

**CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UNA RED
DE PAQUETES IP SOBRE UNA RED OPTICA DWDM
(IPoDWDM)**



**LIZ HARIETH MORA SAAVEDRA
JORGE ARMANDO GIRÓN SALAZAR**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICAIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES - GNTT
Popayán
2003**

**CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UNA RED
DE PAQUETES IP SOBRE UNA RED OPTICA DWDM
(IPoDWDM)**

**LIZ HARIETH MORA SAAVEDRA
JORGE ARMANDO GIRÓN SALAZAR**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICAIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES - GNTT
Popayán
2003**

**CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UNA RED
DE PAQUETES IP SOBRE UNA RED OPTICA DWDM
(IPoDWDM)**

**LIZ HARIETH MORA SAAVEDRA
JORGE ARMANDO GIRÓN SALAZAR**

Trabajo de Grado presentado como
requisito parcial para optar al título de
Ingeniero en Electrónica y
Telecomunicaciones

**Director:
Jose Giovanni López Perafán
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICAIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES - GNTT
Popayán
2003**

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a Sandra Lorena Palacios y Luis Fernando Sánchez, Ingenieros en Electrónica y Telecomunicaciones, por su valiosa colaboración y dedicación hacia nosotros para completar con éxito este trabajo.

También agradecemos a nuestras familias y amigos por su apoyo incondicional en la consecución de nuestras metas.

Con amor a mi madre

Liz Harieth

**A Dios Todopoderoso,
Gran amigo que guía mi camino en la vida.
A María Teresa, mi abuela,
Por todo su empuje, su colaboración y su amor.
A Jaime Alberto, mi tío,
Por sus enseñanzas, consejos y su cariño desmedido.
A Jorge, mi padre,
Por su paciencia y mi educación.
Y a Elsa, mi madre,
Por toda su fuerza, su espíritu y su amor incondicional**

Jorge Armando

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las necesidades que experimentan las redes de transmisión de información están basadas en el transporte de voz y datos a mayores velocidades, pero su crecimiento va aumentando exponencialmente en todo el mundo, notándose sin duda una mayor tendencia en la transmisión de datos. Asimismo, la cantidad de usuarios conectados aumenta rápidamente y esto ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías que satisfacen los requerimientos de nuevos servicios y aplicaciones multimediales con entrega en tiempo real, pero anteponiendo siempre la eficiencia, economía y flexibilidad a las innovadoras soluciones.

Paralelamente, la fibra óptica aparece como el medio de transmisión de información más eficiente para satisfacer esta demanda de ancho de banda, debido a sus principales características, como: baja atenuación, alta capacidad de transmisión, inmunidad a la interferencia electromagnética y alta confiabilidad.

Bajo estas dos perspectivas, se plantea un objetivo final que es la implementación de una red que integre todas estas características. La solución que se perfila como la mejor alternativa para alcanzar lo anteriormente planteado es la implementación de la nueva tecnología Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa, (DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing) que permite transmitir eficientemente la información sobre múltiples longitudes de onda en una misma fibra óptica, en conjunto con el protocolo IP (Internet Protocol), que aparece como la plataforma más importante para el transporte de datos por la red, cualquiera que sea la naturaleza de la fuente.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, se realizó un documento que pretende desarrollar unos criterios para diseñar redes de transporte de paquetes IP sobre redes ópticas DWDM.

Para ello se realizó inicialmente un estudio del estado actual de las redes ópticas, su desempeño frente a la necesidad creciente de Ancho de Banda y las posibles soluciones ante este problema.

Seguidamente, se plantea el funcionamiento del transporte IP sobre redes ópticas, y las ventajas que ofrece DWDM para este fin.

Con la información y el análisis alcanzado se desarrollaron una serie de criterios para el diseño de redes IPoDWDM, el cual contiene la definición y desarrollo de los criterios que se deben tener en cuenta para el diseñar una red transporte de IP basado en la tecnología DWDM.

La aplicación de estos criterios se ve reflejada posteriormente, en el diseño de una red IPoDWM para un área metropolitana de la ciudad de Bogotá.

Finalmente se plantean una serie conclusiones y recomendaciones, que son el resultado de todo el análisis y desarrollo del documento, las cuales se espera que sean de gran aporte para el estudio y aplicación de redes de este tipo.

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	1
1. ESTUDIO DE LAS REDES ÓPTICAS Y LA NECESIDAD DE ANCHO DE BANDA	2
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 MODELOS DE REDES ÓPTICAS.....	4
1.3 ANÁLISIS DE LAS OPCIONES DE TRANSPORTE MAS IMPLEMENTADAS ACTUALMENTE POR OPERADORES DE TELECOMUNICACIONES	10
1.3.1 IP sobre ATM (IPoATM)	10
1.3.2 IP sobre ATM sobre SDH sobre óptico	13
1.3.3 IP sobre SDH (IPoSONET/SDH)	15
1.3.4 IP sobre óptico.....	16
1.4 MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA DENSA – DWDM (DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING).....	16
1.4.1 ¿ Por qué DWDM?	17
1.4.2 Funciones del sistema DWDM.....	18
1.4.3 Componentes y operación.....	19
2. ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE IP SOBRE REDES ÓPTICAS DWDM.....	20
2.1 INTRODUCCIÓN	20
2.2 ESTANDARIZACIÓN DEL PLANO DE CONTROL EN REDES ÓPTICAS.....	21
2.2.1 ASON (AUTOMATIC SWITCHED OPTICAL NETWORK), Redes Ópticas de Conmutación Automática	21

2.2.2	GMPLS, MPLS (Multiprotocol Label Switching) Generalizado	27
2.2.3	El OIF - Optical Internetworking Forum	29
2.3	GMPLS	30
2.3.1	Evolución de MPLS hacia GMPLS	30
2.3.2	Adaptaciones a MPLS	32
2.3.3	Tipos de conmutación y jerarquía LSP (Label Switching Path)	33
2.3.4	Gestión de Enlaces	42
2.3.5	Señalización Generalizada	45
2.3.6	Técnicas de Protección y Restauración en GMPLS	49
2.4	IMPLEMENTACIÓN DE GMPLS PARA EL TRANSPORTE DE IP EN REDES ÓPTICAS	53
2.4.1	Modelo de Red	53
2.4.2	Modelos de Servicio IP sobre redes ópticas	57
2.4.3	Modelos de Interconexión para el transporte de IP sobre redes ópticas	59
3.	DESARROLLO DE CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE REDES IPoDWDM	62
3.1	CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO	62
3.1.1	Planeación de Capacidad	62
3.1.2	Matriz de tráfico	62
3.1.3	Migración de redes	64
3.2	TOPOLOGÍAS FÍSICAS DE RED	66
3.2.1	Topologías punto a punto	66
3.2.2	Topologías en anillo	66

3.2.3	Topologías en malla.....	67
3.2.4	Topologías híbridas.....	68
3.3	CRITERIOS DE FUNCIONAMIENTO DE RED.....	69
3.3.1	Topología lógica de red.....	69
3.3.2	Determinación del Modelo de Control.....	69
3.3.3	Esquema de Direccionamiento.....	72
3.3.4	Enrutamiento.....	73
3.3.5	Señalización.....	74
3.3.6	Interconexión de redes ópticas.....	76
3.3.7	Esquemas de protección y seguridad lógica de red.....	76
3.4	CRITERIOS EN LOS DISPOSITIVOS FISICOS Y EL MEDIO DE TRANSMISIÓN.....	78
3.4.1	Fibra Óptica.....	79
3.4.2	Equipos.....	90
3.4.3	Calidad en la transmisión de Redes Ópticas.....	102
4.	DISEÑO DE UNA RED IPoDWDM.....	105
4.1	PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO (Requerimientos).....	105
4.2	DESARROLLO DEL DISEÑO.....	106
4.2.1	Planeación de Capacidad.....	106
4.2.2	Matriz de Tráfico.....	107
4.2.3	Facilidades para la migración de redes.....	112
4.2.4	Definición de la topología física de red.....	113

4.2.5	Definición de la topología lógica de red	114
4.2.6	Determinación del Modelo de Control de Red.....	115
4.2.7	Selección del Esquema de Direccionamiento	115
4.2.8	Selección del Protocolo de Enrutamiento	115
4.2.9	Selección del Protocolo de Señalización	116
4.2.10	Interconexión de redes ópticas.....	116
4.2.11	Selección de los esquemas de protección y seguridad de red	117
4.2.12	Selección del medio de transmisión de red	117
4.2.13	Selección de equipos de red	118
4.3	ANÁLISIS DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN.....	121
4.3.1	Costo de fibra óptica.....	122
4.3.2	Costo de equipos de red	122
4.3.3	Costo total aproximado de realización del proyecto	123
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	126
	BIBLIOGRAFÍA	129
	GLOSARIO	136

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1. Simplicidad del modelo de capas	4
Figura 1.2. Ejemplo de topología física y virtual (un hipercubo de 16 nodos).....	5
Figura 1.3. Diferentes Arquitecturas de capas.....	6
Figura 1.4. Las capas de una Red IP sobre ATM sobre una red óptica DWDM	10
Figura 1.5. Topología física ATM y topología lógica IP superpuesta.....	11
Figura 1.6. Modelo funcional IP sobre ATM	12
Figura 1.7. Espectro de longitudes de onda de sistemas DWDM en banda C (1550 nm).....	17
Figura 1.8. Esquema Funcional DWDM	18
Figura 1.9. Componentes de la Red DWDM	19
Figura 2.1. Evolución tecnológica de las redes actuales.	20
Figura 2.2. Relación entre los componentes de la arquitectura ASON	22
Figura 2.3. Arquitectura Global ASON	24
Figura 2.4. Esquema general de una red óptica DWDM con un plano de control común basado en GMPLS	30
Figura 2.5. Funcionamiento de una red MPLS	31
Figura 2.6. Jerarquía de LSPs.....	35
Figura 2.7. Esquema de nubes según la jerarquía de LSPs.....	35
Figura 2.8. Estructura de la cabecera genérica MPLS.....	36
Figura 2.9. Identificación de un enlace no numerado	39
Figura 2.10. El enrutador de frontera debe saber sobre los enlaces.....	39
Figura 2.11. Modelo de interconexión de redes ópticas.....	54
Figura 2.12. Interfaz Directa	56
Figura 2.13. Arquitectura basada en OADMs/OXCs para el modelo "peer"	60
Figura 2.14. Modelo Peer.....	60
Figura 2.15. Arquitectura basada en OADMs/OXCs para el modelo "overlay"	61

Figura 2.16. Modelo Overlay	61
Figura 3.1. Ejemplo de topología en anillo.....	66
Figura 3.2. Ejemplo de topologías híbridas formando una sola red en malla	68
Figura 3.3. Modelo de señalización de servicios unificados.....	70
Figura 3.4. Modelo de señalización de dominio de servicio.....	71
Figura 3.5. Dimensionamiento de factores críticos en sistemas WDM.....	79
Figura 3.6. Atenuación en función de la Longitud de onda	81
Figura 3.7. Principio de dispersión	82
Figura 3.8. Pendientes de la dispersión cromática en función de la longitud de onda.....	83
Figura 3.9. PMD –Dispersión por Modo de Polarización.....	84
Figura 3.10. Efectos de no linealidad a altos niveles de potencia	85
Figura 3.11. Creación de señales indeseadas dentro del rango espectral de transmisión debida a FWM.....	86
Figura 3.12. OADM reconfigurable basado en conmutadores NxN	98
Figura 3.13. Diagrama funcional del EDFA	100
Figura 4.1. Ubicación de nodos de red en la ciudad de Bogotá.....	106
Figura 4.2. Topología física de red.....	113
Figura 4.3. Topología lógica de red.....	114

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1.1. Fortalezas y debilidades de tecnologías de transporte.....	9
Tabla 1.2. Comparación de las Tecnologías de Transporte.....	10
Tabla 3.1. Comparación entre CR-LDP y RSVP-TE.....	75
Tabla 3.2. Cuadro Resumen de factores a evaluar en el diseño de sistemas de fibra óptica.....	89
Tabla 4.1. Conexiones de video en tiempo real entre dos nodos de la red.....	108
Tabla 4.2. Longitudes de onda necesarias para la transmisión de video en tiempo real entre dos nodos de la red	108
Tabla 4.3. Conexiones de datos en tiempo real entre dos nodos de la red	109
Tabla 4.4. Longitudes de onda necesarias para la transmisión de datos entiem po real entre dos nodos de la red	109
Tabla 4.5. Conexiones de voz entre dos nodos de la red	110
Tabla 4.6. Longitudes de onda necesarias para la transmisión de.....	110
Tabla 4.7. Conexiones de información no crítica entre dos nodos de la red	111
Tabla 4.8. Longitudes de onda necesarias para la transmisión de Información no crítica entre dos nodos de la red	111
Tabla 4.9. Longitudes de onda necesarias para el transporte	112
Tabla 4.10. Costo aproximado de instalación de fibra óptica para la red propuesta	122
Tabla 4.11. Costo aproximado de equipos para la red propuesta.....	123
Tabla 4.12. Costo aproximado total de realización del proyecto.....	123

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las necesidades que experimentan las redes de transmisión de información están basadas en el transporte de voz y datos a mayores velocidades, su crecimiento va aumentando exponencialmente en todo el mundo, notándose sin duda una mayor tendencia en la transmisión de datos. La cantidad de usuarios conectados aumenta rápidamente y esto ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías que satisfacen los requerimientos de nuevos servicios y aplicaciones multimediales en tiempo real, pero anteponiendo siempre la calidad, eficiencia, economía y flexibilidad a las innovadoras soluciones.

Paralelamente, la fibra óptica aparece como el medio de transmisión de información más eficiente para satisfacer esta demanda de ancho de banda, debido a sus principales características, como: baja atenuación, alta capacidad de transmisión, inmunidad a la interferencia electromagnética y alta confiabilidad.

Bajo estas dos perspectivas, se plantea una red que integre todas estas características. La solución que se perfila como la mejor alternativa es la implementación de la tecnología de Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa, (DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing) que permite transmitir eficientemente la información sobre múltiples longitudes de onda en una misma fibra óptica, en conjunto con el protocolo IP (Internet Protocol), que aparece como la plataforma más importante para el transporte de datos por la red, cualquiera que sea la naturaleza de la fuente.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, se realizó un documento que desarrolla unos criterios para diseñar redes de transporte de paquetes IP sobre redes ópticas DWDM.

Para ello se hizo un estudio del estado actual de las redes ópticas, su desempeño frente a la necesidad creciente de Ancho de Banda y las posibles soluciones ante este problema.

Seguidamente, se planteó el funcionamiento del transporte IP sobre redes ópticas, y las ventajas que ofrece DWDM para este fin.

Con la información y el análisis alcanzado se desarrollaron una serie de criterios para el diseño de redes IPoDWDM, que se plantean como una guía que se debe tener en cuenta para diseñar una red transporte de IP basado en la tecnología DWDM.

La aplicación de estos criterios se ve reflejada posteriormente, en el diseño de una red IPoDWDM para el área metropolitana de la ciudad de Bogotá.

Finalmente se presentó una serie conclusiones y recomendaciones, que son el resultado de todo el análisis y desarrollo del documento, las cuales se espera que sean de gran aporte para el estudio y aplicación de redes de este tipo.

CAPITULO 1. ESTUDIO DE LAS REDES ÓPTICAS Y LA NECESIDAD DE ANCHO DE BANDA

1.1 INTRODUCCIÓN

Internet ha propiciado una tendencia hacia el desarrollo de redes basadas en IP, el cual se ha ido convirtiendo en un estándar de facto. Esto provocó un incremento del tráfico de datos hasta llegar al punto de superar al de la voz en considerables proporciones, lo que esta induciendo a que la arquitectura de red pase de un modelo con inteligencia centralizada en el núcleo, propio de la red telefónica conmutada, a un modelo donde la inteligencia reside cada vez más en los extremos o se encuentra distribuida.

Estos cambios son el reflejo de la necesidad de capacidad para transportar nuevos y mejores servicios. En las primeras etapas, la transmisión se realizaba sobre anchos de banda reducidos y a bajas velocidades de transferencia, hasta llegar a las actuales redes que hablan de velocidades cercanas a los terabits (10^{12} bits) y petabits (10^{15} bits) por segundo. Estas elevadas velocidades son aprovechadas cada vez con más eficiencia por los usuarios finales, debido a la progresiva mejora en prestaciones y costos conseguidos en las redes de acceso.

Tal incremento de velocidad, junto con el aumento del número de usuarios que hacen uso de estas redes de datos, está obligando a los operadores de red a cambiar su infraestructura, migrando hacia tecnologías que ofrezcan las garantías necesarias para subsistir en un mercado donde los nuevos servicios, la calidad de estos, y los bajos costos son factores decisivos para mantener y atraer nuevos clientes.

La arquitectura de las redes se basa actualmente en un modelo de capas, que si bien puede compararse al modelo propuesto por la Organización Internacional de Estandarización (ISO, International Standar Organization), el cual ha sido el estándar a nivel mundial desde hace décadas, es el resultado de la combinación de diferentes tecnologías que cada operador ha ido adaptando acorde a sus necesidades, generando una amplia gama de alternativas para las redes de transporte. Esto trajo consigo la creación de una nueva capa dentro de esta jerarquía, la llamada capa óptica, que apareció ante la aceptación de la fibra óptica como medio de transmisión de información masivo, gracias a sus evidentes ventajas frente a otros medios en el transporte de grandes flujos de información.

Dentro de estas redes de transporte óptico se pueden distinguir dos generaciones. La primera, donde la fibra óptica solo funciona como medio de transmisión, mientras que el encaminamiento y la conmutación se realizan en el dominio eléctrico; una segunda generación, en la que además de emplear la fibra como medio de transmisión, se busca que la conmutación y el encaminamiento sean realizados en el dominio óptico, añadiendo

una nueva dimensión (procesamiento analógico de la señal) que ofrece nuevas soluciones a las crecientes necesidades del mercado.

Las redes ópticas de primera generación son esencialmente "tubos" de velocidades fijas, donde el aprovisionamiento de un circuito toma un tiempo relativamente largo, cuando es comparado al tiempo de establecimiento de circuito para telefonía tradicional. Adicionalmente, el mínimo nivel de velocidad que se puede tener es bastante grande. Por lo tanto, se deben emplear algunas tecnologías de transporte de nivel más alto para realizar procesos de agregación y rápidamente enrutar el tráfico.

La esencia de las redes ópticas de segunda generación es que el tráfico permanece en formato óptico a lo largo de la red, siendo convertido a formato eléctrico solamente en los puntos extremos. En esta generación de redes se da por hecho la utilización de tecnologías de multiplexación de longitud de onda, haciendo que cada longitud de onda (λ) sea la unidad más baja a nivel de transmisión. Aquí, la capa óptica es una capa portadora que provee servicios a otras capas clientes. Esta capa óptica provee rutas ópticas (lightpaths), que son conexiones entre nodos terminales, a una variedad de capas cliente. Ejemplos de estas capas clientes pueden ser IP, ATM y SONET/SDH, entre otras tecnologías (estas dependen de la arquitectura establecida por cada operador de red). Sin embargo, la transición de las redes actuales hacia una red totalmente óptica debe ser un proceso evolutivo, por lo cual estas deben permitir el transporte del tráfico de las redes consideradas de primera generación.

Los avances tecnológicos que están revolucionando el transporte de información se traducen fundamentalmente en la reducción del número de capas en la pila de protocolos y en mejoras importantes en las prestaciones de cada una de las capas, que concluyen en el establecimiento de redes que involucran de manera total y efectiva las funcionalidades de las redes de la segunda generación.

¿Entonces porque tener múltiples capas en una red y que además realizan funciones similares?

Existen varios factores que determinan la respuesta a esta pregunta. Sería ideal migrar las redes actuales a una arquitectura de red que unificara todas las funciones para el transporte de cualquier tipo de señal en el mínimo de capas posibles a nivel puramente óptico y que ofrezca las garantías necesarias para prestar cualquier tipo de servicio con alta calidad (Calidad de Servicio, Quality of Service - QoS). Pero esta no es la realidad en todos los casos.

La respuesta, cuando las exigencias a nivel de tráfico, velocidad y expectativas de crecimiento a largo plazo no son muy altas para un operador, es que este modelo multicapas reduce significativamente los costos de equipos de red, ya que diferentes capas son más eficientes para realizar funciones a múltiples tasas de bits. Por ejemplo, la capa SONET/SDH puede conmutar y procesar fácilmente tráfico a 2.5 Gbps hoy en día, que hablando en términos de costo-eficiencia es lo más adecuado.

