertos deben ser revisados previos a conectar cualquier fibra.

Para la limpieza de fibra se necesita un *kit* especial de limpieza tal como el que se muestra en la siguiente figura. Además se necesita un hardware especial y *software* controlador para certificar la limpieza correcta de las fibras y

puertos. Este *software* analiza y certifica la limpieza de fibra por medio del análisis de su núcleo y una considerable área circular alrededor del mismo. El *software* rechazara cualquier fibra o puerto que contenga alguna impureza.

Figura 57. **Kit de limpieza de fibras ópticas y puertos ópticos**



Fuente: www.fibraopticahoy.com/kits-de-limpieza-para-conectores/.com/. Consulta: 30 de mayo de 2012.

Figura 58. **Curvatura correcta de fibras ópticas**



Fuente: Cuarta central de TIGO en Fraijanes.

Los tendidos de fibra se deberán de realizar con fibras que sean de la longitud más cercana a la distancia necesaria. Además se deberá de tener mucha precaución con los diámetros de circunferencia que puedan formarse debido a la necesidad de retornos en los tendidos de fibra, ya que un diámetro demasiado pequeño se vería reflejado en atenuación en los niveles ópticos de los enlaces.

5.4. Pruebas de aceptación

Para que el equipo se de de alta, o se de cómo aceptado su correcta instalación y funcionamiento, es necesario cumplir con una serie de pruebas físicas y lógicas para dar por certificado su correcto funcionamiento, y de esta forma evitar posibles fallas cuando el equipo este transportando tráfico.

Las pruebas que se realizan para los equipos ROADM son las siguientes:

- Pruebas de aceptación de sitio.
- Pruebas de aceptación de red.
- Pruebas de análisis de espectro óptico (*Optical Spectrum Analyzer - OSA*).

5.4.1. Pruebas de aceptación de sitio

Con estas pruebas se certifica lo siguiente:

- Validación de la correcta instalación del equipo.
- Validación del correcto funcionamiento del equipo.
- Confirmación de que el equipo está listo para agregarse a la red.
- Validación de energía:
 - Verifica la correcta conexión de energía.
 - Verifica niveles de voltajes.
 - Verificación de correcto funcionamiento de energía principal y de protección.
- Actualización de *software*.
- Validación de la medición manual de los grados.
- Validación de todos los cableados y tendidos de fibra internos.
- Validación de canales ópticos.
- Validación de niveles ópticos adecuados en cada lambda.

5.4.2. Pruebas de aceptación de red

Con estas pruebas se certifica lo siguiente:

- Validación de la conectividad y comunicación de la red.

- Validación de los niveles ópticos adecuados para cada grado en cada sitio.
- Validación de los niveles ópticos entre todos los sitios de la red.
- Validación de correcto transporte de tráfico mediante la ejecución de una prueba de medición de *bits* errados.
- Validación de reporte de alarmas mediante fallas provocadas.

5.4.3. Pruebas de análisis de espectro óptico

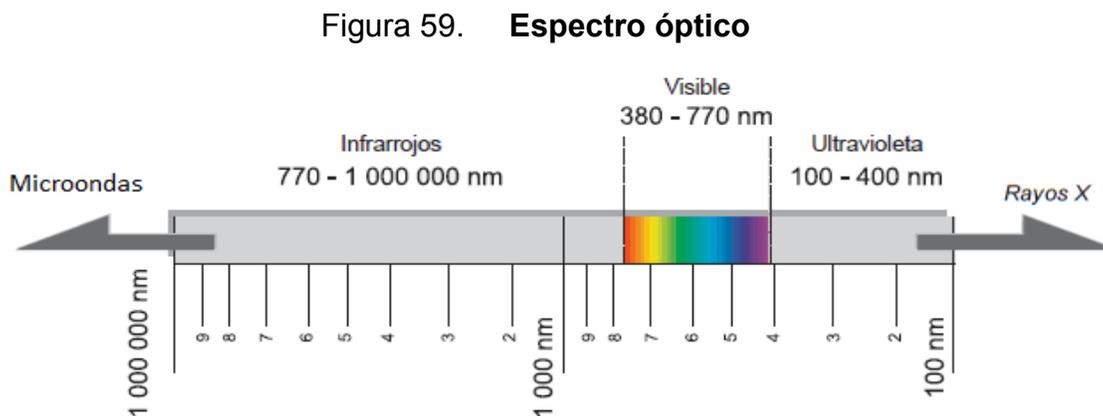
Este análisis consiste en medir la potencia óptica con que llegan de un punto a otro todas y cada una de las lambdas, esto debido a que a lo largo de un enlace de fibra pueden existir eventos, estos eventos pueden verse reflejados en la atenuación de la potencia óptica del enlace, pero también pueden no verse reflejados y afectar únicamente a algunas lambdas del espectro.