La capa óptica es particularmente eficiente procesando tráfico basado en una longitud de onda, donde se podrían alcanzar velocidades entre 10 y 100 Gbps por fibra, pero no específicamente buena procesando tráfico a bajos niveles de detalle (por ejemplo 155 Mbps), lo cual resultaría bastante costoso e ineficiente debido a la subutilización de las capacidades que esta podría ofrecer. Por consiguiente, tiene sentido utilizar la capa óptica en procesos de grandes cantidades de ancho de banda en un nivel relativamente robusto y la capa SONET/SDH para procesar pequeñas cantidades de ancho de banda a un menor nivel. Esta observación fundamental es la clave para proveer dichas funciones en múltiples capas.

Por tanto, se puede concluir que la arquitectura de las redes basadas en este modelo de capas consta de múltiples pilas de protocolos acomodados una sobre otra, lo que se traduce en una variada combinación de tecnologías que realizan las funciones de una o varias capas para conformar la red que se ajuste a las necesidades y recursos que la entidad prestadora de servicio tenga.

1.2 MODELOS DE REDES ÓPTICAS

Uno de los principales intereses en este trabajo, es el análisis del transporte de tráfico generado por redes IP directamente sobre la capa óptica, utilizando tecnología DWDM. Para llegar a ello, se requiere conocer las diferentes configuraciones de red existentes (Figura 1.1), las cuales incluyen diversas tecnologías que trabajan como capas intermedias, y que son el resultado de la adecuación de la tecnología ya adquirida a las necesidades de los operadores, tal como se explicó anteriormente.

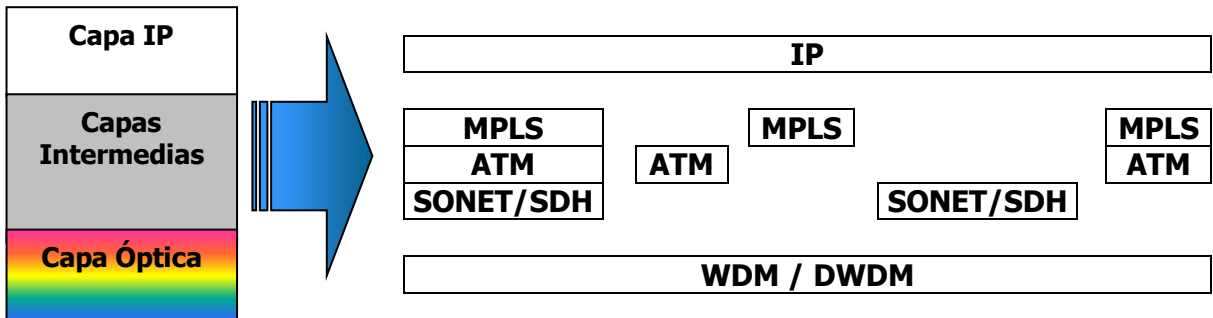


Figura 1.1. Simplicidad del modelo de capas

Por lo tanto, es importante determinar las fortalezas y debilidades de estas tecnologías, de tal manera que se pueda identificar que la tendencia en este campo es llegar a transportar paquetes IP directamente sobre DWDM, permitiéndolo definir la arquitectura más idónea para este propósito.

- **DWDM**

Una red óptica convencional utiliza sus fibras como medio de transmisión, mientras la conmutación de paquetes esta manejada por sistemas basados eléctricamente. Las ventajas de los sistemas de fibra son ampliamente conocidos, incluyendo baja latencia, mayor ancho de banda, mínimas tasas de error y atenuación, entre otras, que se convierten en un atractivo ineludible además de su costo.

Mientras teóricamente es posible transmitir 10 Tbps sobre una fibra, la mayoría de los sistemas convencionales están limitados a 10 Gbps o menos. Esta limitación es una función de componentes eléctricos que incluye láseres, transmisores y receptores de datos.

La Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, Wavelength Division Multiplexing) y la Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing) permiten que múltiples canales en diferentes longitudes de onda puedan ser transmitidos simultáneamente sobre una fibra, lo que se traduce en una mayor eficiencia por su alta capacidad de transporte. Por ejemplo, los sistemas comercialmente disponibles pueden soportar más de 100 canales, y sistemas futuros más de 1000 canales, donde cada uno puede transportar datos a velocidades entre 2.5 y 40 Gbps.

Por tanto, el campo de trabajo de las redes totalmente ópticas (AON, All Optical Networks) es lo suficientemente amplio como para que cualquier aplicación y/o servicio, actual o venidero, con grandes requerimientos de ancho de banda tenga cabida en ellas.

La ventaja principal de DWDM es que las redes de fibra existentes pueden ser escaladas para soportar aún más ancho de banda reemplazando simplemente los componentes eléctricos terminales.

Otra ventaja que aportan las redes ópticas basadas en esta tecnología, es la posibilidad de crear topologías virtuales de red en el dominio óptico, sobre una topología física que siempre es dependiente de la instalación de la fibra óptica, como se muestra en la figura 1.2.

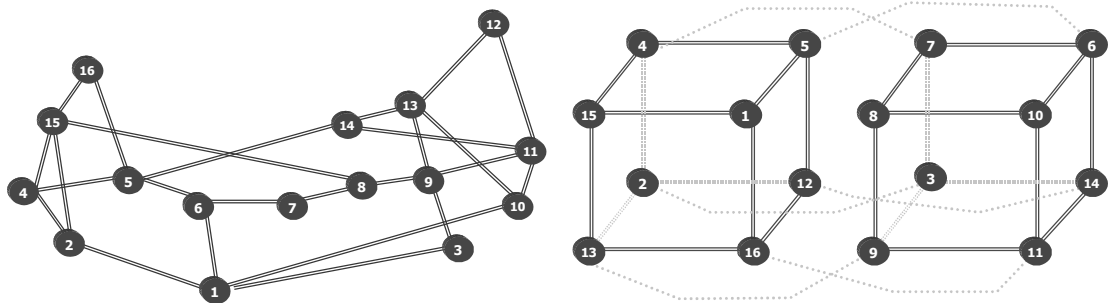


Figura 1.2. Ejemplo de topología física y virtual (un hipercubo de 16 nodos)

Por otra parte, la mayoría de los elementos de una red DWDM son estáticos, y los únicos dispositivos que necesitan configuración son los Crosconectores Ópticos (OXC, Optical Cross Connect) y los multiplexores ópticos.

La principal limitación de la capa óptica viene de su inhabilidad para crear dispositivos lógicos y de almacenamiento temporal. Aunque los dispositivos de almacenamiento temporal óptico y los circuitos lógicos digitales tienen su propio prototipo, el costo es demasiado alto y la tecnología bastante inmadura. La falta de capacidad de procesamiento limita la habilidad de agregar tráfico a la capa óptica, por esa razón se relegó esta capa a un papel netamente de transmisión.

Adicionalmente, aún no se ha definido una estructura de gestión consistente o estandarizada para las redes DWDM. Idealmente, cada red debe tener un sistema centralizado de gestión responsable por el aprovisionamiento de la red, el cual incluye la asignación de longitudes de onda (λ s) a través de esta.

La tecnología de nivel óptico ha mostrado una gran adaptabilidad en la integración con las redes ya existentes, como por ejemplo IP, ATM y SDH, las cuales son las más extendidas en todo el mundo. Por lo tanto, el soporte de dichas opciones no solo beneficiará la nueva tecnología en su capacidad de integración, sino que los desarrollos que se estén llevando a cabo en este momento tienen cabida en esta nueva red, como se observa en la figura 1.3.

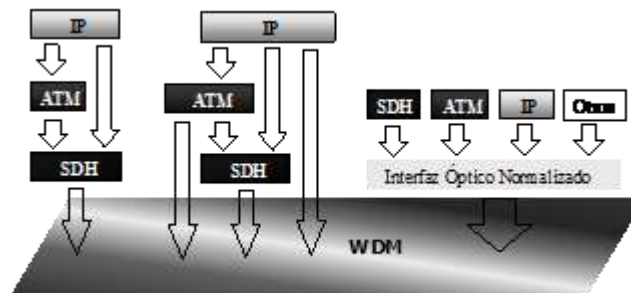


Figura 1.3. Diferentes Arquitecturas de capas.

Se han planteado diversas propuestas para mejorar la eficiencia en las redes ópticas con multiplexación de longitud de onda, como la conversión de longitudes de onda, la cual permite reducir la cantidad de colores necesaria para alojar una determinada demanda de conexiones.

Al final de todo este proceso, se espera que exista un backbone óptico de capacidad cercana a varios terabits por segundo, formado exclusivamente por transmisiones DWDM para maximizar la velocidad en la fibra. En etapas intermedias para acceder a estas superautopistas se pueden emplear conmutadores de paquetes ópticos que, por un lado concentren flujos de información y por otro optimicen el acceso al backbone.

Más adelante en este capítulo se realizará un estudio mas profundo de esta tecnología de multiplexación óptica.

- **SONET/SDH**

La Red Óptica Síncrona (SONET, Synchronous Optical Network) o su equivalente europeo Jerarquía Digital Síncrona (SDH, Synchronous Digital Hierarchy), son redes ópticas diseñadas para la transmisión de telefonía digital. Estos estándares utilizan la multiplexación por división de tiempo (TDM) para transportar la información.

SONET/SDH define un sistema de codificación y entramado, además de estándares para su mantenimiento y protección. Es utilizado para conexiones punto a punto y en anillo. Las topologías en anillo se utilizan para incrementar la confiabilidad ya que provee conexiones redundantes las cuales pueden ser activadas rápidamente en caso de cualquier falla en un tramo de la fibra.

Las redes SONET/SDH generalmente emplean un sistema centralizado de gestión, responsable por el aprovisionamiento de los recursos. La configuración de un trayecto a través de estas redes requiere de la ubicación de intervalos de tiempo, de tal forma que pueda ser mantenida una conexión de extremo a extremo sin restricciones de Calidad del Servicio (QoS) para la conexión. El ancho de banda es determinado por este intervalo y no pueden ocurrir congestiones en la red. Una vez la información es insertada dentro de la conexión, dichos datos llegarán a su destino con alto grado de confiabilidad.

No hay un sistema de gestión estandarizado para estas redes, y cada vendedor usualmente provee un sistema propietario para la gestión de su propio equipo. En una red de gran tamaño implementada con esta tecnología, pueden existir múltiples subredes de este tipo independientemente gestionadas. La trama de SONET/SDH y los estándares de protocolos definen mecanismos para que la información de gestión sea distribuida dentro de la red.

- **ATM**

El Modo de Transferencia Asíncrono (ATM, Asynchronous Transfer Mode) fue desarrollado como parte de la Red Digital de Servicios Integrados – de Banda ancha (B-ISDN, Broadband – Integrated Service Digital Network), teniendo como meta inicial proveer conexiones con gran ancho de banda y QoS garantizada. El conjunto de protocolos y servicios de ATM es bastante amplio, y no siempre implementado en todos los dispositivos. Por ejemplo, ATM provee Circuitos Virtuales Permanentes (PVC, Permanent Virtual Circuit) y Circuitos virtuales Conmutados (SVC, Switched Virtual Circuit). PVCs proveen conexiones estáticas (manualmente creadas), mientras que SVCs crean conexiones dinámicas establecidas basadas en la demanda y el estado actual de la red. Sin embargo, las capacidades de los SVCs no están implementadas en todos los dispositivos ATM, debido a los estándares incompletos y los altos costos de configuración.

ATM permite establecer circuitos virtuales (VCs) con diferentes anchos de banda dentro de los trayectos virtuales (VP, Virtual Path) que conectan los enrutadores. Esto permite dar soporte a múltiples clases de servicios, facilitando transportar tráfico de voz, datos y video

con desempeño predecible y con nivel de QoS garantizado. Puede soportar ingeniería de tráfico para garantizar QoS y hace uso de la multiplexación estadística, con lo cual puede lograrse que determinados usuarios puedan acceder a un ancho de banda extra en caso de llegar a ciertos picos de uso del canal.

La capa de adaptación ATM (AAL, ATM Adaptation Layer) define las técnicas de codificación y almacenamiento para soportar los diferentes servicios de la red. Mientras que el soporte para la calidad del servicio en ATM es muy bueno, la mayoría de las veces es sub-utilizado.

La desventaja de ATM es primeramente el costo. Los protocolos de ATM son bastante complejos, y por lo tanto es costosa y lenta su implementación. ATM se utilizan principalmente como portador, debajo de la capa IP y sobre SONET/SDH, en algunos casos.

- **MPLS**

El Multiprotocolo de Conmutación de Etiquetas (MPLS, Multiprotocol Label Switching) es el resultado de un esfuerzo por proveer capacidades de ingeniería de tráfico a las redes IP, adicionándole una etiqueta a la cabecera de los paquetes IP, de tal manera que se puede hacer la conmutación de paquetes mucho más eficiente, ya que se evita la búsqueda en la compleja tabla de enrutamiento IP. MPLS actualmente ha evolucionado en el intento de crear redes más rápidas utilizando conmutación ATM y protocolos IP.

MPLS no ofrece nada diferente a lo que ATM puede ofrecer. Sin embargo, es un conjunto de protocolos más simples y mucho más cercanos al tráfico IP y a sus enrutadores. Los trayectos de conmutación de etiquetas (LSPs, Label Switched Paths) de MPLS pueden ser creados dinámicamente por enrutadores o explícitamente por administradores de red. Por la cercanía de MPLS con el protocolo IP, este probablemente será administrado por el sistema de gestión de la capa IP.

Debido a sus grandes ventajas, esta tecnología es bastante atractiva para el manejo de IP sobre la capa óptica, por tanto se realizará un análisis más profundo en apartados siguientes de este documento.

- **IP**

La capa de Protocolo de Internet (IP) es fundamentalmente diferente de la mayoría de las otras tecnologías WAN. Esta tecnología es no orientada a la conexión; cada paquete es tratado independientemente, y es enrutado basado en la dirección de destino. El éxito de IP se debe a muchas razones, entre ellas la simplicidad y el costo. Las desventajas más grandes son la falta de servicios y soporte de seguridad, y QoS, entre otros.

Las redes IP no requieren un sistema centralizado de gestión y muchas veces no existe

para redes pequeñas. La gestión de una red IP es conceptualmente simple y los enrutadores pueden configurarse solos (aprendiendo las tablas de enrutamiento de sus vecinos).

La capa IP actualmente no soporta QoS. Se están realizando grandes esfuerzos por parte del Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (IETF, Internet Engineering Task Force) para estandarizar los mecanismos de Servicios Diferenciados (DiffServ – Differentiated Services) y Servicios Integrados (IntServ – Integrated Services) que ofrezcan el soporte de Calidad de Servicio. IP se basa en mensajes de enrutamiento para identificar fallas de enlace entre enrutadores, por lo cual estos generalmente responden lentamente ante fallas de enlace pues la información debe ser propagada a través de toda la red.

Cada uno de las opciones mencionadas tiene sus características que las diferencian de las demás, ya sea de una manera positiva o negativa.

Al estudiar cada una de estas tecnologías entre las capas IP y óptica, puede notarse que todas proveen aproximadamente el mismo servicio: conexión a través de la red. Estas conexiones pueden ser punto a punto o punto a multipunto.

Como conclusión, se presenta en la tabla 1.1 una comparación de las tecnologías descritas. En la tabla 1.2, se muestra un resumen de las fortalezas y debilidades de cada tecnología.

Tecnología	Tipo	Capas OSI	Confiabilidad	Seguridad	Agregación	Gestión
DWDM	Orientado a la conexión, Multipunto - Multipunto	1	Ninguna	No	Longitudes de onda	Centralizada
SONET/SDH	Orientado a la conexión, Punto a punto	1, 2	Detección automática de fallas (Recobro rápido)	No	División de Tiempo	Centralizada
ATM	Orientado a la conexión, Multipunto – Multipunto	2, 3	Varios	No	División de Tiempo asíncrona	Distribuida
MPLS	Orientado a la conexión, Multipunto – Punto	3	En desarrollo, Basado en enrutamiento	No	División de Tiempo asíncrona	Distribuida
IP	No orientado a la Conexión	3	Lenta, Basado en enrutamiento	No	División de Tiempo asíncrona	Distribuida

Tabla 1.1. Comparación de las Tecnologías de Transporte

Tecnología	Fortalezas	Debilidades
DWDM	Rápida, confiable y apropiada para largas distancias	No procesa información, agregación física, no tolerancia a fallos
SONET/SDH	Tecnología madura, excelente tolerancia ante fallas	Costosa
ATM	Flexible, soporte de QoS	Compleja, costosa y celdas fijas
MPLS	Simplicidad, funcionalidad semejante a conmutadores ATM	Simplicidad
IP	Flexibilidad, posicionamiento	No QoS, no seguridad

Tabla 1.2. Fortalezas y debilidades de tecnologías de transporte

1.3 ANÁLISIS DE LAS OPCIONES DE TRANSPORTE MAS IMPLEMENTADAS ACTUALMENTE POR OPERADORES DE TELECOMUNICACIONES

1.3.1 IP sobre ATM (IPoATM)

Debido a la necesidad de aprovechar mejor el ancho de banda, se aumentaron los esfuerzos para maximizar el rendimiento de los enrutadores tradicionales. Estos esfuerzos trataban de combinar, de diversas maneras, la eficacia y la rentabilidad de los conmutadores ATM con las capacidades de control de los enrutadores IP. A favor de integrar los niveles 2 y 3 estaba el hecho de que los operadores de telecomunicaciones se encontraban desplegando infraestructuras de redes ATM (ver modelo de capas figura 1.4).

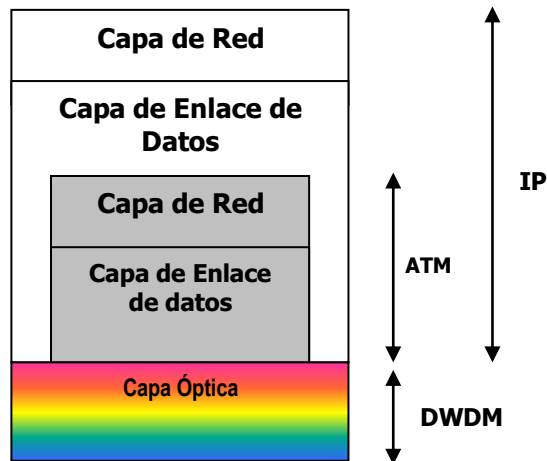


Figura 1.4. Las capas de una Red IP sobre ATM sobre una red óptica DWDM

Estas redes ofrecían entonces (1995-97) una buena solución a los problemas de crecimiento de los proveedores de servicio. Por un lado, proporcionaba mayores velocidades (155 Mbps.) y, por otro, las características de respuesta determinísticas de los circuitos virtuales ATM posibilitaban la implementación de soluciones de ingeniería de tráfico. El modelo de red "IP sobre ATM" (IP/ATM) pronto ganó adeptos entre la comunidad de los proveedores de servicios de red, a la vez que facilitó la entrada de los operadores telefónicos en la provisión de servicios IP y de conexión a la Internet a gran escala.

El funcionamiento IP/ATM supone la superposición de una topología virtual de enrutadores IP sobre una topología real de conmutadores ATM. El núcleo de red ATM se presenta como una nube central rodeada por los enrutadores de la periferia. Cada enrutador se comunica con el resto mediante los Circuitos Virtuales Permanentes (PVC, Permanent Virtual Circuit) que se establecen sobre la topología física de la red ATM. Los PVCs actúan como circuitos lógicos y proporcionan la conectividad necesaria entre los enrutadores de la periferia. Estos, sin embargo, desconocen la topología real de la infraestructura ATM que sustenta los PVCs. Los enrutadores ven los PVCs como enlaces punto a punto entre cada par. En la figura 1.5 se representa un ejemplo en el que se puede comparar la diferencia entre la topología física de una red ATM con la de la topología lógica IP superpuesta sobre la anterior.

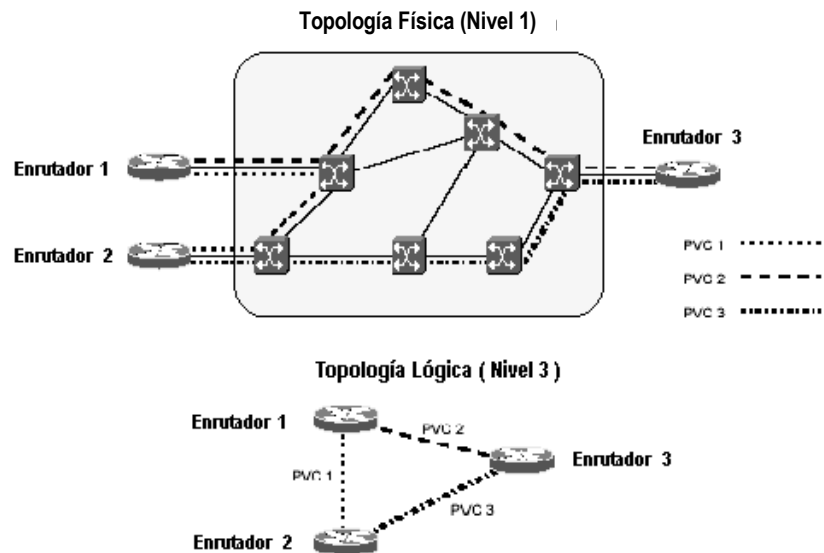


Figura 1.5. Topología física ATM y topología lógica IP superpuesta.

La base del modelo IP/ATM está en la funcionalidad proporcionada por el nivel ATM, es decir, los controles de software (señalización y enrutamiento) y el envío de las celdas por hardware (conmutación). En realidad, los PVCs se establecen a base de intercambiar etiquetas en cada conmutador de la red, de modo que la asociación de etiquetas entre todos los elementos ATM determina los correspondientes PVCs. Las etiquetas tienen

solamente significado local en los conmutadores y son la base de la rapidez en la conmutación de celdas. La potencia de esta solución de topologías superpuestas está en la infraestructura del backbone de ATM; el papel de los enrutadores IP queda relegado a la periferia. En la figura 1.6 se representa el modelo IP/ATM con la separación de funciones entre el enrutamiento IP en el nivel 3 (control y envío de paquetes) y lo que es conmutación en el nivel 2 (control/señalización y envío de celdas). Aunque se trata de una misma infraestructura física, en realidad existen dos redes separadas, con diferentes tecnologías, con diferente funcionamiento y, lo que quizás es más sorprendente, concebidas para dos finalidades totalmente distintas.

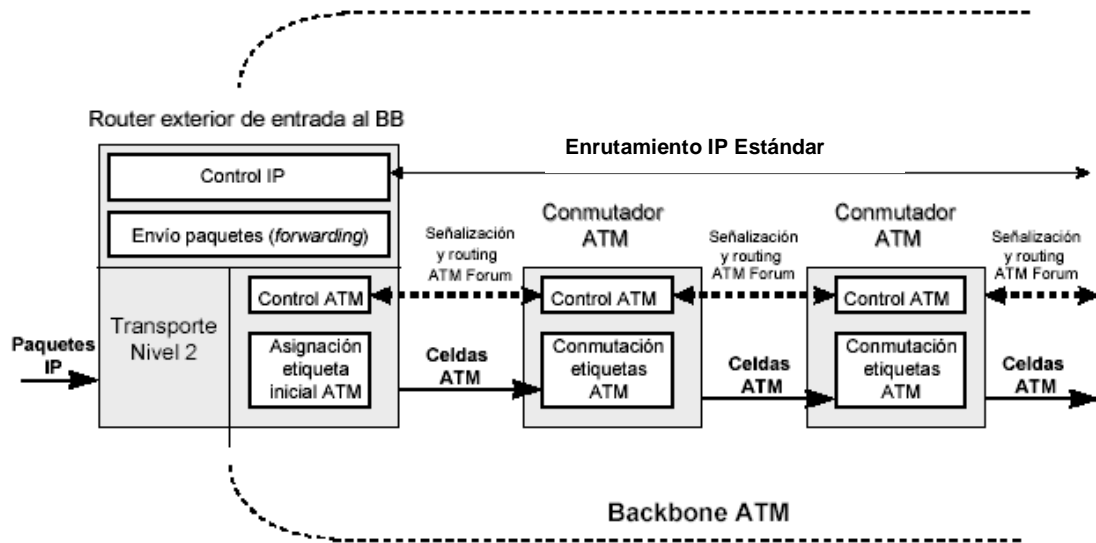


Figura 1.6. Modelo funcional IP sobre ATM

La solución de transportar IP sobre ATM permite aprovechar la infraestructura ATM existente. Las ventajas inmediatas son el ancho de banda disponible a precios competitivos y la rapidez de transporte de datos que proporcionan los conmutadores. En el caso de los proveedores de servicios de red de primer nivel, ellos poseen y operan el backbone ATM al servicio de sus redes IP. Los caminos físicos de los PVCs se calculan a partir de la necesidades del tráfico IP, utilizando la clase de servicio ATM UBR (Unspecified Bit Rate, Velocidad de Bit Desconocida), ya que en este caso ATM se utiliza solamente como infraestructura de transporte de alta velocidad (no hay necesidad de apoyarse en los mecanismos inherentes del ATM para control de la congestión y clases de servicio). No obstante, si las aplicaciones de IP requieren un QoS particular, especialmente para aquellas que necesitan ser soportadas en tiempo real, es posible utilizar otras capacidades de transferencia ATM como CBR (Constant Bit Rate, Velocidad de Bit Constante) o VBR-RT (Variable Bit Rate – Real Time, Velocidad de Bit Variable en Tiempo Real) que dan el soporte necesario para la comunicación.

La ingeniería de tráfico se basa en proporcionar los PVCs necesarios a los enrutadores, sobre una topología lógica totalmente enmallada. El punto de encuentro entre la red IP y la red ATM está en el acoplamiento de las sub-interfaces en los enrutadores con los PVCs, a través de los cuales se intercambian la información de encaminamiento correspondiente al protocolo interno IGP (Interior Gateway Protocol). Lo habitual es que entre cada par de enrutadores haya un PVC principal y otro de respaldo, el cual entra automáticamente en funcionamiento cuando falla el principal.

Sin embargo, el modelo IP/ATM tiene también sus inconvenientes: hay que gestionar dos redes diferentes, una infraestructura ATM y una red lógica IP superpuesta, lo que supone a los proveedores de servicio mayores costos de inversión y gestión global de sus redes.

Otra limitación es que además del encabezado de celda de aproximadamente el 10% (5 de los 53 bytes de cada celda), el mapeo de paquetes IP de longitud variable en celdas ATM de tamaño fijo impone un encabezamiento adicional de fragmentación, denominado tasa o impuesto de celda. La necesidad de rellenar el espacio vacío generado por la diferencia en tamaño de los paquetes genera encabezamiento adicional de aproximadamente el 20%, lo cual reduce en ese mismo porcentaje el ancho de banda disponible. Una solución a esto podría ser el colocar los paquetes directamente uno tras otro, pero a costa de perder dos paquetes consecutivos en caso de la pérdida de una celda.

También se debe tener en cuenta que la configuración de los canales virtuales ATM es compleja y consume mucho tiempo, además de requerir su propio esquema de direccionamiento y protocolos de enrutamiento.

Por otro lado, la solución IP/ATM presenta los típicos problemas de crecimiento exponencial $n \times (n-1)$ al aumentar el número de nodos IP sobre una topología completamente enmallada. Por ejemplo, en una red con 5 enrutadores externos con una topología virtual totalmente enmallada sobre una red ATM, son necesarios $5 \times 4 = 20$ PVCs (uno en cada sentido de transmisión). Si se añade un sexto enrutador se necesitan 10 PVCs más para mantener la misma estructura ($6 \times 5 = 30$), y por tanto se requerirá de mayor información de encaminamiento interno. Otro asunto es la escalabilidad: los protocolos de enrutamiento IP no se escalan bien con numerosos enlaces.

Como conclusión, se puede decir que el modelo IP/ATM, si bien presenta ventajas evidentes en la integración de los niveles 2 y 3, lo hace de modo discontinuo, a base de mantener dos redes separadas.

1.3.2 IP sobre ATM sobre SDH sobre red óptica

En este modelo de pila de protocolos, en primer lugar el paquete IP es segmentado en celdas ATM utilizando uno de los niveles de adaptación ATM (AAL) y los atribuye a canales virtuales (VC) en la tabla de enrutamiento. Las celdas ATM que salen del conmutador, son insertadas en tramas SONET/SDH. Esta última toma tráfico de baja velocidad de

dispositivos clientes (en este caso, conmutadores ATM), y los coloca en un formato de trama síncrono para transportarlos a través de una red de más alta velocidad hasta otro conmutador ATM, el cual las entrega a su destino final.

La creación del formato de trama síncrono es realizada por multiplexores de inserción/extracción (ADM, Add/Drop Multiplexer), los cuales generalmente están configurados en topologías de anillo de fibra, y que pueden estar concatenados mediante dispositivos denominados crossconectores digitales. Por lo tanto, la configuración de un circuito extremo a extremo por parte de un proveedor puede ser un proceso extenso, pues se debe configurar cada anillo y crossconector a lo largo del trayecto.

La mayoría de las ventajas de las redes SDH se basan en su probada fiabilidad y capacidad de restauración, lo que hizo a esta tecnología muy atractiva para aumentar los niveles de disponibilidad a este modelo de múltiples capas.

Dependiendo de la topología de red implementada, ya sea lineal, en malla o basada en anillos, SDH/SONET soporta varios tipos de mecanismos de protección contra cortes de fibra u otras averías significativas. La Conmutación de Protección Automática (APS, Automatic Protection Switching), por ejemplo, permite la configuración de, y el cambio hacia, un trayecto de protección (backup) físicamente diferente en caso de una falla a lo largo del trayecto de trabajo (primario), permitiendo evitar los puntos de falla. Los servicios son restaurados muy rápidamente (dentro de aproximadamente 50 milisegundos), pero al costo adicional de asignar ancho de banda y equipo para el trayecto protegido.

Aunque SDH ha evolucionado hacia una tecnología muy flexible, todavía es bastante costosa de implementar. Las ineficiencias inherentes a la adaptación de servicios de datos sobre una jerarquía optimizada para voz y una jerarquía de multiplexación inflexible todavía son problemáticas. Y lo más importante, las limitaciones de escalamiento en capacidad y la apatía al tráfico en ráfagas de IP hacen de cualquier tecnología basada en TDM una pobre elección para el futuro.

Las redes telefónicas implementan servicios de voz, necesitan confiabilidad y estrictos objetivos de calidad del servicio (QoS), aspectos que no son una prioridad para las redes IP. Las redes IP fueron diseñadas para maximizar la capacidad de compartir los recursos de la red, provistos de bajo soporte de calidad de servicio. El empleo de la redundancia de SONET/SDH no hace efectivo el uso de los recursos; lo que si hacen las redes IP.

Como se puede ver, la pila multinivel planteada tiene más problemas que ventajas. La superposición funcional es uno de ellos. Por ejemplo, cada nivel trata de realizar procesos de restauración en caso de una falla, lo cual genera más estragos en el sistema. Además, la agrupación de tráfico de diferentes tipos introduce latencia indeseada.

También, este escenario de niveles con múltiples tecnologías plantea otro limitante por su compleja gestión de red. Es muy difícil integrar sistemas de gestión para diferentes tecnologías de red, y a veces las redes son manejadas por diferentes operadores. Esto

hace que la red no pueda adaptarse fácilmente a cambios de corto plazo, tales como los generados por las variaciones de demanda planteadas por los usuarios de una red.

1.3.3 IP sobre SDH (IPoSONET/SDH)

Al eliminar de esta arquitectura la capa ATM con el fin de transportar el IP sobre SONET/SDH, se presentan sin duda varias ventajas, ya que se suprimen diferentes funciones que en un punto llegaban a ser redundantes, y por tanto disminuyen los costos de operación y mantenimiento de la red. Esto se ha podido lograr ya que los avances tecnológicos han hecho que los conmutadores ATM sean superados por los enrutadores IP no solo en funcionalidad sino también en capacidad.

La capa IP realiza la multiplexación estadística de paquetes dentro de flujos de mayor velocidad, los cuales son llevados sobre tramas SONET/SDH. La capa SONET/SDH multiplexa estas tramas dentro de flujos de alta velocidad, que son llevados sobre rutas ópticas (lightpaths). Dentro de la capa óptica hay una jerarquía de multiplexación. Múltiples longitudes de onda o lightpaths son reunidas en bandas de longitudes de onda, las cuales, a su vez son combinadas para producir una señal WDM o DWDM en una fibra, y finalmente transportadas al nodo de destino.

Transportar paquetes IP sobre tramas SONET/SDH tiene varias limitaciones relacionadas con la segmentación y ensamblado, debido a que se puede perder mucho tiempo en la tarjeta de interfaz del enrutador, dando lugar a una disminución en la eficiencia de procesamiento y funcionamiento. La ventaja de SONET/SDH es que lleva la información de la dirección y de la red en sus dígitos binarios de la cabecera. Sin embargo, esta cabecera tiene un gran espacio reservado para incidentes, sistemas de ayuda para control y operación. Estos gastos indirectos se podrían reducir al mínimo si estas funciones fueran incorporadas en los dispositivos de encaminamiento de IP.

Entre los operadores de redes actuales, este modelo es ampliamente utilizado debido a las ventajas que presenta esta tecnología. Como se dijo anteriormente, la capa SONET/SDH proporciona muchas funciones claves. Por ejemplo, provee conexiones de conmutación de circuitos punto a punto de forma controlada, además de eficientes mecanismos de multiplexación de conexiones de baja velocidad dentro de conexiones de alta velocidad.

Por lo tanto, las funciones realizadas por la capa óptica son en muchas formas análogas a las realizadas por la capa SONET/SDH, lo cual induce a la creación de una nueva arquitectura donde se elimina esta capa para darle paso a un nuevo modelo donde la capa IP es superpuesta directamente sobre la capa óptica. Así, los dos niveles trabajan conjuntamente para lograr la implementación de todos los servicios con los parámetros de disponibilidad y QoS que demandan las Redes de Nueva Generación (NGN, Next Generation Network).

1.3.4 IP sobre Óptico

Esta es, sin duda, la solución técnica y comercial que satisface las necesidades de los proveedores tanto a corto como a largo plazo. Para los Proveedores de Servicios de Internet (ISP, Internet Service Provider) es menos costoso mover una gran cantidad de tributarios de paquetes IP en un formato puramente óptico entre los nodos, en lugar de utilizar las alternativas tradicionales mencionadas anteriormente para obtener el mismo resultado. Además, estos proveedores se apoyan en los mecanismos de ingeniería de tráfico IP para configurar rápidamente recursos al nivel óptico y poder soportar las crecientes demandas de tráfico y servicios.

Las funcionalidades ofrecidas por los niveles ATM y de redes ópticas síncronas (SDH/SONET), ya no serán requeridas si las mismas o mejores funciones pueden ser realizadas por una combinación de los niveles IP y óptico. Dentro de esta funcionalidad se encuentra el soporte de fuertes técnicas de protección y restauración que deben ser consideradas cuando se requiere transportar tráfico de datos a elevados niveles de velocidad y confiabilidad.

Los continuos avances alcanzados por diferentes cuerpos de estandarización son ejemplos definitivos de esta tendencia. Estos esfuerzos están ayudando a definir un conjunto de protocolos común para gestión del enlace, descubrimiento de topología y enrutamiento, señalización, y supervivencia a través de redes IP y ópticas. Además, muchos de los conceptos avanzados de ingeniería de recursos desarrollados para redes IP, tales como enrutamiento basado en restricciones e ingeniería de tráfico, pueden ser aplicados en el dominio óptico. En este sentido, el desarrollo que ofrece mayores ventajas es MPLS y su conjunto de extensiones para alcanzar el MPLS Generalizado (GMPLS).

Los requerimientos exigidos a la capa óptica han creado en los proveedores una necesidad por tener en su backbone conexiones que ofrezcan grandes anchos de banda. Dichas necesidades están siendo cubiertas por las conexiones ópticas utilizando diferentes tecnologías de multiplexación, y para este caso la tecnología que mayor capacidad ofrece en el momento es DWDM.

1.4 MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA DENSA - DWDM

La tecnología de multiplexación de longitud de onda empezó a finales de la década de 1980 utilizando dos longitudes de onda muy espaciadas, 1310 nm y 1550 nm. Los posteriores desarrollos hacen uso de regiones específicas del espectro óptico donde la atenuación es baja. Estas regiones, llamadas ventanas, están entre áreas de alta absorción. Los primeros sistemas desarrollados operan alrededor de los 850 nm, la primera ventana en la fibra óptica basada en silicio. Una segunda ventana (banda S), a 1310 nm, es mejor porque tiene menor atenuación, seguida por una tercera ventana (banda C) a 1550 nm con una pérdida óptica aún menor. Hoy una cuarta ventana (banda L) cercana a 1625 nm está en fase de investigación.

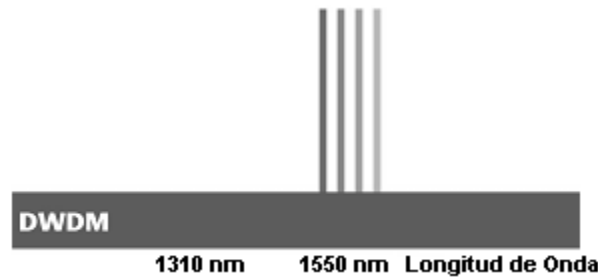


Figura 1.7. Espectro de longitudes de onda de sistemas DWDM en banda C (1550 nm).

A principios de la década de 1990 apareció la segunda generación de WDM, en la que se usaban de 2 a 8 canales. Ahora estos canales están espaciados en un intervalo de unos 400 GHz en la ventana de 1550 nm (Figura 1.7). A mediados de la década de 1990 los sistemas DWDM que estaban emergiendo consistían de 16 a 40 canales, trabajando cada uno con velocidades de hasta 10 Gbps., y un espaciado de 100 a 200 GHz. A finales de la década de 1990 los sistemas DWDM han evolucionado hasta el punto de que son capaces de tener de 64 a 160 canales en paralelo y espaciados cada 50 o 25 GHz.

1.4.1 ¿ Por qué DWDM?

Desde la perspectiva técnica y económica, la posibilidad de suministrar potencialmente una capacidad de transmisión ilimitada es la ventaja más obvia de la tecnología DWDM. La actual inversión en fibra no solo puede ser preservada, sino también optimizada con al menos un factor igual a 32. A medida que la demanda cambia, se puede añadir más capacidad, ya sea actualizando los equipos ó aumentando el número de longitudes de onda de la fibra sin costo de actualización.

Aparte del ancho de banda, las ventajas técnicas más convincentes del DWDM son las siguientes:

- **Transparencia.** Porque el DWDM es una arquitectura de nivel físico, que puede transportar transparentemente TDM y formatos de tramas tales como ATM, Gigabit Ethernet, ESCON y Fiber Channel con interfaces abiertas sobre un nivel físico común.
- **Escalabilidad.** El DWDM puede hacer que la gran cantidad de fibra utilizada en las redes MAN y en redes empresariales, permita cubrir rápidamente el aumento en la demanda de ancho de banda presentado en los enlaces punto a punto o de los anillos SDH/SONET actuales.
- **Aprovisionamiento dinámico.** El aprovisionamiento rápido, simple y dinámico de las conexiones de red da a los proveedores la posibilidad de suministrar servicios de banda ancha en días en vez de meses.

Un solo amplificador óptico puede amplificar todos los canales DWDM de una fibra sin demultiplexación ni procesamiento individualizado. El amplificador óptico solo amplifica las señales y luego las retransmite. Dependiendo del diseño del sistema, las señales se

pueden transmitir desde 600 a mil kilómetros sin regeneración. Además de reducir drásticamente el costo de los regeneradores, los sistemas DWDM simplifican mucho la expansión de capacidad de la red. El único requerimiento es instalar interfaces adicionales o de mayor velocidad en los sistemas DWDM en el extremo de la fibra. En algunos casos, solo será necesario aumentar el número de longitudes de onda de la fibra en las interfaces existentes.

Mientras los amplificadores ópticos son un factor importante en la posibilidad de ampliar el rango efectivo del DWDM, otros factores entran en juego. Por ejemplo el DWDM está sujeto a los efectos de dispersión y no linealidad. Muchos componentes, tales como los Multiplexores Ópticos de Inserción/Extracción (OADM, Optical Add/Drop Multiplexer), son pasivos y por lo tanto continúan funcionando si no hay alimentación. Además estos componentes tienden a tener un tiempo promedio entre fallas (MTBF, Mean Time Between Failures) muy alto. Los esquemas de protección implementados en equipos DWDM y en los diseños de la red son al menos tan robustos como los de SDH/SONET. Todos estos factores contribuyen a una mejor rentabilidad y un menor mantenimiento en la red óptica.