Para analizar las portadoras individuales se requiere de analizadores de espectros ópticos con resoluciones por debajo de 1 nanómetros. En las instalaciones más avanzadas, la separación entre portadoras va de 0,8 nanómetros (100 Gigahertz de espaciado de canal) a 0,2 nanómetros (25 Gigahertz).

El aumento de la capacidad de transmisión es imparable, de hecho siempre ha sido así a lo largo de la historia, pero en la actualidad se ha disparado vertiginosamente. El ritmo de crecimiento de la capacidad de transmisión se multiplica por diez cada cuatro años. Esto significa que dentro de ocho años la capacidad de transmisión requerida por las redes troncales podría superar los 100 *Terabits* por segundo.

Actualmente, en el ámbito experimental, se están llevando a cabo ensayos de sistemas de enlaces ópticos a decenas de *Terabits* por segundo a distancias de miles de kilómetros utilizando fibras especiales que reducen los efectos no lineales, nuevos amplificadores ópticos y por supuesto técnicas WDM (ultra DWDM). El análisis espectral para estos sistemas es ya un requisito tan necesario como lo es para otros medios de transmisión como el coaxial o el aéreo que utilizan frecuencias de UHF o microondas.

Las primeras transmisiones en fibra óptica utilizaban luz a 850 nanómetros, luego se pasaron a 1300 nanómetros y posteriormente a 1550 nanómetros buscando mínimas pérdidas en la transmisión. Los sistemas WDM actuales trabajan en banda C y L (1530-1610 nanómetros) pero ya se están desarrollando fibras que trabajen en cuarta ventana (1625 nanómetros). En la siguiente figura se muestra una ilustración del espectro óptico.



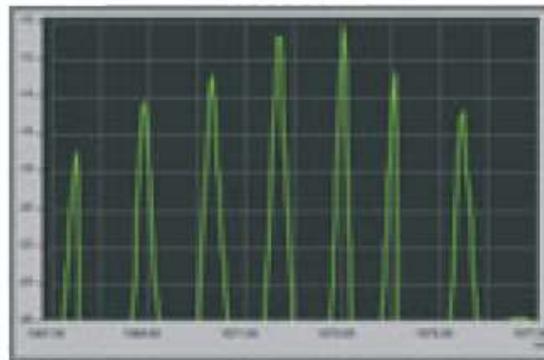
<http://www.promax.es/esp/news/extdnew.php?text=52>. Consulta: 20 de febrero de 2012.

La tendencia, forzada por la necesidad de aumentar al máximo la capacidad de transmisión, es la de utilizar cada vez mayor parte del espectro óptico. En este sentido ya se están fabricando fibras ópticas que minimizan las pérdidas debidas a la absorción de las moléculas de agua en el entorno de

1470 nanómetros de manera que también sea posible utilizar esta banda (quinta ventana).

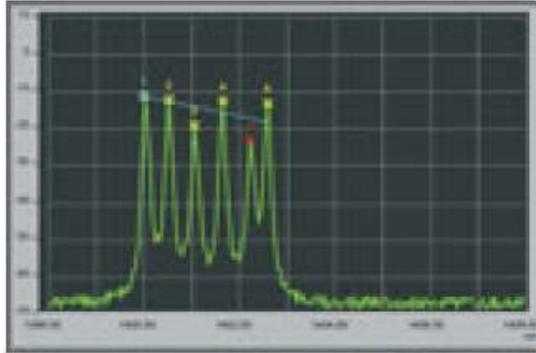
De hecho en la actualidad la banda utilizada por las fibras ópticas está creciendo para poder cubrir las exigencias de aumento de la capacidad de transmisión. Muy posiblemente en un futuro habrá que saltar a zonas del espectro electromagnético con mucha mayor capacidad de transmisión, hacia las longitudes de onda inferiores a la luz visible (ultravioleta, rayos X.), lo cual permitiría dar un salto astronómico en cuanto a la capacidad de transmisión. Las fibras actuales no permiten la transmisión de estas longitudes de onda puesto que las pérdidas serían altísimas a estas longitudes. Quizás en el futuro se descubran nuevos materiales que puedan conducir esa radiación.

Figura 60. **Espectro de un sistema WDM**



<http://www.promax.es/esp/news/extdnew.php?text=52>. Consulta: 20 de febrero de 2012.

Figura 61. **Medida de un sistema WDM**



<http://www.promax.es/esp/news/extdnew.php?text=52>. Consulta: 20 de febrero de 2012.