1.4.2 Funciones del sistema DWDM

El núcleo de DWDM consta de un pequeño número de funciones de nivel físico. Cada canal funciona con una longitud de onda específica, la cual 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.

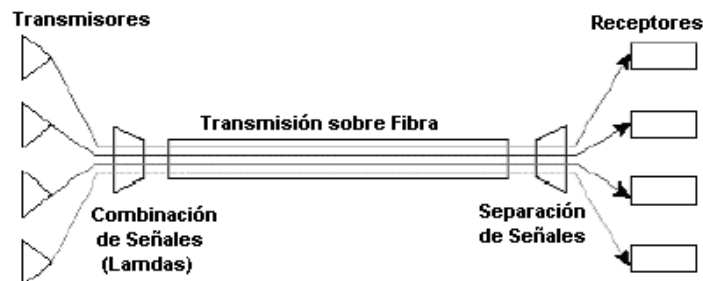


Figura 1.8. Esquema Funcional DWDM

El sistema realiza las siguientes funciones principales:

- Generación de señal. La fuente 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 multiplexación y demultiplexación. 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 variables tales como el espaciado entre canales, la tolerancia de la longitud de onda, y los niveles de potencia del láser. En algunas ocasiones puede necesitarse una amplificación de la señal en un enlace de la transmisión.
- 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.
- Recepción de señales. La señal demultiplexada es recibida por un fotodetector.

Además de estas funciones, un sistema DWDM también debe estar equipado con interfaces en el lado cliente para recibir la señal de entrada. Esta función la realizan los transpondedores.

1.4.3 Componentes y operación

DWDM es una tecnología para el núcleo de una red de transporte óptico. Los componentes esenciales del DWDM se pueden clasificar por su posición en el sistema de la siguiente manera (Ver Figura 1.9):

- En el lado transmisor, fuentes de luz con longitud de onda precisa y estable.
- En el enlace, fibra óptica con bajas pérdidas y buen rendimiento en la transmisión sobre el espectro de la longitud de onda relevante, además de amplificadores ópticos de ganancia plana para amplificar la señal en distancias largas.
- En el lado receptor, fotodetectores y demultiplexadores ópticos utilizando filtros de poco espesor o elementos de difracción.
- Multiplexores ópticos de Inserción/Extracción y Cross conectores ópticos.

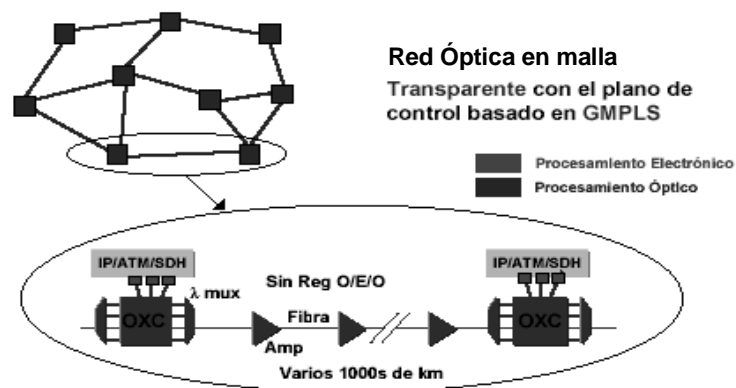


Figura 1.9. Componentes de la Red DWDM

En el capítulo 3 se presentará más información sobre los componentes de la red óptica y los elementos que se deben tener en cuenta para una implementación IPoDWDM.

CAPITULO 2. ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE IP SOBRE REDES ÓPTICAS DWDM

2.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se mostraron las diferentes configuraciones de red que con mayor aceptación se han implementado actualmente en el mundo de las redes. Se puede concluir que generalmente las redes están compuestas de cuatro capas: IP para el transporte de aplicaciones y servicios, ATM para proveer Ingeniería de Tráfico (TE, Traffic Engineering), SONET/SDH para el transporte y DWDM para proporcionar la capacidad. La escalabilidad de esta arquitectura es muy lenta para volúmenes de tráfico muy grandes, además de ser ineficiente en cuanto a costos.

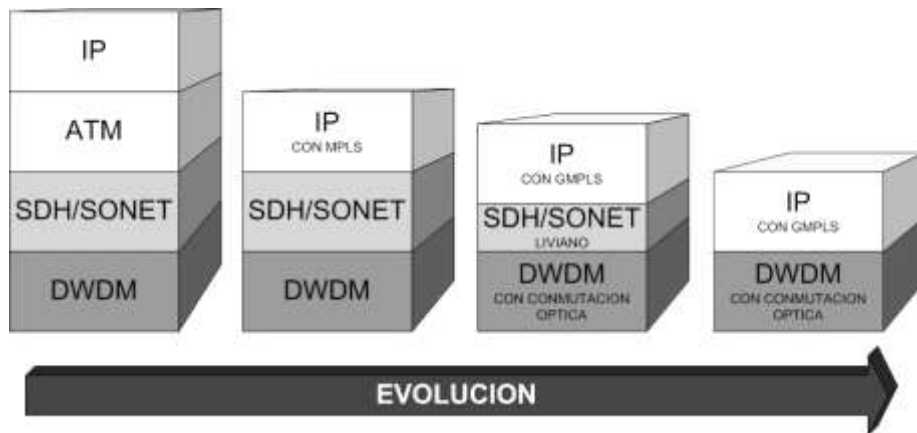


Figura 2.1. Evolución tecnológica de las redes actuales.

Un transporte efectivo debe optimizar el costo de la multiplexación, así como de la conmutación de los datos en conexiones de alta capacidad. DWDM ofrece estas ventajas ya que su característica principal es el aumento de la capacidad de transporte en una fibra óptica mediante la creación efectiva de múltiples fibras virtuales, y todo esto a costos relativamente bajos que irán disminuyendo conforme aumente la demanda. Análogamente, se espera que los Cross conectores ópticos (OXC, Optical Cross Connect) se conviertan en la opción preferida para la conmutación de flujos de datos de gigabits o incluso terabits, ya que evita el procesamiento electrónico por paquete.

Mientras las capacidades de los enrutadores y OXCs aumentan rápidamente, las altas tasas de datos del transporte óptico apuntan a la posibilidad de eliminar las capas SONET/SDH y ATM, tal como se muestra en la figura 2.1. Para llegar a tal punto se requiere que la tecnología que remplace dichas capas, tenga la capacidad de desarrollar sus funcionalidades de manera mucho más eficiente. Como resultado final se obtiene una

red más sencilla, económicamente atractiva y que transportará un amplio rango de flujos de datos y volúmenes de tráfico.

2.2 ESTANDARIZACIÓN DEL PLANO DE CONTROL EN REDES ÓPTICAS

Los estándares del plano de control óptico permitirán la construcción de redes ópticas automatizadas con equipos de múltiples vendedores, al especificar un conjunto mínimo de características que necesitan soportar todos los dispositivos que se utilizarán en estas redes. Además, permitirán reducir los costos de instalación y operación de este tipo de redes para los principales usuarios de conmutadores ópticos: los operadores y proveedores de servicio.

A continuación se presentan los dos enfoques reconocidos hasta el momento, desarrollados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, Internacional Telecommunications Union) y el Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (IETF). La primera, enfoca su trabajo en la definición de una arquitectura denominada Red Óptica de Conmutación Automática (ASON, Automatic Switched Optical Network), mientras la segunda trabaja en la definición de los protocolos GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching).

2.2.1 ASON, Redes Ópticas de Conmutación Automática

2.2.1.1 Desarrollo de ASON en la ITU

ASON no es un protocolo ni tampoco un conjunto de estos. Es una arquitectura que define los componentes del plano de control óptico y las interacciones entre ellos, además de identificar cuales de estas interacciones ocurrirán en un entorno multivendedor, requiriendo protocolos estandarizados. Otras áreas no son estandarizadas a propósito para permitir a los vendedores de equipo u operadores proveer valor agregado.

Esta arquitectura fue desarrollada por el Grupo de Estudio 15 de la ITU-T, que lo inició en respuesta a las demandas de sus miembros para crear una completa definición de operación para las redes de transporte automáticamente conmutadas, al igual que su interacción con el plano de gestión, plano de transporte de datos, etc., como se indica en la figura 2.2.

ASON no puede ser implementada directamente pues es una arquitectura de referencia. Como casi todos los proyectos de la ITU, esta arquitectura es desarrollada en un esquema top-down, comenzando con una lista completa y explícita de requerimientos, moviéndose desde una arquitectura de alto nivel hacia una arquitectura individual de componente. La ITU inicia el diseño de la arquitectura recurriendo a conceptos de protocolos utilizados fuertemente en las redes de transporte de telecomunicaciones, tales como SDH/SONET,

SS7 y ATM, pues la clave principal de ASON es incluir el soporte explícito para dispositivos de redes antiguas dentro de la arquitectura.

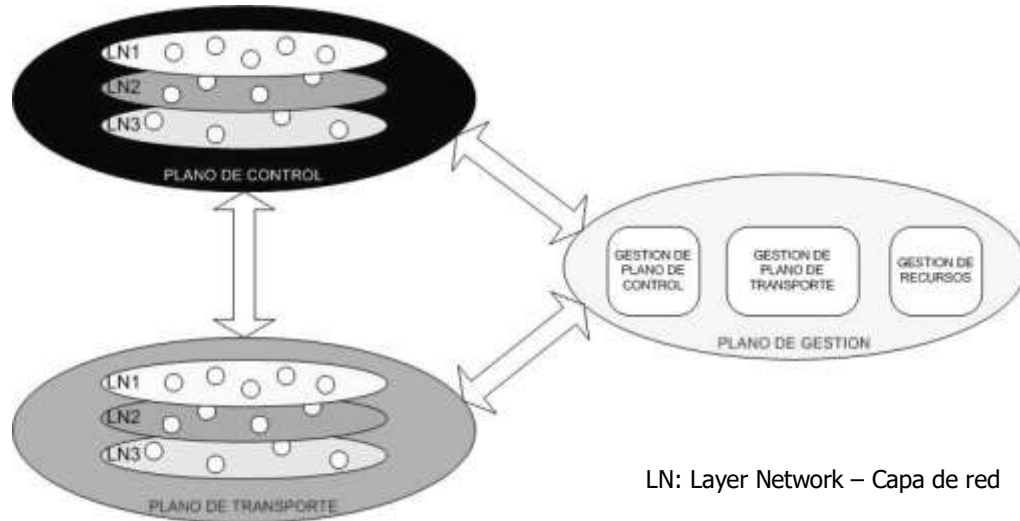


Figura 2.2. Relación entre los componentes de la arquitectura ASON

Los estándares relacionados con ASON son:

- Arquitectura para redes ópticas automáticamente conmutadas (G.8080 o G.ason).
- Control de llamada y conexión distribuida (G.7713 o G.dccm).
- Arquitectura y requerimientos para enrutamiento en redes ópticas automáticamente conmutadas (G.7715 o G.rtg).
- Técnicas generalizadas de descubrimiento automático (G.7714 o G.disc).

Se han probado varios protocolos con la arquitectura ASON para ver que tan bien se adaptan. La ITU esta trabajando también en la definición de perfiles de protocolo que pueden cumplir con ASON, como por ejemplo:

- Señalización basada en PNNI (G.7713.1).
- Señalización basada en RSVP-TE Generalizado (G.7713.2).
- Señalización basada en CR-LDP Generalizado (G.7713.3).
- Descubrimiento para SDH/SONET, incorporando algunos aspectos de LMP (G.7714.1).

2.2.1.2 Descripción técnica de ASON

ASON define un plano de control con una arquitectura que permite el establecimiento y terminación de llamadas (llamada es la asociación entre puntos terminales que soportan una instancia de un servicio), y las conexiones que la soportan, como resultado de un requerimiento del usuario.

Para alcanzar cubrimiento global y el soporte de múltiples tipos de clientes, la arquitectura es descrita en términos de componentes y un conjunto de puntos de referencia, que forman una red óptica de transporte con capacidades de conexión dinámica (abarcando conexiones SDH/SONET, longitudes de onda, y servicios de conexión de fibra en redes con conversión OEO - Óptica-Eléctrica-Óptica - y en redes totalmente ópticas – AON, All Optical Network), que ofrece los siguientes tipos de valor agregado:

- Ingeniería de tráfico de canales ópticos: Donde la asignación de ancho de banda se basa en los patrones de demanda actuales.
- Topologías de red en malla y restauración: Las topologías de red en malla pueden ser diseñadas para una mejor utilización en una matriz de demanda dada; las topologías en anillo pueden no ser tan eficientes debido a su asimetría en los patrones de tráfico.
- Ancho de banda gestionable para encapsular la conectividad de las redes IP: Una red óptica conmutada puede proveer ancho de banda y conectividad a una red IP de una forma dinámica comparada al servicio relativamente estático existente hoy en día.
- Introducción de nuevos servicios ópticos: La disponibilidad de redes ópticas conmutadas facilitará la introducción de nuevos servicios al nivel óptico. Estos servicios incluyen ancho de banda por demanda y redes privadas virtuales ópticas (OVPN, Optical Virtual Private Network).

2.2.1.2.1 Puntos de referencia de ASON

ASON ve la red compuesta como dominios que interactúan con otros dominios de una forma estandarizada, pero cuyas operaciones internas son independientes del protocolo y no sujetas a estandarización. Para esto, divide el plano de control de la red óptica en dominios que corresponden a los dominios administrativos de la red. Dentro de un dominio administrativo, el plano de control puede ser subdividido en áreas de enrutamiento para dar escalabilidad, las cuales, a su vez, pueden ser subdivididas en conjuntos de componentes de control. El plano de transporte también es particionado para corresponder a los dominios administrativos, y para corresponder a las subdivisiones creadas dentro de estos.

La interconexión entre dominios, áreas de enrutamiento, y donde se requiera conjuntos de componentes de control, es descrita en términos de puntos de referencia. El intercambio de información a través de estos puntos de referencia, cada uno con diferentes requerimientos en el grado de protección, es descrito por las interfaces abstractas entre los componentes de control. La interconexión física es provista por una o más de estas interfaces.

Las interfaces o puntos de referencia definidos en ASON se presentan a continuación, y la figura 2.3 muestra una posible subdivisión y los puntos de referencia entre ellos:

- Interfaz Usuario-Red (User-Network Interface - *UNI*): Se implementa entre el cliente óptico y la red.

- Interfaz Nodo-Nodo Interna (Internal Node-Node Interface – *I-NNI*): Define la interfaz entre los elementos de señalización de red dentro del mismo dominio o entre áreas de enrutamiento.
- Interfaz Nodo-Nodo Externa (External Node-Node Interface – *E-NNI*): Define la interfaz entre los planos de control ASON pertenecientes a diferentes dominios.

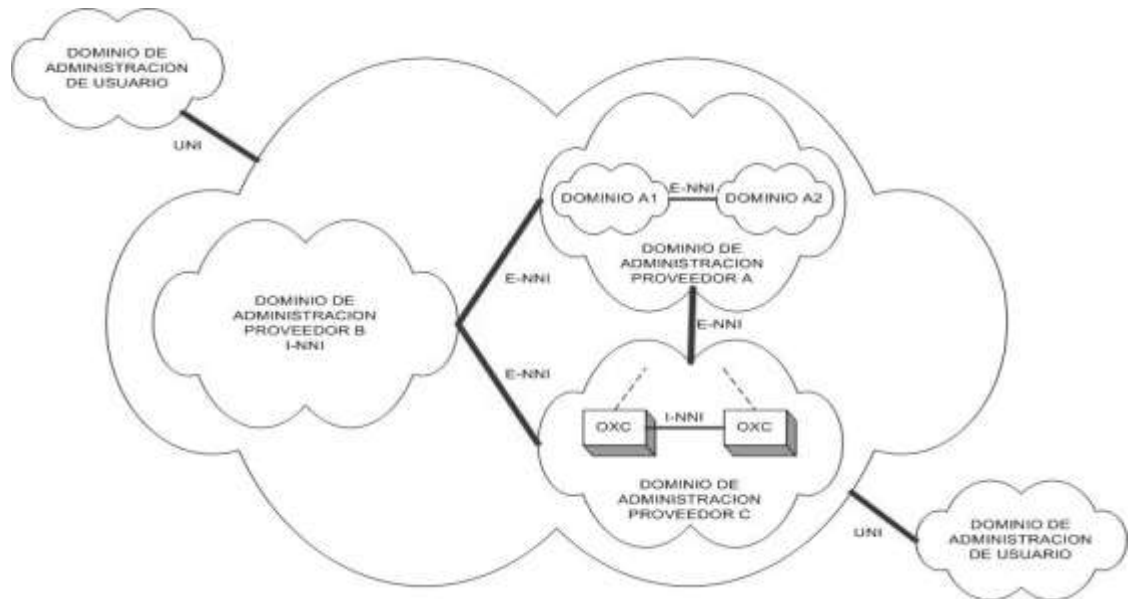


Figura 2.3. Arquitectura Global ASON

La diferencia entre la I-NNI y la E-NNI es significativa. La primera es aplicada en un área de enrutamiento simple donde los equipos soportan el mismo protocolo de enrutamiento y se puede intercambiar información de enrutamiento detallada entre los diferentes nodos. De otra parte, la E-NNI se interesa principalmente en la accesibilidad entre los dominios que emplean metodologías de enrutamiento y protección diferentes.

- **Interfaz UNI**

La concepción de la red permite a los usuarios participar en el plano de control automatizado. Aquí, el "usuario" es un dispositivo final que solicita el servicio de la red de transporte en vez de suministrarlo. Esta interfaz permite a los clientes ejecutar funciones como:

- Crear Conexión: El cliente indica a la red la creación de una nueva conexión con unos atributos específicos. Estos atributos pueden ser ancho de banda, protección, restauración y diversidad.
- Eliminar Conexión: El cliente indica a la red la necesidad de eliminar una conexión ya existente.
- Modificar Conexión: El cliente indica a la red la necesidad de modificar uno o más atributos de una conexión ya existente.

- Consulta de Estado: Permite a los clientes ASON consultar el estado de una conexión ya existente.
- Otras funciones como registro de clientes, resolución de direcciones, descubrimiento de vecinos y servicios, que pueden ser automatizadas o configuradas manualmente entre la red y sus clientes.

Este punto debe ocultar al usuario toda la información de enrutamiento y direccionamiento perteneciente al interior de la red.

- **Interfaz I-NNI**

Aquí se define la interfaz entre controles de conexión adyacentes en el mismo dominio o entre áreas de enrutamiento. Hay dos aspectos principales a tener en cuenta con respecto a esta interfaz: señalización y enrutamiento.

La selección del trayecto y su configuración a través de la red óptica requiere un protocolo de señalización. Las redes de transporte típicamente utilizan enrutamiento explícito, donde la selección del trayecto puede ser hecha ya sea por el operador o por herramientas de programación de software en sistemas de gestión. En ASON, los canales ópticos extremo a extremo (conexiones) son requeridos con ciertas restricciones. La selección de trayecto para un requerimiento de conexión debería emplear algoritmos de enrutamiento que equilibren múltiples objetivos:

- Estar conforme a restricciones tales como diversidad física, etc.
- Balancear la carga de tráfico en la red para conseguir la mejor utilización de los recursos de red.
- Seguir políticas de decisión en enrutamiento tales como rutas preferidas.

La difusión de información de estado (Información que cada nodo tiene de sus vecinos y de los niveles de utilización en los diversos enlaces de la red) es definida como la manera en la cual la información de los recursos físicos locales es difundida en toda la red. Primero, el mapa de recursos físicos locales es sintetizado en la información de enlace lógico de acuerdo a los atributos del enlace. Luego, esta información puede ser distribuida a los diferentes nodos en la red.

- **Interfaz E-NNI**

Esta es la interfaz externa entre diferentes dominios. Estos dominios pueden pertenecer a la misma administración de red o a diferentes administraciones. En algún sentido, la E-NNI podría ser vista de forma similar a la interfaz UNI, con algunas funciones de enrutamiento adicionales que permiten el intercambio de información de accesibilidad entre diferentes dominios, para facilitar el cálculo de las rutas a través de la red, pero ocultando los dispositivos internos de la red para eliminar la fuga de información confidencial entre los operadores.

2.2.1.2.2 Separación del control de llamada y el control de conexión

Una llamada puede contener cualquier número de conexiones subyacentes en cualquier instante de tiempo. El control de llamada es una asociación de señalización entre una o más aplicaciones de usuario y la red para controlar el establecimiento, liberación, modificación y mantenimiento de elementos de conexión. Este control es provisto al ingreso ó salida de la red ó en los límites del dominio (es aplicable a los puntos de referencia UNI y E-NNI). El acceso a la información de llamada en los límites del dominio permite a aquellos dominios que utilizan diferentes mecanismos de protección o restauración interoperar sin la necesidad de entender todos los posibles esquemas de protección/restauración en los otros dominios.

El control de conexión es responsable del control total de las conexiones individuales, además de mantener la asociación entre las partes involucradas. Para realizar este tipo de control a través de múltiples dominios, se requiere de la cooperación entre controladores de diferentes dominios, creando comunidades de dominios que cooperan para realizar la gestión de conexión.

Los controles de llamada y de conexión son tratados separadamente en esta arquitectura, lo que representa una ventaja al reducir la información redundante del control de llamada en los nodos de control de conexión intermedios, eliminando la sobrecarga generada al decodificar e interpretar el mensaje completo y sus parámetros. El control de llamada puede consecuentemente ser provisto en la entrada y en los límites de la red.

Con la separación del control de llamada y de conexión, una simple llamada puede contener un cierto número de conexiones entre aplicaciones de usuario, permitiendo la introducción de servicios mejorados. Además, ésta separación es benéfica para el proveedor de servicio, especialmente en las áreas de restauración y mantenimiento, generando un ahorro de costos en el sostenimiento del estado de la llamada mientras las acciones de restauración se ejecutan.

El control de la conectividad es esencial para la operación de una red de transporte. Esta red, por sí sola, puede ser descrita como un conjunto de niveles de red, cada uno actuando como una función de conexión, por medio de la cual las asociaciones son creadas y removidas entre las entradas y las salidas de la función. Estas asociaciones son referenciadas como conexiones y pueden ser de tres tipos: por aprovisionamiento, por señalización ó híbridas.

El establecimiento de conexiones por aprovisionamiento es iniciado por un sistema de gestión y es referenciado como una conexión permanente estática. Las conexiones por señalización son establecidas por demanda, utilizando un intercambio dinámico de mensajes de protocolo en forma de mensajes de señalización. En las conexiones híbridas, una red provee una conexión permanente en el límite de la red y utiliza una conexión conmutada dentro de la red para proveer conexiones extremo a extremo entre las conexiones permanentes en los límites de la red.

2.2.1.2.3 Supervivencia y protección de la red de transporte

Para mantener la integridad de una llamada existente ante una falla dentro de la red de transporte, se utilizan las técnicas de Protección (Reemplazo de un recurso que falló con un recurso sustituto pre-asignado) y Restauración (Reemplazo de un recurso que falló por re-enrutamiento utilizando capacidad auxiliar). En general, las acciones de protección se completan en el rango de décimas de milisegundos, mientras las acciones de restauración se completan en rangos de tiempo que van de cientos de milisegundos a más de unos pocos segundos.

El plano de control ASON le da a un operador la capacidad de ofrecer llamadas de usuario con una Clase de Servicio (CoS, Class of Service) seleccionada (por ejemplo, disponibilidad, duración de interrupciones, segundos de error, etc.) mediante protección y restauración. La selección de los mecanismos de supervivencia (ya sea protección, restauración o ninguno) para una conexión particular que soporta una llamada se basa en: la política del operador de red, la topología de la red y la capacidad del equipo implementado.

Si una llamada transita por redes de varios operadores, entonces cada red deberá ser responsable de la supervivencia de las conexiones de tránsito, y los requerimientos de conexión en la UNI o en la E-NNI contendrán solamente la CoS requerida, no un tipo de protección o de restauración explícito.

Los mecanismos de protección o restauración deben:

- Soportar y ser independientes del tipo de cliente (por ejemplo, IP, ATM, SDH, Ethernet).
- Proveer escalabilidad para solucionar una falla catastrófica en un nivel servidor, tal como un corte del cable de fibra, el cual impacta un gran número de conexiones a nivel de cliente que necesitan ser restauradas simultánea y rápidamente.
- Utilizar un mecanismo de señalización robusto y eficiente, que permanezca funcional aun después de una falla en las redes de transporte o señalización.
- No confiar en funciones que no son críticas en el tiempo para iniciar las acciones de protección o restauración. Por lo tanto, alguna consideración deberá ser dada para los esquemas de protección y restauración que no dependan de la localización de fallas.

2.2.2 GMPLS, MPLS Generalizado

2.2.2.1 Desarrollo de GMPLS en el IETF

GMPLS surgió de MPLS, una tecnología de conmutación de paquetes diseñada para mejorar la eficiencia de las redes de datos. Una versión de esta tecnología, conocida como MPLS-TE (MPLS con extensiones de Ingeniería de Tráfico - TE), proporciona conexiones extremo a extremo utilizando señalización con enrutamiento basado en restricciones. Por

un movimiento natural, esta última se generalizó y extendió para cubrir las tecnologías de conmutación óptica orientadas a circuitos, tales como las multiplexaciones por división de tiempo y de longitud de onda (TDM y WDM). Naturalmente, como un protocolo del IETF, GMPLS utiliza un plano de control basado en IP.

En la IETF, el desarrollo del protocolo MPLS fue realizado por el Grupo de Trabajo del mismo nombre. Cuando GMPLS apareció en escena, se creó el Grupo de Trabajo para el desarrollo del Plano de Control y Gestión Común (CCAMP, Common Control and Management Plane). Este grupo definió un conjunto de protocolos que permiten la implementación de un amplio rango de conmutadores eléctricos y ópticos interoperables. Al igual que los protocolos, el grupo provee documentos con información sobre la arquitectura que estos generan al ser utilizados en conjunto, describiéndola de tal forma que permite proveer mucha flexibilidad a sus implementadores.

El término GMPLS es coloquialmente utilizado para referirse a un conjunto de protocolos que trabajarán juntos para dar aprovisionamiento extremo a extremo a las redes ópticas. Los conmutadores GMPLS operan en una nube de elementos de red al mismo nivel. Los nodos extremos son capaces de aceptar datos de otros protocolos y entunelarlos a través de la nube hacia otros nodos extremos.

GMPLS está diseñado para ser utilizado en una red totalmente GMPLS, aunque es posible implementarlo en redes existentes. Cuando se alcance la total interoperabilidad del plano de datos, cualquier elemento de red en la nube puede ser intercambiado por otro de diferente vendedor.

Todos los nodos y enlaces que constituyen la red comparten el mismo espacio de direcciones IP y la información fluye libremente entre los nodos. En otras palabras, GMPLS implica un entorno confiable.

A continuación se enlistan los protocolos incluidos en esta arquitectura:

- Protocolo de Reservación de Recursos Generalizado con extensiones de Ingeniería de tráfico (RSVP-TE, Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering) para señalización.
- Protocolo de Distribución de Etiquetas con Enrutamiento basado en Restricciones Generalizado (CR-LDP, Constraint-based Routing Label Distribution Protocol) también para señalización.
- Protocolo Open Shortest Path First (OSPF) con extensiones de Ingeniería de Tráfico, para enrutamiento intra área.
- Protocolo Intermediate System to Intermediate System (ISIS) con extensiones de Ingeniería de Tráfico, también para enrutamiento intra área.
- Protocolo de Gestión de Enlace (LMP, Link Management Protocol) y Protocolo de Gestión de Enlace sobre WDM (LMP-WDM) para diversas funciones de gestión de enlace y descubrimiento.

RSVP-TE y CR-LDP son protocolos alternativos, que hacen lo mismo efectivamente. Fueron heredados de MPLS-TE, pues debido a conflictos en intereses de negocio, los miembros de la IETF no llegaron a un acuerdo.

Las extensiones TE de ISIS y OSPF también son funcionalmente equivalentes. Aquí, sin embargo, hay razones históricas para mantener ambos protocolos, debido a la amplia implementación de las versiones no TE en las redes de datos.

Más adelante en este documento se dará una explicación más detallada de cómo funciona todo este conjunto y cuales son sus ventajas para conseguir la implementación de redes IP ópticas.

2.2.3 El OIF, Optical Internetworking Forum

El OIF se encuentra entre la ITU y el IETF. Cuenta con miembros exponentes de las dos organizaciones, siendo el punto de cruce entre ASON y GMPLS que permite a los protagonistas de las dos arquitecturas explicar y debatir en un foro sus argumentos y terminología a los otros.

La misión del OIF es acelerar la aceptación de tecnologías de red óptica, por lo cual sus resultados claves son la publicación de acuerdos de implementación y las demostraciones de interoperabilidad que muestran estos acuerdos en acción.

El principal resultado del trabajo en el plano de control óptico es la "Especificación de Señalización para la Interfaz Usuario Red 1.0" (Acuerdo de implementación OIF-UNI-01.0), una fusión de los requerimientos de alta prioridad ASON con un perfil de varios protocolos GMPLS (RSVP-TE, CR-LDP y LMP). También se realizó una demostración satisfactoria de interoperabilidad de una versión interna de la especificación basada en RSVP-TE en la conferencia SuperComm 2001.

La versión 1.0 completa, la cual es bastante cercana a la versión interna (pero no tan cerrada como la anterior), no ha tenido una demostración pública de interoperabilidad, aunque se han hecho pruebas en privado. La especificación está todavía en etapas iniciales de implementación, en parte porque los vendedores de equipo apenas iniciaron a adherir capacidades UNI 1.0 a sus dispositivos y por otra parte porque tienen diferentes prioridades.

El OIF esta trabajando en una segunda versión de la UNI que tendrá nuevas características requeridas por sus miembros proveedores, y un acuerdo de implementación de E-NNI.

2.3 GMPLS

2.3.1 EVOLUCIÓN DE MPLS HACIA GMPLS

Como se mencionó anteriormente, MPLS debió ser extendido como una tecnología de plano de control con el fin de poder ser utilizado con nuevos dispositivos como los OXCs. Esta generalización proporciona el plano de control común y estandarizado necesario en la evolución de redes ópticas abiertas e interoperables, permitiendo: simplificar las operaciones, la gestión, y con ello reducir su costo. Además, aprovechar los desarrollos realizados en protocolos de señalización y enrutamiento ya probados y proporcionar un amplio rango de escenarios de desarrollo.

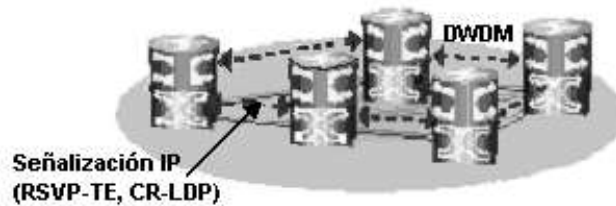


Figura 2.4. Esquema general de una red óptica DWDM con un plano de control común basado en GMPLS

Por otra parte las conexiones con mayores anchos de banda hacen que la pérdida de información pueda ser significativa si no se hace una recuperación en el tiempo adecuado en caso de falla. Por tanto es imperativo para las redes GMPLS proveer mecanismos para la protección y restauración del tráfico.

Las ideas básicas de MPLS son:

- Separar la información de transporte (etiqueta) del contenido de los encabezados IP. Esta separación permite a MPLS ser utilizado sobre dispositivos tales como OXCs, cuyos planos de datos no pueden reconocer encabezados IP.
- Utilizar un solo paradigma de transporte (intercambio de etiquetas), y múltiples paradigmas de enrutamiento. Los Enrutadores de Conmutación de Etiquetas (LSR, Label Switching Routers) transportan los datos utilizando la etiqueta llevada por estos. Esta etiqueta, junto con el puerto por el cual se reciben los datos, se utiliza para determinar su puerto y la etiqueta de salida.
- El plano de control MPLS opera en términos de la abstracción de los paradigmas de intercambio y transporte de etiquetas, y el plano de datos MPLS permite realizar múltiples enlaces específicos en esta abstracción. Una longitud de onda podría ser vista como una etiqueta implícita.
- Dar flexibilidad para formar Clases Equivalentes de Transporte (FEC, Forwarding Equivalence Class).
- Generar una jerarquía de transporte mediante apilamiento de etiquetas (label stacking). Esto permite la interacción con dispositivos que pueden soportar solamente

un espacio pequeño de etiqueta. Esta propiedad de MPLS es esencial en el contexto de OXCs y DWDM.

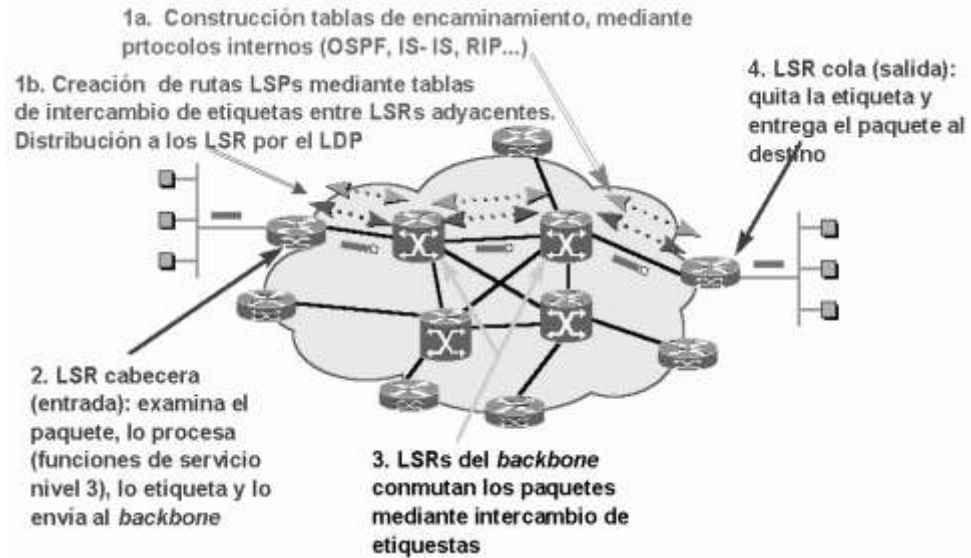


Figura 2.5. Funcionamiento de una red MPLS

Las extensiones de OSPF e IS-IS permiten a los nodos intercambiar información sobre enrutamiento y las políticas en la red. Esta información es usada por la heurística Primero el Camino más Corto Forzado (CSPF, Constrained Shortest-Path-First), para calcular trayectos sujetos a recursos específicos y/o restricciones de política, los cuales son luego establecidos en un Trayecto de Conmutación de Etiquetas (LSP, Label Switching Path) mediante RSVP-TE o CR-LDP. El plano de datos MPLS es utilizado para transportar los datos a lo largo de los LSPs establecidos.

El enrutamiento basado en restricciones se utiliza hoy en día para dos propósitos: proveer Ingeniería de Tráfico y reenrutamiento rápido a la red. El enrutamiento basado en restricciones de IP/MPLS puede reemplazar a ATM como mecanismo para obtener Ingeniería de Tráfico en el transporte de información. Asimismo, el reenrutamiento rápido ofrece una alternativa para SDH/SONET como un mecanismo de protección/restauración.

Las futuras evoluciones de las tecnologías MPLS, y las mejoras GMPLS, son varias sinergias emergiendo entre LSRs y OXCs, y entre un LSP y un trayecto óptico. Un trayecto óptico es una ruta óptica establecida de extremo a extremo. Al igual que un LSR realiza la conmutación de etiquetas, un OXC direcciona las longitudes de onda de un puerto de entrada a uno de salida. El establecer un LSP involucra la configuración de cada LSR intermedio para mapear una etiqueta y puerto de entrada particular a una etiqueta y puerto de salida. El proceso de establecer un trayecto óptico involucra la configuración de cada OXC intermedio para mapear cada lambda y puerto de entrada. Como en los LSRs,

los OXC necesitan protocolos de enrutamiento como OSPF o IS-IS para intercambiar topología de estado de enlace y otros cálculos de trayecto. Se necesitan protocolos como RSVP y LDP para automatizar el proceso de establecimiento de trayecto.

2.3.2 Adaptaciones a MPLS

El enrutamiento IP ha evolucionado para incluir nuevas funcionalidades bajo MPLS. Ahora, se busca extender MPLS como un plano de control que puede utilizarse no solamente con enrutadores, sino que además con equipo de redes existentes (SDH/SONET, ATM) y dispositivos más nuevos como los OXCs. El plano de control común se compone de los protocolos de enrutamiento y señalización ya probados y las nuevas extensiones para el soporte de GMPLS.

Se requieren algunas modificaciones y adiciones para que los protocolos de enrutamiento y señalización MPLS se adapten a las peculiaridades de los conmutadores ópticos.

- Un nuevo Protocolo de Gestión de Enlace (LMP), diseñado para direccionar asuntos relacionados con la gestión de enlace en redes ópticas, utilizando OXCs.
- Mejoras a los protocolos de enrutamiento OSPF/IS-IS para anunciar la disponibilidad de recursos ópticos en la red.
- Mejoras a los protocolos de señalización RSVP/CR-LDP para propósitos de ingeniería de tráfico que permitan a un LSP (label-switched path) ser explícitamente especificado a través del núcleo óptico.
- Mejoras en la escalabilidad, tales como formación jerárquica de LSP, agrupamiento de enlaces y enlaces no numerados.
- El uso de las Adyacencias de Envío (FA, Forward Adjacencies) proporciona un mecanismo que puede mejorar la utilización del ancho de banda cuando este sólo puede ser asignado en unidades discretas, así como un mecanismo para agregar el estado de envío, permitiendo reducir el número de etiquetas requeridas.
- GMPLS permite a un nodo sugerir una etiqueta en la solicitud de establecimiento de un LSP para reducir el tiempo de latencia.
- GMPLS amplía el concepto de restricción del rango de etiquetas que puede ser seleccionado por el nodo de bajada. Este mecanismo es útil en redes ópticas donde la conversión de longitud de onda puede no estar disponible.
- GMPLS soporta el establecimiento de LSPs bidireccionales.
- GMPLS con RSVP-TE soporta un mecanismo específico de RSVP para la rápida notificación de fallos.

2.3.3 Tipos de conmutación y jerarquía LSP

2.3.3.1 Tipos de conmutación

GMPLS difiere del MPLS tradicional en el soporte de múltiples tipos de conmutación, como conmutación TDM, de lambda y fibra (puerto). Para dar este soporte, GMPLS debió ampliar determinadas funciones básicas, y en algunos casos añadir funcionalidad, que en consecuencia han alterado las propiedades básicas del trayecto LSP y su naturaleza unidireccional, la forma en que se solicitan y comunican las etiquetas, como se propagan los errores, y la información suministrada para la sincronización de los enrutadores LSR de entrada y salida.

Un enlace se conecta a un nodo mediante una interfaz. GMPLS soporta diferentes tipos de interfaces que pueden tener diferentes capacidades de conmutación. La capacidad de conmutación de la interfaz introduce una nueva restricción para el cálculo de trayectorias y señalización. Al realizar el establecimiento de un LSP en GMPLS, este debe comenzar y terminar en el mismo tipo de interfaz para así poder distribuir la información dentro de la red. A continuación presentamos los diferentes tipos de interfaz con capacidad de conmutación existentes en el estándar GMPLS.

- **Interfaz con capacidad de conmutación de paquetes (Packet Switch Capable -PSC):**

Son interfaces que reconocen los límites de paquetes y pueden remitir los datos basándose en el contenido del encabezado del paquete. Los ejemplos incluyen interfaces sobre los enrutadores que reenvían datos basados en el contenido del encabezado IP y las interfaces de los enrutadores que conmutan datos basados en el contenido del encabezado MPLS.

- **Interfaz con capacidad de conmutación Nivel 2 (Layer-2 Switch Capable - L2SC):**

Son interfaces que reconocen límites de trama/celda y pueden conmutar datos basándose en el contenido del encabezado de trama/celda. Como ejemplos, están las interfaces sobre los enlaces Ethernet que conmutan datos basados en el contenido del encabezado MAC, e interfaces sobre LSRs-ATM que reenvían datos basados en los VPI/VCI ATM

- **Interfaz con capacidad de conmutación TDM (Time-Division-Multiplex Capable -TDM):**

Son interfaces que conmutan datos basándose en la información de los intervalos de tiempo en un ciclo repetitivo. Ejemplos de estas interfaces son los Cross-Conectores, Multiplexores Terminales (TM, Terminal Multiplexer), o Multiplexores de Inserción/Extracción (ADM, Add/Drop Multiplexer) de SONET/SDH. Otros ejemplos incluyen interfaces que proveen capacidades G.709 TDM e interfaces PDH.