CONCLUSIONES

1. ROADM se instala como el transporte de servicios de telecomunicaciones por excelencia en la actualidad debido a que soporta protocolos de capas superiores, siendo una tecnología inteligente de capa 1.
2. La tecnología ROADM con características híbridas entre tecnologías, promueve un cambio de tecnología de TDM hacia IP paulatino, de manera que permite a las empresas proveedoras de servicio absorber los costos de equipo lentamente.
3. Genera recorte de gastos inmediatos por medio de la utilización en el caso de compra y esencialmente en renta de fibra óptica, por la capacidad de transporte en un solo par de hilos de fibra.
4. Una red construida con tecnología ROADM minimiza costos de inversión y recuperación de la misma en plazos relativamente pequeños.
5. ROADM permitirá la ejecución de redes FTTH con servicios de banda ancha en hogares, empresas, instituciones y usuarios telefónicos, gracias a la capacidad de la multiplexión de sus lambdas y la capacidad de transporte de las mismas.
6. La evolución de la red a lo largo de la próxima década no sólo facilitará el desarrollo de nuevos productos y servicios, sino que además creará puestos de trabajo.

RECOMENDACIONES

1. En este trabajo se realizó un repaso de las fortalezas de tecnologías como MPLS, DWDM y SDH, pero realizar un análisis detallado de las debilidades y limitantes sería demasiado extenso, se sugiere realizar lecturas externas para comprender un poco más de este tema.
2. Realizar un estudio acerca de la implementación de equipos ROADM, esto porque hasta hoy en día, únicamente expertos en materia pueden realizar estas instalaciones en Guatemala.
3. Los proveedores de servicios y/o carriers deben considerar el uso ROADM como un medio de comparación con los beneficios obtenidos con el resto de redes de transporte.
4. Crear una biblioteca personal de temas relacionados con ROADM, cualquier información puede resultar ser muy valiosa para el desarrollo de las carreras profesionales como ingenieros.
5. Realizar una investigación de las ventajas que proporciona implementar una red ROADM en topología *full mesh*, de esa forma se podrán comprender de mejor forma la función de *control plane* de estos equipos.

BIBLIOGRAFÍA

1. DAVIE, Bruce S. *MPLS technology and applications*. 3a ed. Estados Unidos: Reviews, 2000. 450 p.
2. Fujitsu Network Communications. *DWDM TUTORIAL*, Tokio: Fujitsu Network Communications, 2002. 54 p.
3. GUMASTE, Ashwin. *Introduction to DWDM for Metropolitan Networks*. 2a ed. Estados Unidos: Cisco Press, 2002. 346 p. ISBN 1-58705-074-9.
4. *Normas ITUT*. [en línea]. [ref. 5 de febrero de 2011] Disponible en Web: <<http://www.itu.int>>.
5. Optical Spectrum Analyzer. *Analyze it all: WDM. EDFA*. [en línea] www.exfo.com/FTB-5240S/BP. [Consulta: 14 de noviembre de 2009].
6. *Optical Transport System*. [en línea]. [ref. 14 de octubre de 2010] Disponible en Web: <www.portal.tellabs.com/>.
7. PEPELNJAK, Ivan. *MPLS and VPN Architectures*. vol 2. Estados Unidos: Cisco Press, 1990. 344 p.
8. RAMASWAMI, Rajiv. *Optical Networks: a practical perspective*. 2a ed. Estados Unidos: David Clark, 2002. 459 p.

9. Recomendaciones del sector de telecomunicaciones de la UIT. *Informes de conferencias de desarrollo y conferencias plenipotenciarias de la UIT*. Ginebra, Suiza: Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2003. 67 p.
10. ROADM *Components*-2008. Estados Unidos 2008. [en línea]. <www.igrou.com/>. [Consulta: 17 de julio de 2011.]
11. RONGQING, Hui; O'SULLIVAN, Maurice. *Fiber optic measurement techniques*. Estados Unidos: Elsevier, 2009. 88 p.
12. STERLING, Donald. *Technician's guide to fiber optics*. 2a ed. Estados Unidos: Delmar Publishers, 1993. 816 p.
13. STREMLER, Ferrel G. *Introduction to communication systems. s.1*. 3a ed. Estados Unidos: Addison-Wesley Iberoamerica, 1993. 145 p.
14. _____. *Tellabs 6340 FP4.0 / 6345 / 6350 Nodes in Tellabs 8100 System: Manual training course*. Rev 2011-2-34. Estados Unidos: Addison-Wesley, 2008. 68 p.
15. _____. *Tellabs 7100 Nodes in Tellabs 8100 System. Manuals training course*. Rev. 20010-2-22. Estados Unidos: Addison-Wesley, 2011. 104 p.
16. WARREN, E. *When WDM makes sense in the access network: an economic analysis, JDS Uniphase White Paper*. Estados Unidos: Scope, 1999. 356 p.