- **Interfaz con capacidad de conmutación de Lambdas (Lambda Switching Capable -LSC):**

Son interfaces que conmutan datos basándose en la información de la longitud de onda en la cual son recibidos. Ejemplos de esta interfaz son el Cross conector Fotónico (PXC, Photonic Cross Conect) o el Cross conector óptico (OXC), que pueden operar a nivel de longitud de onda individual. Adicionalmente se incluyen interfaces PXC que pueden operar a nivel de un grupo de longitudes de onda.

- **Interfaz con capacidad de conmutación de fibras (Fiber Switch Capable - FSC):**

Son interfaces que conmutan datos basándose en la posición de los datos en los espacios físicos (puertos). Un ejemplo de estas interfaces son el PXC o el OXC, que pueden operar en el nivel de una sola o múltiples fibras.

Dependiendo de la tecnología empleada en cada interfaz, se pueden nombrar los distintos circuitos en uso, circuito SDH, trayecto óptico, trayecto de luz, etc. En el contexto GMPLS, todos estos circuitos se nombran con un nombre común: Trayectos de Conmutación de Etiquetas (LSPs, Label Switching Paths).

Es de esperar tener muchos menos etiquetas en los enlaces TDM, LSC o FSC, que en los enlaces PSC o L2SC, porque las primeras son etiquetas físicas en lugar de etiquetas lógicas.

2.3.3.2 Jerarquía de LSPs

Considerando un LSP como un enlace en la base de datos de estado del enlace de IS-IS o OSPF, el concepto de trayecto LSP anidado (un trayecto LSP dentro de otro LSP), que ya es introducido en MPLS tradicional, facilita la construcción de una jerarquía de envío. Esta jerarquía de caminos LSP puede estar en una misma interfaz o entre distintas interfaces.

Los LSPs GMPLS que entran al dominio de transporte óptico en el mismo nodo y salen del dominio en el mismo nodo, pueden ser agregados y entunelados dentro de un solo LSP óptico. Esta agregación ayuda a conservar el número de longitudes de onda usadas en el dominio GMPLS.

La jerarquía LSP ayuda a tratar con la naturaleza discreta del ancho de banda óptico. Por ejemplo, cuando un LSP óptico es configurado, este toma un ancho de banda discreto (2.5 Gbps.). Cuando este LSP óptico es tratado como un enlace, este ancho de banda del enlace ya no necesita ser discreto. Un LSP MPLS de 100 Mbps. que cruza el dominio óptico de transporte puede ser entunelado a través del LSP de transporte óptico, dejando 2.4 Gbps. para otros LPSs MPLS. El asignar 2.5 Gbps. para cada LSP MPLS que cruce la red óptica podría ser poco práctico.

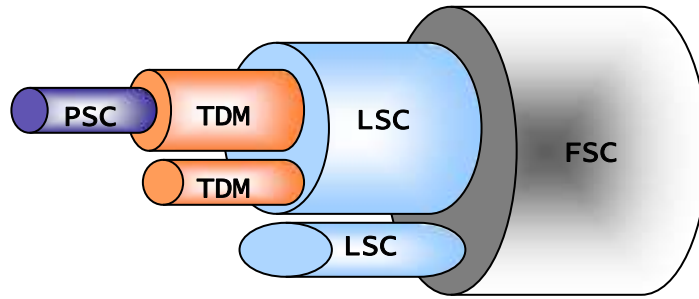


Figura 2.6. Jerarquía de LSPs.

Existe una jerarquía natural que dicta el orden en el cual los LSPs pueden ser anidados. Esta jerarquía está basada en las capacidades de multiplexación de los tipos de LSP que ya fueron descritos, y que se indica en la figura 2.6. En la parte superior de la jerarquía están los nodos que tienen interfaces con capacidad de conmutación de fibra (FSC), seguidos por los nodos que tienen interfaces con capacidad de conmutación de lambdas (LSC), luego los nodos que tienen interfaces con capacidad (TDM) y seguidos finalmente por nodos con interfaces con capacidad de conmutación de paquetes (PSC).

En una configuración típica, el núcleo de la nube de interfaces/nodos FSC están conectados a una nube externa de interfaces/nodos LSC. Estos a su vez están conectados a una nube externa de nodos con capacidades TDM, los cuales están finalmente conectados a los enrutadores. Este esquema de nubes según la jerarquía de los LSPs puede observarse en la figura 2.7. La difusión de esta información es esencial para que los trayectos dentro de las nubes puedan ser generados automáticamente con configuración manual mínima.

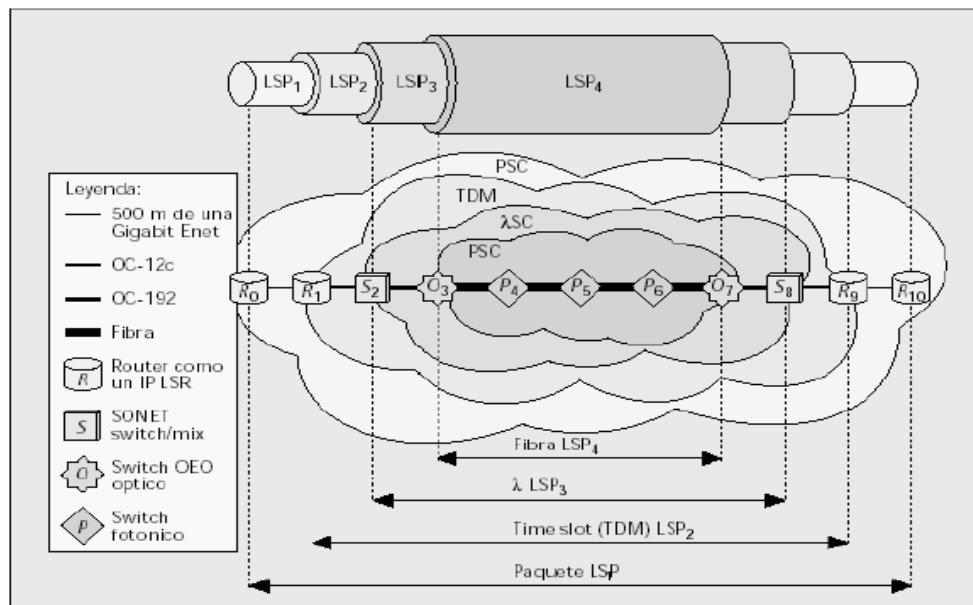


Figura 2.7. Esquema de nubes según la jerarquía de LSPs

Los LSPs aparecen como nuevos tipos de enlace en la base de datos de enrutamiento; los nuevos tipos de enlace son compatibles con métodos de intercambio utilizados para compartir información convencional del enlace. Debido a este intercambio, cada nodo tiene una base de datos de estado de enlace idéntica con información sobre los enlaces convencionales, además de información sobre los LSPs. Un nodo, cuando realiza el cálculo de trayecto, es capaz de usar no solamente enlaces convencionales, sino también LSPs con restricciones apropiadas, permitiendo el escalamiento jerárquico de la base de datos de estado de enlace. Una vez un trayecto es calculado, el nodo utiliza mecanismos de señalización para establecer la relación de la etiqueta a lo largo del trayecto.

Por otra parte, es importante anotar que los LSPs pueden crearse como un enlace primario o secundario (respaldo). El protocolo de señalización de GMPLS lleva una bandera que indica si el LSP que va a establecerse es primario o secundario. Los recursos asignados para el LSP de respaldo no se usan hasta que el LSP primario falle. Puesto que la asignación de recursos tiene prioridades (que van en el protocolo de señalización), los recursos asignados para el LSP secundario pueden usarse por un LSP que tiene menor prioridad, hasta que el enlace de mayor prioridad falle y el tráfico de este deba ser conmutado sobre el LSP de respaldo, anulando los LSPs que en ese momento están utilizando los recursos del LSP secundario.

2.3.3.3 Etiquetas en redes ópticas

En MPLS no generalizado, una etiqueta es un número (hasta 32 bits) que queda escrito en los campos de encabezado de protocolo en los paquetes de datos que viajan en el enlace. Una vez un par de LSRs han acordado este número, ellos también aceptan que el flujo de datos correspondiente consiste de todos los paquetes de datos con este número en el campo de encabezado de protocolo apropiado, y conmutarán todos los paquetes en este flujo en la misma forma.

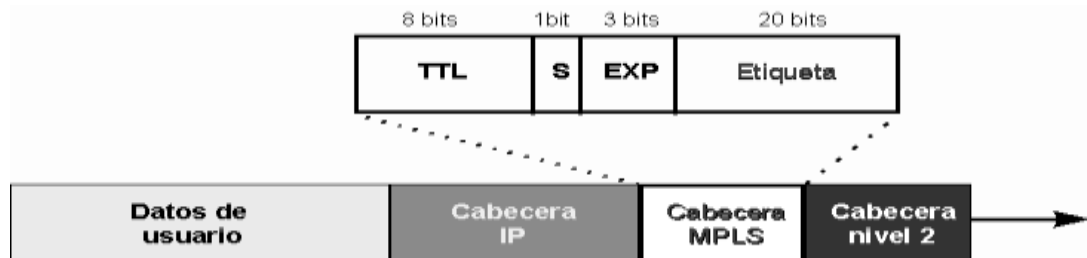


Figura 2.8. Estructura de la cabecera genérica MPLS.

Esta clase de etiqueta no necesariamente implica una relación con la asignación de ancho de banda o calidad de servicio (QoS) para el correspondiente flujo de datos. El valor de la etiqueta podría no implicar nada sobre que tan frecuentemente los paquetes con esa etiqueta pueden arribar o que ancho de banda esta disponible.

Los protocolos de ingeniería de tráfico para la distribución de etiquetas (tales como RSVP y CR-LDP) facilitan la negociación de QoS y ancho de banda como parte del intercambio de etiquetas. Otros protocolos, como LDP, simplemente intercambian etiquetas.

GMPLS generaliza la idea de que una etiqueta es suficiente para identificar un flujo de tráfico. De esta forma, extiende la representación de una etiqueta desde un número simple de 32 bits a un arreglo de bytes con longitud arbitraria e introduce el Objeto de Etiqueta Generalizada (Generalized Label Object, en RSVP) y el TLV de Etiqueta Generalizada (Generalized Label TLV, en CR-LDP), para transportar tanto la etiqueta como su información relacionada. Pueden ser representadas con etiquetas GMPLS diferentes cantidades de conmutación utilizadas en redes ópticas:

- Etiquetas de fibra completa: Un enlace puede consistir de un grupo de fibras ópticas, pudiéndose escoger la asignación de toda una fibra a un flujo de datos, simplemente al acordar cual fibra utilizar.
- Etiquetas de longitud de onda: El ancho de banda de una fibra óptica es subdividido por WDM; puede escogerse el asignar una sola longitud de onda, o lambda, a un flujo de datos requerido.
- Etiquetas de bandas de longitudes: Las longitudes de onda consecutivas son agrupadas en una banda de longitudes, para que todas sean conmutadas de la misma forma, la etiqueta es una "identificación de banda de longitudes" y un par de números indicando las longitudes más alta y más baja de la banda seleccionada.
- Etiquetas de Intervalos de Tiempo: Donde el ancho de banda de una fibra óptica o una longitud de onda es subdividido en intervalos de tiempo por TDM. Un conmutador óptico puede satisfacer un requerimiento de flujo de datos particular por la asignación de uno o más intervalos de tiempo a ese flujo, por lo cual el valor de etiqueta TDM debe ser suficiente para especificar los intervalos de tiempo asignados. Los detalles exactos de la representación de etiquetas TDM depende de la jerarquía TDM en uso, por ejemplo SDH o SONET.

2.3.3.4 Enrutamiento y direccionamiento en GMPLS

GMPLS se basa en IP para hacer el enrutamiento y el direccionamiento, lo que significa que los protocolos de enrutamiento distribuidos tradicionales también se utilizan, para descubrir a través de ellos, la topología y el estado de los recursos de todos los enlaces en un dominio. Cada dominio de enrutamiento puede estar dividido en áreas. Un RD (Routing Domain) se compone de nodos habilitados para GMPLS. Estos nodos pueden ser nodos de frontera o LSRs internos.

Dado que en las capas TDM, LSC y FSC se pueden tener varios cientos de enlaces físicos paralelos que conectan dos nodos, se generan nuevas restricciones en los modelos de direccionamiento y enrutamiento IP.

Para el direccionamiento se pueden utilizar direcciones IPv4 y/o IPv6, las cuales no tienen porque estar situadas en el mismo espacio de direccionamiento que las direcciones

públicas utilizadas en Internet. Se pueden utilizar las direcciones IP privadas si no tienen que ser intercambiadas con ningún otro operador, o en caso contrario, se requieren direcciones IP públicas. Si se utiliza un modelo integrado, dos capas pueden utilizar el mismo espacio de direccionamiento. Por tanto, a pesar de contar con un gran rango de direcciones, se hace casi imposible asociar una dirección IP a cada extremo de cada enlace físico para representarlo como una adyacencia de enrutamiento distinta y para anunciar y mantener el estado de enlace para cada uno de estos. Con este propósito, GMPLS amplía los modelos de enrutamiento y direccionamiento aumentando su escalabilidad.

GMPLS define extensiones a los protocolos de enrutamiento intra-dominio OSPF e IS-IS, y en los protocolos de señalización (RSVP-TE y CR-LDP), las cuales son necesarias para diseminar características estáticas y dinámicas relacionadas con los nodos y los enlaces.

Se pueden utilizar dos mecanismos para aumentar la escalabilidad del direccionamiento y enrutamiento: Enlaces no numerados y agrupamiento de enlaces, los cuales pueden ser combinados.

2.3.3.4.1 Enlaces no numerados

Como se sabe, uno de los asuntos fundamentales en el enrutamiento es el direccionamiento, y la IETF sugiere un esquema de direccionamiento donde se utiliza una dirección IP para identificar un nodo (como una ID de enrutador), y un "selector" para identificar información más específica dentro de cada nodo.

Un enlace numerado es aquel donde sus interfaces son direccionadas por IP, y un enlace no numerado es lo contrario, es decir, significa que sus interfaces no están direccionadas con IP. En las redes ópticas, las fibras conectan OXCs como enlaces punto a punto, los cuales no necesitan ser numerados. En este caso, el enrutador (o un OXC) que conecta un enlace no numerado puede asignar un identificador que lo caracterizará de manera unívoca y que es significativo de manera local. Este identificador local es un *identificador remoto* desde el punto de vista de otro OXC que está conectado por el mismo enlace no numerado.

Un ejemplo de esto se muestra en la figura 2.9. El OXC A y el OXC B están conectados por el enlace no numerado L. El OXC A asigna un identificador L1 a L, el cual es un *identificador local* para A; y el OXC B asigna un identificador L2 a L, que también es el identificador local para B. Cuando el protocolo de enrutamiento intercambia la información entre dos enrutadores, L1 es un *identificador remoto* para B y así mismo L2 es un identificador remoto para A. El enlace puede ser identificado de manera única a nivel global por <ID de enrutador, identificador del enlace no numerado(local)>. Debe tenerse en cuenta que el ID del enrutador es siempre una dirección IP.

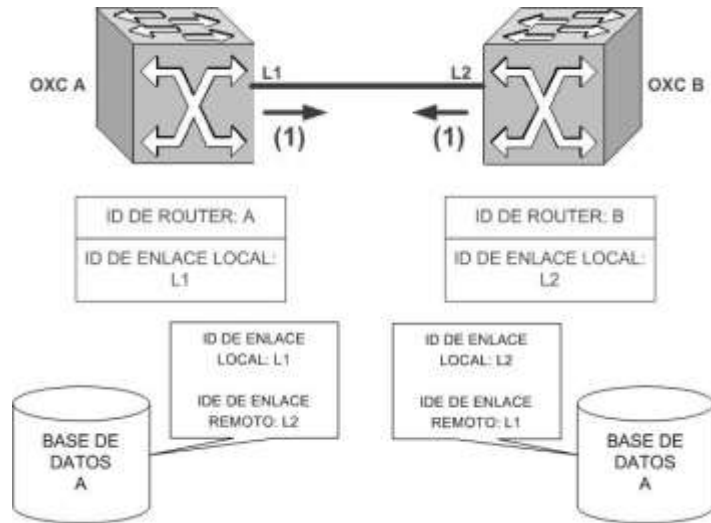


Figura 2.9. Identificación de un enlace no numerado

Se asume que un enrutador de frontera que tiene conectividad física con un OXC, es capaz de proveer conversión de datos óptico-eléctrico. Un enrutador de frontera entre una red óptica y una red IP tiene interfaces para conectarse a los OXC y a los enrutadores regulares IP (como se muestra en la figura 2.10). Supongamos que el enlace F entre el OXC y el enrutador de frontera es una fibra óptica, y que el enlace entre el enrutador IP y el enrutador de frontera es un enlace regular, como por ejemplo un enlace Ethernet. Cuando apenas arranca, el enrutador de frontera sabe que la fibra óptica F se conecta por la interfaz I_1 a un OXC, haciendo un reconocimiento de vecinos. Por otra parte, sabe también que el enlace Ethernet se conecta mediante la interfaz I_2 a un enrutador IP, haciendo un reconocimiento de vecinos. Cuando el enrutador de frontera crea su relación de adyacencia con sus vecinos, entiende qué parámetros, opciones y extensiones de protocolos va a utilizar. De esta manera, el protocolo de enrutamiento enviará mensajes de advertencia con los identificadores del enlace no numerado para identificar al enlace F, y otros mensajes de advertencia con las direcciones IP para el enlace L.



Figura 2.10. El enrutador de frontera debe saber sobre los enlaces.

- **Adyacencias de enrutamiento no numeradas**

Un LSR utiliza los procedimientos GMPLS TE para crear y mantener un LSP. El LSR puede entonces (bajo el control de configuración local), anunciar este LSP como un enlace con Ingeniería de Tráfico (TE) dentro de la misma instancia del plano de control de GMPLS (o

mas precisamente, su componente ISIS/OSPF), indicando que fue el utilizado para crear el LSP. A este enlace se le llama Enlace de Adyacencias de Envío (Forward Adjacency link), descrito como FA-LSP.

Si un LSR que origina un LSP anuncia que este LSP es una adyacencia de envío no numerada en IS-IS o OSPF, o utiliza esta FA como un enlace no numerado que forma parte de un enlace agrupado, debe asignarle un identificador de interfaz (Interfaz ID) a dicha FA. Si el LSP es bidireccional, el otro extremo hace lo mismo y asigna un identificador de interfaz a la FA inversa. Por lo tanto, se modifica la señalización para poder transportar el identificador de interfaz de una FA.

2.3.3.4.2 Agrupación de enlaces

La base de datos de estado de enlace contiene toda la información referente a todos los nodos y enlaces en una red, junto con los atributos de cada enlace. Esta base de datos para una red óptica puede fácilmente ser de una magnitud mucho más grande que la de una red MPLS. Para realizar el direccionamiento con un proceso más eficiente, se unen los atributos de enlace de varios enlaces paralelos con características similares, y se asignan en conjunto a un solo enlace "agrupado". Así, el tamaño de la base de datos se reduce en un gran factor, conduciendo al escalamiento ampliamente perfeccionado del protocolo de estado de enlace.

Por tanto, se puede concluir que cuando se conectan un par de LSPs mediante múltiples enlaces es posible publicar varios (o todos) enlaces como un único enlace en OSPF y/o IS-IS. Este proceso es denominado agrupación de enlaces (Link Bundling) o simplemente agrupación (Bundling). Al enlace lógico resultante se le denomina enlace agrupado (Bundled Link) y sus enlaces físicos son los enlaces componentes (Component Links), identificados por los índices de la interfaz.

Adicionalmente, al tener varios enlaces en un enlace agrupado, parte de la información de estos se pierde. No obstante, el mejorar la escalabilidad significativamente valdrá más que la información que se pierda. Además, mientras el protocolo de estado de enlace transporte un solo enlace agrupado, la señalización requiere que sean identificados los enlaces individuales que lo componen.

LMP ofrece una forma de lograr esto. Todos los enlaces en una red MPLS son típicamente asignados con una dirección IP. Cuando un trayecto es calculado a través de la red, los enlaces que constituyen el trayecto son identificados por sus direcciones IP; esta información es dada a conocer al protocolo de señalización, el cual entonces configura el trayecto. De esta forma, podría parecer que cada enlace debe tener una dirección IP. Sin embargo, esto no es siempre fácil, y se utilizan enlaces sin numeración para resolver este problema. De cualquier forma, si una dirección IP no se utiliza para identificar un enlace, una dirección alternativa debe sustituirla.

Ahora, para identificar enlaces agrupados en una red, se usa una combinación de los tres identificadores (identificador de enlace (agrupado), identificador de enlace componente y etiqueta), lo cual es suficiente para identificar el recurso utilizado por un LSP sin ambigüedad. Dicha información es transportada por los protocolos de enrutamiento (OSPF e IS-IS).

Finalmente, el propósito de la agrupación de enlaces es mejorar la escalabilidad del enrutamiento al reducir la cantidad de información que tienen que manejar los protocolos OSPF o IS-IS.

- **Restricciones para la agrupación**

La agrupación de enlaces tiene algunas restricciones: todos los enlaces componentes en una agrupación deben empezar y terminar en el mismo par de LSRs, y compartir algunas características comunes o propiedades definidas en OSPF-TE y ISIS-TE, entre las que se encuentran:

- Tipo de enlace (por ejemplo, punto a punto o multi-acceso).
- Métrica TE (por ejemplo, un costo administrativo)
- Conjunto de Clases de Recursos en cada extremo de los enlaces.

Una FA también puede ser un enlace componente. De hecho, una agrupación puede consistir de una mezcla de enlaces punto a punto y FAs, pero todos compartiendo algunas propiedades comunes.

- **Consideraciones para la agrupación**

OSPF, RSVP, LMP y otros protocolos definen un método software para detectar fallas, el cual es llamado Mensajes Hello. La idea de este es simple: dos nodos intercambian un mensaje corto de manera periódica. Dicho intervalo puede ser configurado, y si un número de mensajes se pierde, entonces el nodo puede determinar que el otro nodo o el enlace está caído.

Un enlace agrupado es otra clase de enlace TE. El tiempo de vida de un enlace agrupado viene determinado por el tiempo de vida de cada uno de sus enlaces componentes, pues este se mantiene con vida mientras al menos uno de sus enlaces componentes siga vivo.

La vida de un enlace componente puede ser determinada de distintas maneras: Hellos de OSPF o IS-IS sobre el enlace componente, un Hello de RSVP (hop local), Hellos LMP (enlace local) o a partir de indicaciones de las capas 1 ó 2.

Una vez se ha determinado que un enlace agrupado está vivo, puede ser anunciado como un enlace TE y la información TE puede ser difundida. Si los Hellos de IS-IS/OSPF se ejecutan sobre los enlaces componentes, la difusión se puede restringir a sólo uno de los componentes.

Un nodo GMPLS con enlaces agrupados debe aplicar control de admisión en base de datos a cada uno de sus enlaces componentes.

- **Consideraciones de señalización**

En una ruta explícita de un LSP se elige el enlace agrupado que deberá utilizar el LSP, pero no el o los enlaces componentes, ya que la información de dichos enlaces no es difundida.

La elección del enlace componente a utilizar la realiza el nodo de subida. Si el LSP es bidireccional, el nodo de subida elige un enlace componente en cada dirección.

Existen tres mecanismos para comunicar esta elección al nodo de bajada:

- Indicación implícita. Este mecanismo requiere que cada enlace componente tenga un canal de señalización dedicado. El nodo de subida le dice al receptor qué enlace componente utilizar al enviar el mensaje sobre el canal de señalización dedicado de dicho enlace componente.
- Indicación explícita por identificador de interfaz numerado. Este mecanismo requiere que el enlace componente tenga una única dirección IP remota.
- Indicación explícita por identificador de interfaz no numerado. En este mecanismo se asigna un identificador de interfaz único a cada enlace componente no numerado.

Los dos últimos mecanismos no requieren que cada enlace componente tenga su propio canal de control. De hecho, ni siquiera es necesario que el enlace completo tenga su propio canal de control.

2.3.4 Gestión de enlaces

En GMPLS, un par de nodos pueden estar conectados por decenas de fibras, cada una con centenares de longitudes de onda (DWDM). Se pueden combinar múltiples fibras y/o longitudes de onda en uno a más enlaces agrupados con finalidades de enrutamiento. Para posibilitar la comunicación entre nodos para enrutamiento, señalización y gestión de enlaces, se deben establecer canales de control entre una pareja de nodos.

La gestión de enlaces se compone de una serie de procedimientos entre nodos adyacentes que proporcionan servicios locales como la gestión del canal de control, verificación de conectividad del enlace, correlación de la propiedad del enlace y gestión de fallos. El LMP se ha definido para realizar estas operaciones. LMP se inició en el contexto de GMPLS pero se compone de un conjunto de herramientas genéricas que pueden ser utilizadas en otros contextos.

La gestión del canal de control y correlación de propiedad del enlace son procedimientos obligatorios de LMP, mientras que la verificación de conectividad y gestión de fallos son opcionales.

2.3.4.1 Canal de control y gestión del canal de control

La gestión del canal de control de LMP se utiliza para establecer y mantener canales de control entre nodos. Los canales de control existen independientemente de los enlaces TE y pueden utilizarse para intercambiar información del plano de control de GMPLS como la señalización, enrutamiento e información de gestión del enlace.

Una adyacencia LMP se crea entre dos nodos que proporcionan las mismas capacidades LMP. Varios canales de control pueden estar activos simultáneamente en cada adyacencia. Actualmente, LMP asume que los canales de control están configurados explícitamente mientras que la configuración de las posibilidades del canal de control puede ser negociada dinámicamente. El o los canales de control entre dos nodos adyacentes no tienen por qué utilizar el mismo medio físico que los canales de datos entre dichos nodos. Como consecuencia, la disponibilidad de un canal de control no está relacionada necesariamente con la disponibilidad de los enlaces de datos y viceversa. En LMP se han desarrollado mecanismos para gestionar los enlaces orientados al aprovisionamiento de enlaces y al aislamiento de fallos.

LMP no especifica el mecanismo de transporte de la señalización que se utiliza en el canal de control, sin embargo señala que los mensajes que viajan por el canal de control tienen que ser codificados según IP.

Cada canal de control negocia sus parámetros individualmente y mantiene la conectividad utilizando un protocolo Hello rápido. Esto último es necesario si no se proporcionan mecanismos para la detección de fallos de enlaces a más bajo nivel.

El protocolo Hello consiste de dos fases: una fase de negociación y una fase para determinar si el enlace se mantiene vivo. La fase de negociación permite la negociación de algunos parámetros básicos del protocolo Hello, como la frecuencia Hello. La fase de mantenimiento de conexión (Keep-alive) consiste en el intercambio rápido de mensajes Hello bidireccionales.

2.3.4.2 Relaciones de propiedad de enlace

Este procedimiento permite añadir nuevos enlaces componentes a un enlace agrupado, cambiar el mecanismo de protección de un enlace, cambiar los identificadores de puerto o cambiar los identificadores de componentes en una agrupación.

Se define un intercambio de correlación de propiedad del enlace como parte de LMP. Este intercambio se utiliza para agregar múltiples enlaces de datos en un enlace agrupado y para intercambiar parámetros de un enlace TE.

2.3.4.3 Verificación de la conectividad de un enlace

La verificación de la conectividad de un enlace es un procedimiento opcional que puede utilizarse tanto para verificar la conectividad física de los enlaces de datos como para intercambiar los identificadores de enlace que se utilizan en la señalización GMPLS.

Se negocia la utilización de este procedimiento en la fase de negociación del protocolo Hello. Este procedimiento se debe llevar a cabo inicialmente, cuando se establece un enlace de datos y, a continuación, periódicamente para todos los enlaces de datos libres.

El procedimiento de verificación consiste en enviar mensajes de prueba sobre los enlaces de datos. Este mensaje es el único mensaje de LMP que se transmite por el enlace, mientras que los mensajes Hello se intercambian sobre el canal de control durante el proceso de verificación del enlace.

Para iniciar el procedimiento de verificación del enlace, un nodo debe notificar antes a los nodos adyacentes que va a empezar a transmitir mensajes de prueba sobre un enlace de datos en particular o sobre los enlaces componentes de un determinado enlace agrupado. El nodo también debe indicar el número de enlaces de datos que van a ser verificados, el intervalo al que se enviarán los mensajes de prueba, el esquema de codificación, los mecanismos de control soportados, tasa de datos de los mensajes y la longitud de onda sobre la que se transmitirán los mensajes, en el caso de que los enlaces sean fibras. Además, los identificadores locales y remotos de los enlaces agrupados se transmiten durante este proceso para realizar la asociación de enlaces componente con los identificadores del enlace agrupado.

2.3.4.4 Gestión de fallos

En la gestión de fallos se suele incluir la detección, localización y notificación de fallos.

La localización de fallos puede utilizarse para soportar algún mecanismo local específico de protección/restauración.

LMP proporciona un procedimiento para la localización de fallos, notificando un fallo hacia el nodo de subida de dicho fallo. Un vecino LMP de bajada que detecta fallos en un enlace de datos, enviará un mensaje LMP a su vecino de subida notificándole el fallo. Cuando un nodo de subida recibe esta notificación puede verificar el fallo con los distintos puertos de entrada para determinar si se encuentra entre los dos nodos. Una vez se ha detectado el fallo, se pueden utilizar los protocolos de señalización para iniciar procedimientos de protección/restauración del enlace o camino.

2.3.4.5 LMP para sistemas de línea óptica (OLSs) DWDM

En un entorno totalmente óptico, LMP se centra en las comunicaciones al mismo nivel, por ejemplo, de un OXC a otro. El multiplexor terminal DWDM, también denominado Sistema óptico de línea (OLS, Optical Line System) tiene una gran cantidad de información sobre un enlace entre dos OXCs. Se puede mejorar la utilización de la red trasladando esta información al plano de control, consiguiendo reducir las configuraciones manuales requeridas y ampliando en gran medida la detección y recuperación ante fallos.

La detección de fallos es un elemento clave cuando se utilizan conmutadores PXC. Una vez la conexión ha sido establecida, los PXC tienen visibilidad limitada sobre el estado de dicha conexión. En los OLSs típicamente se terminan los canales eléctricamente y se regeneran ópticamente, lo que presenta una oportunidad para monitorizar el estado de un canal entre PXC. La extensión de LMP para WDM (LMP-WDM) puede ser utilizada en estos casos por el OLS para proporcionar esta información al PXC. LMP-WDM define extensiones a LMP para su utilización entre un OXC y un OLS.

LMP-WDM también soporta el envío de información conocida por el OXC al OLS. Esta información puede ser útil para la gestión de alarmas y monitoreo del enlace, ya que el OXC conoce el estado administrativo de una conexión. Este estado puede ser utilizado para suprimir alarmas espurias. El OXC puede inhibir la notificación de alarma del OLS cuando una conexión está inactiva, en prueba o que está siendo eliminada.

Existen muchas similitudes entre una sesión LMP OXC-OXC y una sesión LMP OXC-OLS, particularmente para la gestión del control y verificación del enlace. Sin embargo también existen algunas diferencias atribuidas generalmente a la naturaleza del enlace OXC-OLS y al propósito de las sesiones LMP OXC-OLS. Los enlaces OXC-OXC pueden utilizarse para proporcionar las bases de la señalización y enrutamiento GMPLS en la capa óptica. La información intercambiada en las sesiones LMP-WDM se utiliza para aumentar el conocimiento sobre los enlaces entre OXCs. Un OXC puede relacionarse con uno o más OLSs al igual que un OLS puede comunicarse con uno o más OXCs.

2.3.5 Señalización Generalizada

Como se dijo anteriormente, la señalización GMPLS extiende ciertas funciones básicas de los protocolos de señalización RSVP-TE y CR-LDP, y en algunos casos, añade funcionalidades, afectando las propiedades básicas de los LSPs.

La especificación de la señalización GMPLS se compone de tres partes:

- Una descripción de la funcionalidad de la señalización.
- Extensiones RSVP-TE.
- Extensiones CR_LDP.

La señalización GMPLS define sobre MPLS-TE los siguientes bloques constructivos:

- Un nuevo formato de solicitud de etiqueta genérico.
- Etiquetas para las interfaces TDM, LSC y FSC, llamada Etiqueta Generalizada.
- Soporte para la conmutación de una banda de longitudes de onda.
- Sugerencia de etiqueta por el canal de subida con propósitos de optimización.
- Restricción de etiquetas por el canal de subida para soportar restricciones ópticas.
- Establecimiento de LSPs bidireccionales con resolución de contiendas.
- Extensiones para la notificación de fallos rápida.
- Información de protección centrándose actualmente en la protección del enlace más indicación de LSP primario y secundario.
- Enrutamiento explícito con control explícito de etiquetas para un grado de control fino.
- Parámetros específicos de tráfico por tecnología.
- Manejo del estado administrativo del enlace.

GMPLS es una arquitectura genérica con muchas opciones. Sólo los bloques constructivos 1,2 y 10 son obligatorios y sólo dentro del formato específico requerido. Los bloques 6 y 9 normalmente deben ser implementados. Los bloque constructivos 3, 4, 5, 7, 8 y 11 son opcionales.

Una red por conmutación de longitud de onda típica implementaría los bloques constructivos 1, 2, 4, 5, 6, 9, 10 y 11. El bloque 3 sólo sería necesario en la conmutación por grupos de longitudes de onda (waveband switching).

GMPLS no especifica ningún perfil para las implementaciones RSVP-TE y CR-LDP, excepto para el que está directamente relacionado a los procedimientos GMPLS, es el fabricante el que tiene que decidir cuales son los elementos opcionales y los procedimientos de dichos protocolos que necesita implementar.

A continuación haremos una descripción general de algunas de las mejoras que GMPLS ha introducido en los protocolos de señalización RSVP-TE y CR-LDP.

2.3.5.1 Sugerencia de etiqueta

La señalización GMPLS permite que una etiqueta sea sugerida por un nodo de subida. El concepto de etiqueta sugerida permite a un nodo de subida, a lo largo de un trayecto de servicio, comenzar configurando su hardware con la etiqueta sugerida antes de que el nodo de bajada comunique una etiqueta para esto. Esta sugerencia es una optimización que puede ser obviada por un nodo de bajada, lo que significa que el tiempo de configuración de LSP será mayor, además de que la asignación de recursos de red no sea muy óptima.

Si un nodo de bajada rechaza la etiqueta sugerida, y pasa una etiqueta diferente al nodo de subida, éste último debe aceptar la etiqueta especificada por el nodo de bajada, manteniéndose así el control del nodo de bajada sobre la asignación de etiquetas. En esa situación, el núcleo de conmutación es configurado en la dirección inversa, y la etiqueta

que compromete la operación y propagación de los mensajes de subida, puede necesitar ser suspendido a cada salto para establecer un trayecto de transporte utilizable.

La etiqueta sugerida es particularmente valiosa cuando se desea establecer un LSP bidireccional utilizando interfaces pares de transmisión y recepción para el mismo puerto físico, o cuando se desea establecer un LSP que transita por ciertas clases de equipos de conmutación óptica donde hay alguna latencia asociada con la configuración del núcleo de conmutación. También es útil en subredes ópticas con capacidad de conversión de longitud de onda limitada, donde la asignación de longitud de onda puede ser ejecutada por el nodo de origen de un LSP óptico para minimizar la probabilidad de bloqueo.

2.3.5.2 Restricción de etiquetas por el canal de subida

Un nodo de subida puede, opcionalmente, restringir (o limitar) la selección de una etiqueta por parte del nodo de bajada a un conjunto de etiquetas aceptables. Se pueden proporcionar listas y/o rangos inclusivos o exclusivos de etiquetas en un objeto llamado *Conjunto de etiquetas* (Label Set). Si no se utiliza este mecanismo, se pueden utilizar todas las etiquetas del rango válido. Existen al menos cuatro casos en los que la restricción de etiquetas puede ser útil en el dominio óptico:

- Cuando el equipo del extremo sólo es capaz de transmitir y recibir un pequeño conjunto de bandas de longitudes de onda.
- Cuando hay una secuencia de interfaces que no soportan la conversión de longitud de onda y requieren utilizar el mismo extremo a lo largo de una secuencia de saltos o incluso del camino entero.
- Cuando se desea limitar la cantidad de conversiones de longitud de onda para reducir la distorsión de las señales ópticas.
- Cuando los dos extremos de un enlace soportan conjuntos distintos de longitudes de onda.

El receptor de un objeto *Conjunto de etiquetas*, debe restringir su selección a una que pertenezca a dicho objeto. Este conjunto puede estar presente a lo largo de múltiples saltos, caso en el cual cada nodo genera su propio conjunto de etiquetas de salida, basado probablemente en el conjunto de entrada y en las capacidades hardware del nodo.

2.3.5.3 LSPs bidireccionales

Los LSPs ópticos (o lightpaths) bidireccionales son un requerimiento para muchos proveedores de servicio que operan redes ópticas, dado que ambas direcciones de un LSP tienen los mismos requerimientos de ingeniería de tráfico, incluyendo destino compartido, protección, restauración y requerimientos de recursos (latencia y jitter). En un LSP bidireccional hay un nodo iniciador, el nodo que comienza el establecimiento del LSP, y un nodo terminador, el nodo de destino del LSP.

En una arquitectura MPLS básica los LSPs son unidireccionales, así que para establecer un LSP bidireccional, dos LSPs unidireccionales en direcciones opuestas deben ser establecidos independientemente, acarreado las siguientes desventajas:

- La latencia para establecer un LSP bidireccional es el tiempo de señalización de ida y vuelta, más un retraso por el tránsito de señalización iniciador-terminador.
- Los costos operativos de control son el doble del costo en un LSP unidireccional, pues los mensajes de control deben ser generados por ambos segmentos del LSP bidireccional.
- Los recursos son establecidos en segmentos separados; la selección de ruta puede ser muy complicada, disminuyendo la probabilidad global del establecimiento exitoso de la conexión bidireccional.
- Los equipos SDH/SONET existentes transmiten la información de control en banda utilizando los bytes de overhead. Las conexiones deben permanecer en pares y el establecimiento bidireccional es altamente deseable en este caso.

Para evitar esto, GMPLS establece métodos adicionales que han sido definidos para permitir a los trayectos de datos de bajada y subida de los LSPs bidireccionales ser establecidos utilizando un solo conjunto de mensajes de requerimiento de trayecto y reservación de recursos. Esto reduce la latencia de configuración a esencialmente un tiempo de ida y vuelta iniciador-terminador más el tiempo de procesamiento, y limita los costos operativos de control del mismo número de mensajes como en un LSP unidireccional.

2.3.5.4 Notificación rápida de fallos

GMPLS define varias extensiones de señalización que permiten la notificación explícita de fallos y otros eventos a los nodos responsables de la restauración de los LSPs y el manejo de errores.

2.3.5.4.1 Conjunto de etiquetas aceptables para la notificación de un error de etiqueta

Un mensaje de error típico es el de un valor de etiqueta no aceptable. Cuando esto ocurre, puede ser útil que el nodo que genera el mensaje de error incluya un conjunto de etiquetas aceptable mediante el objeto *Conjunto aceptable de etiquetas* (Acceptable Label Set).

2.3.5.4.2 Mensajes de notificación

Un requerimiento clave para proporcionar fiabilidad es una rápida reacción ante los fallos de red con toma de decisiones de manera inteligente. Como parte de la notificación de fallos, un nodo con conexiones de tránsito debe poder notificar a los nodos responsables

de la restauración de las conexiones cuándo ocurre un fallo, sin que los nodos intermedios procesen estos mensajes ni modifiquen el estado de las conexiones afectadas. El procesamiento innecesario de los mensajes en los nodos intermedios podría retrasar la notificación e incluso alterar el estado de la conexión en los mismos.

Se añadió el mensaje Notificación al protocolo de señalización RSVP-TE para poder informar a los nodos no adyacentes de los fallos relacionados con el LSP. Este mensaje no reemplaza a los mensajes de error existentes en RSVP, sin embargo, se diferencia de estos en que puede ser destinado a cualquier otro nodo aparte del vecino de subida o bajada inmediato.

Una aplicación importante del mensaje Notificación es indicar fallas en el plano de control aunque el plano de datos todavía funcione. En este caso, al enlace se le denomina "enlace degradado". La importancia de este mecanismo radica en el hecho de que en GMPLS los planos de control y de datos pueden encontrarse físicamente separados y fallar independientemente.

En muchos casos es inaceptable eliminar un LSP simplemente porque haya fallado el plano de control. Sin embargo, los fallos en el plano de control limitan las características de gestión proporcionadas por un LSP. Como parte del procedimiento de notificación, en el mensaje Notificación se identifica el LSP afectado y el recurso que ha fallado.

Debe aclararse que no se ha definido un mecanismo similar en el protocolo CR-LDP.

2.3.6 Técnicas de protección y restauración en GMPLS

Un requerimiento clave para el desarrollo de un plano de control común, tanto para redes ópticas como electrónicas, es la necesidad de mecanismos que permitan una gestión de fallos inteligente en los protocolos de señalización, enrutamiento y gestión de enlaces. A nivel de conexión la gestión de fallos consiste de cuatro partes:

- Detección
- Localización
- Notificación
- Corrección

La detección de fallas deberá ser manejada al nivel más cercano a la falla. Por ejemplo, una medida de detección de fallas en el nivel físico es la detección de pérdida de luz (loss of light, *LOL*); otras técnicas basadas en relación señal a ruido óptico (OSNR, Optical Signal to Noise Ratio), tasa de errores de bit ópticamente medido (BER, Bit Error Rate), dispersión, interferencia, y atenuación están aún siendo desarrolladas.

La localización de fallos requiere comunicación entre los nodos para determinar dónde ha ocurrido el fallo. Una consecuencia interesante de utilizar *LOL* para la detección de fallos

es que dicha LOL se propaga en el sentido de bajada a lo largo de todo el camino de la conexión, permitiendo a todos los nodos de bajada detectar el fallo.

El protocolo LMP incluye un procedimiento de localización de fallos diseñado para localizar fallos tanto en redes transparentes (ópticas totalmente) y opacas (opto-electrónicas). Este mecanismo se basa en el envío de mensajes de LMP entre nodos adyacentes sobre el canal de control, separado de los canales de datos. Esta separación del plano de control y de datos permite que se utilice un único conjunto de mensajes para la localización de fallos, independientemente del esquema de codificación del plano de datos.

Una vez se ha detectado y localizado el fallo se utiliza la protección y restauración para corregirlo. Como se ha mencionado antes, la diferencia entre protección y restauración se centra en las distintas escalas temporales en las que operan cada una. La protección requiere recursos preasignados y está diseñada para reaccionar rápidamente ante fallos (menos de un par de centenas de milisegundos). Por otra parte, la restauración se basa en el establecimiento dinámico de recursos y lo que puede tomar un tiempo mucho mayor que la conmutación de protección. La restauración también conlleva al cálculo dinámico de rutas, lo que puede ser costoso si los caminos de reserva no están preestablecidos o si los recursos precalculados ya no están disponibles.

La protección y la restauración se han abordado tradicionalmente utilizando dos técnicas: conmutación de trayecto y conmutación de línea. En la conmutación de trayecto la falla es tratada en los extremos del camino (nodos inicial y final), mientras que en la conmutación de línea la falla se trata en el nodo de tránsito en el que se detecta dicha falla.

La conmutación de trayecto puede ser subdividida en:

- Protección de trayecto (Path Protection), donde los trayectos de protección secundarios están preasignados.
- Restauración de trayecto (Path Restoration), donde las conexiones son reenrutadas, ya sea dinámicamente o utilizando trayectos precalculados.

La conmutación de línea es dividida en:

- Protección de tramos (Span Protections), donde el tráfico es conmutado a un canal o enlace paralelo alternativo que conecta los mismos dos nodos.
- Restauración de línea (Line Restoration), donde el tráfico es conmutado a una ruta alterna entre los dos nodos.

Para efectivamente usar protección, debe haber un mecanismo para:

- Distribuir las propiedades relevantes del enlace, tales como ancho de banda de protección y capacidades de protección.
- Establecer trayectos secundarios a través de la red.
- Conmutar la señal del trayecto primario a los trayectos secundarios, y de vuelta a los primarios cuando el problema haya sido resuelto.

Las capacidades de señalización de GMPLS permitirán a los proveedores de servicio construir rápidamente infraestructuras ágiles de alta capacidad que soporten aprovisionamiento rápido de servicios de conexión. Los proveedores de servicio pueden implementar, de manera incremental, productos basados en GMPLS en las redes existentes para disminuir los costos sin impactar la calidad de servicio. Además las capacidades de protección y restauración de GMPLS permiten el direccionamiento eficiente de la supervivencia de la red, mientras se abre la puerta a nuevos tipos de servicios en alguna solución que apunta a permitir grandes volúmenes de tráfico en una manera rentable para los proveedores de servicio.

2.3.6.1 Mecanismos de protección

Dentro de los mecanismos de protección se encuentran los siguiente:

- Protección 1+1. Los datos se transmiten simultáneamente sobre dos caminos separados y se utiliza un selector en el nodo de recepción para elegir la mejor señal.
- Protección $M:N$. Se comparten M caminos de backup preasignados entre N caminos primarios, sin embargo, los datos no se replican en el camino de backup, sino que son asignados y transmitidos por él sólo cuando falla el camino primario.
- Protección $1:N$. Se comparte un camino de backup preasignado entre N caminos primarios.
- Protección 1:1. Se preasigna un camino de backup dedicado para un camino primario.

Las protecciones $1:N$ y $1:1$ son casos especiales de la protección $M:N$.

2.3.6.1.1 Protección Span

Este tipo de protección se da entre dos nodos adyacentes y se basa en la conmutación a un canal o enlace de reserva cuando ocurre la falla. Como parte de las extensiones de enrutamiento GMPLS, el tipo de protección del enlace se anuncia para que se pueda utilizar la protección span en el cálculo de la ruta. Una vez se ha seleccionado la ruta, se señala la conexión utilizando RSVP-TE o CR-LDP.

Cada nodo que proporciona una protección span dedicada 1+1 debe replicar los datos en dos canales separados. Esto requiere utilizar el doble de ancho de banda de la conexión entre el par de nodos y la capacidad de replicar los datos en ambos canales.

En la protección span compartida $M:N$, se tienen que detectar las fallas antes de realizar la conmutación ya que los datos no se encuentran replicados en los canales primario y de backup.

2.3.6.1.2 Protección de Trayecto

Como se dijo anteriormente, la protección de trayecto se realiza en los nodos finales y requiere la conmutación a un camino alternativo cuando se produce el fallo.

Una vez se han calculado los dos caminos, la fuente genera dos conexiones enrutadas explícitamente con los bits (*dedicado 1+1*) y (*no protegido*) activos, respectivamente, en el vector de bits de protección del correspondiente mensaje de señalización. El establecimiento indica que estos dos caminos requieren reservas compartidas. En cada nodo en el que los dos caminos se ramifican se debe replicar los datos en ambas ramas. En los nodos en los que se unen los caminos se debe elegir los datos de un camino basándose en la integridad de la señal.

En la protección de camino M:N, aunque los recursos para los caminos de backup están preasignados, el tráfico de baja prioridad puede utilizarlos teniendo en cuenta que dicho tráfico será bloqueado si se produce un fallo en el camino primario.

2.3.6.2 Mecanismos de restauración

La restauración se ha diseñado para reaccionar rápidamente ante fallas, utilizando el ancho de banda eficientemente, pero normalmente requiere el establecimiento de recursos y el cálculo de rutas dinámicamente y por ello le lleva más tiempo conmutar a un camino alternativo que las técnicas de protección. La restauración se puede implementar en la fuente o en un nodo intermedio una vez que el nodo responsable haya sido notificado mediante los mecanismos de notificación mencionados anteriormente o utilizando mensajes de error estándar.

2.3.6.2.1 Restauración de línea

Para soportar la restauración de línea se selecciona un nuevo camino en un nodo intermedio. Esto conlleva a que el tráfico atraviese nodos adicionales de tránsito. La restauración de línea puede ser beneficiosa para las conexiones que atraviesan múltiples saltos y/o largas distancias ya que la latencia en la notificación del fallo puede verse considerablemente reducida. En este caso sólo se reenrutan segmentos de la conexión en lugar del camino entero. La restauración de línea puede romper los requerimientos TE si hay definida una ruta explícita para la conexión. Las restricciones utilizadas para enrutar la conexión pueden ser enviadas para que un nodo intermedio que realice la restauración de línea pueda calcular una ruta alternativa apropiada. Este problema es similar al problema de establecimiento y mantenimiento de requerimientos TE que atraviesan múltiples áreas.

2.3.6.2.2 Restauración de trayecto

La restauración de trayecto conmuta el tráfico a una ruta alternativa alrededor de la falla, haciendo que el camino se seleccione en el nodo fuente. Se puede optimizar el proceso de restauración, por ejemplo, precalculando rutas alternativas y guardándolas para uso futuro. Un camino restaurado puede reutilizar nodos del camino original y/o incluir nodos intermedios adicionales.

Los recursos de los nodos de bajada son reutilizados (compartidos) siempre que sea posible y los recursos de los nodos intermedios que ya no se necesitan son liberados. El compartir los recursos aumenta las probabilidades de la conexión para conseguir los recursos requeridos cuando el reenrutamiento está en progreso. Si se calculan y preasignan los recursos, el reenrutamiento es más rápido ya que dichos recursos están garantizados a no ser que fallen o que sean reclamados por conexiones de mayor prioridad.

2.4 IMPLEMENTACIÓN DE GMPLS PARA EL TRANSPORTE DE IP EN REDES ÓPTICAS

Existe un consenso general en la industria para que el plano de control de la red óptica utilice protocolos basados en IP para el aprovisionamiento y restauración dinámica de los lightpaths, entre y a través de subredes ópticas, basándose en que los mecanismos de señalización y enrutamiento desarrollados para aplicaciones de Ingeniería de Tráfico IP pueden ser reutilizados en las redes ópticas. Similarmente, el transporte de IP sobre estas redes involucra determinar la accesibilidad de IP y de manera transparente establecer trayectos de un punto IP extremo a otro sobre la red óptica.

Para este fin, dos asuntos fundamentales relacionados con las redes de IP óptico deben ser tenidos en cuenta. El primero es la adaptación y reutilización de estos protocolos del plano de control IP dentro del plano de control óptico, independientemente de los tipos de clientes digitales que utilicen esta red. El segundo es el transporte del tráfico IP a través de una red óptica junto con los asuntos de control y coordinación que de ahí se originan.

2.4.1 Modelo de Red

El modelo de red considerado esta formado por enrutadores IP ligados a una gran red de núcleo óptico incapaz de procesar por si solo paquetes individuales en el plano de datos, que se conectan a sus pares sobre canales ópticos conmutados establecidos dinámicamente.

Esta gran red óptica esta compuesta de múltiples redes ópticas que pueden ser administradas por diferentes entidades, las cuales a su vez están formadas de subredes interconectadas por enlaces de fibra (paralelos y bidireccionales) en una topología de

mailla, y que pueden contener equipo óptico reconfigurable de uno o varios fabricantes. Este modelo de red se muestra en la figura 2.11.

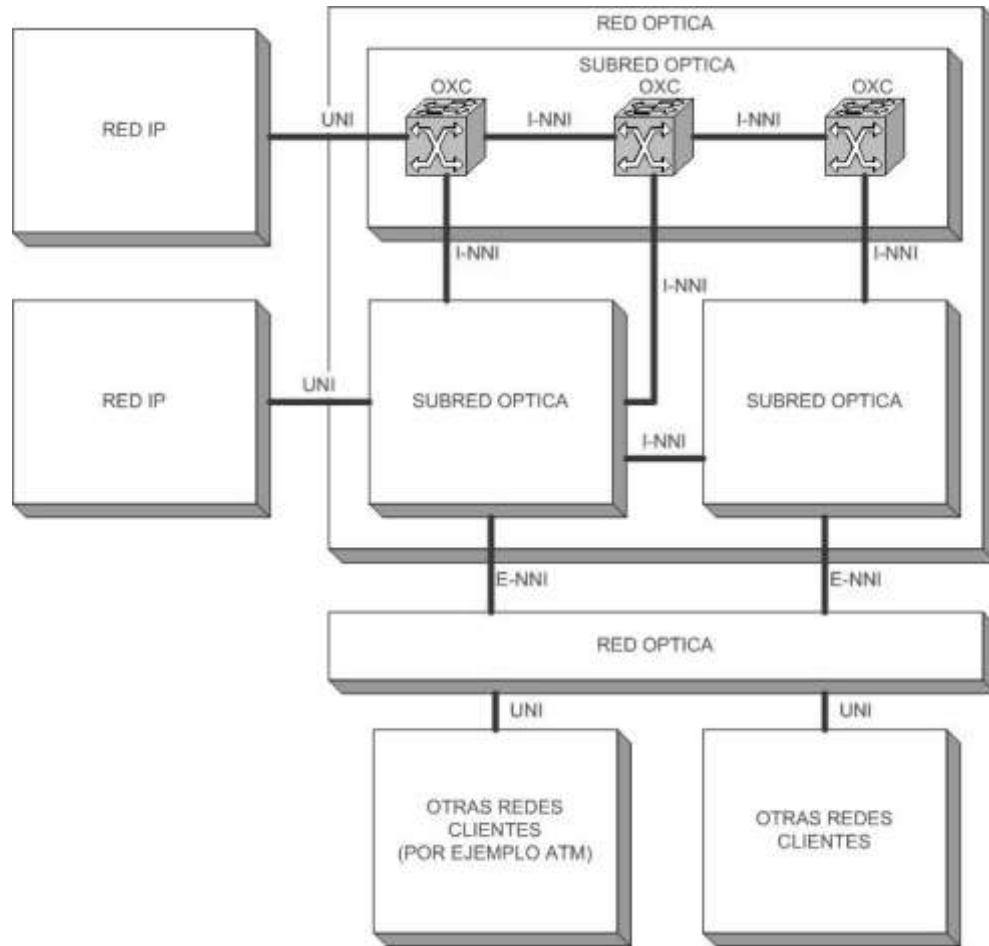


Figura 2.11. Modelo de interconexión de redes ópticas

Los OXCs en el interior de la subred pueden ser totalmente ópticos o con conversión OEO (Óptica-Eléctrica-Óptica). La interconexión entre subredes es implementada mediante interfaces físicas compatibles, con conversiones OE adecuadas donde sea necesario. Los enrutadores que tienen conectividad física directa con la red óptica son denominados "enrutadores de frontera" con respecto a la red óptica.

Cabe aclarar que, como se muestra en la figura 2.11, otras redes clientes (como ATM) pueden ser conectadas a la red óptica a través de las interfaces definidas.

Un lightpath es establecido desde un puerto de ingreso hasta un puerto de salida al configurar los OXCs en el ingreso, la salida y el intermedio de la red, de forma tal que existe una ruta física continua entre los puertos de entrada y salida. Como las rutas ópticas tienden a ser bidireccionales, la ruta de retorno desde el puerto de salida hasta el

de entrada es típicamente enrutada a lo largo del mismo conjunto de puertos intermedios del trayecto de ida, aunque no siempre esto sucede.

Se pueden multiplexar varios flujos de datos que salen de un OXC en un enlace óptico utilizando tecnología DWDM, cuyas funcionalidades pueden existir fuera del OXC y ser transparentes para este, o pueden estar incluidas con el OXC, caso en el cual la tabla de cross conexión consiste de pares de la forma <puerto de entrada i , $\lambda(j)$ >, <puerto de salida k , $\lambda(l)$ >. Esto indica que los flujos de datos recibidos en la longitud de onda $\lambda(j)$ sobre el puerto de entrada i es conmutada al puerto de salida k en la $\lambda(l)$. El establecimiento automático de los lightpaths involucra entonces configurar las tablas de cross conexión en los OXC de forma coordinada para obtener la ruta física deseada.

Bajo este modelo, un trayecto óptico ó lightpath conmutado debe ser establecido entre un par de enrutadores IP antes de que ellos se comuniquen. Además, este trayecto óptico puede atravesar múltiples redes ópticas y estar sujeto a diferentes procedimientos de aprovisionamiento y restauración independientes en cada red.

En la figura 2.11 se puede identificar tres interfaces de control lógico, las cuales se diferencian por el tipo y cantidad de información de control que fluye a través de ellas. Estas son:

- Interfaz Cliente–Redes ópticas (Interfaz Usuario-Red, UNI): Representa un límite de servicio entre el cliente y las redes ópticas. Por lo tanto, el flujo de control a través de esta es dependiente del conjunto de servicios definidos, cuyos modelos se definen más adelante, y la manera en la cual estos son accedidos.
- Interfaz Interna Nodo-Nodo dentro de un red óptica (entre OXCs en diferentes subredes, denominada INNI).
- Interfaz Externa Nodo-Nodo (ENNI) entre nodos en diferentes redes ópticas.

Las INNI representan flujos de control estandarizado entre nodos, independiente del vendedor. La diferencia entre la INNI y la ENNI radica en que la primera se implementa en una red bajo una misma administración técnica, mientras la segunda se aplica en los límites administrativos entre redes. Esto hace que las políticas que restringen el flujo de control entre nodos sean diferentes, y que la seguridad, escalabilidad, estabilidad y ocultamiento de la información sean consideraciones importantes en las especificaciones de la ENNI.

La interfaz UNI puede ser categorizada como pública o privada, dependiendo del contexto y los modelos de servicios. Por lo tanto, la información de enrutamiento puede ser intercambiada o no a través de esta interfaz, dependiendo de las políticas o restricciones explícitas que se definan por parte del administrador de red. Estas capacidades de intercambio de información generan diferentes relaciones, y los respectivos modelos que pueden ocurrir a través de las interfaces lógicas privada y pública.

La estructura física de control utilizada para realizar estas interfaces lógicas puede variar. Por ejemplo, para la UNI algunas posibilidades son:

- **Interfaz directa:** Un canal de control IP (IPCC) dentro o fuera de banda puede ser implementado entre un enrutador de frontera y cada OXC a los cuales este conectado. Este canal de control es utilizado para intercambiar mensajes de enrutamiento y señalización entre el enrutador y el OXC. Con este tipo de interfaz, los dos elementos son pares con respecto al plano de control. En la figura 2.12 se muestra esta situación. Algunos protocolos de enrutamiento que pueden utilizarse son OSPF y ISIS (con las respectivas extensiones de ingeniería de tráfico y mejoras adicionales para tratar con las características peculiares de las redes ópticas). Otros intercambios de información de enrutamiento basados en directorio son también posibles. Algunos protocolos de señalización a utilizar pueden ser las adaptaciones y extensiones de RSVP-TE o CR-LDP.
- **Interfaz indirecta:** Un canal de control IP fuera de banda puede ser implementado entre el cliente y un dispositivo en la red óptica para señalar requerimientos y respuestas de servicio. Similarmente, la señalización fuera de banda puede ser usada entre sistemas de gestión en las redes óptica y de cliente para señalar requerimientos de servicio. En este caso, no hay interacción de control directa entre los clientes y los respectivos OXCs. Una razón para tener este tipo de interfaz indirecta puede ser que los OXCs y/o los clientes no soporten una interfaz directa de señalización.

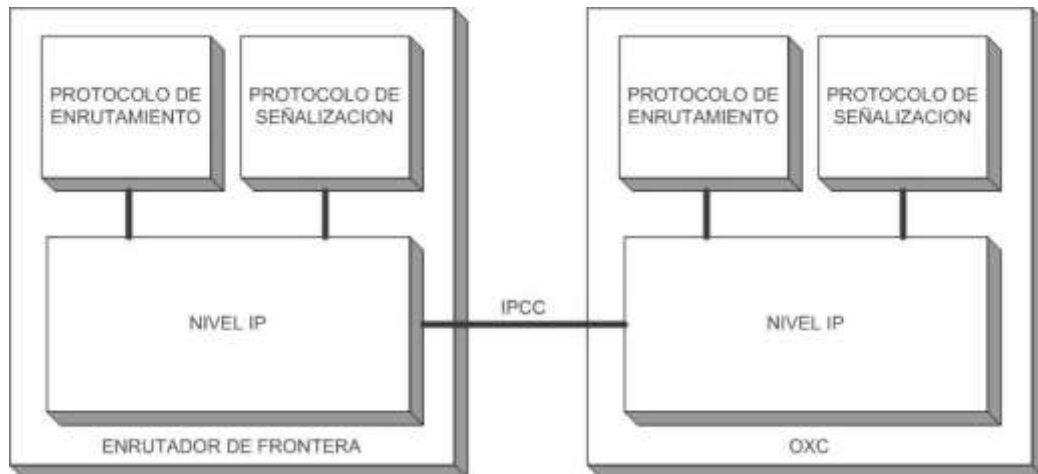


Figura 2.12. Interfaz Directa

- **Interfaz de aprovisionamiento:** En este caso, los servicios de la red óptica son aprovisionados manualmente y no hay interacciones de control entre el cliente y la red óptica.

2.4.2 Modelos de Servicio IP sobre redes ópticas

2.4.2.1 Modelo de Servicios de Dominio

Bajo este modelo de servicios, la red óptica ofrece conectividad de gran ancho de banda en forma de lightpaths. La señalización a través de la UNI es estandarizada y utilizada para invocar las siguientes funcionalidades:

- Creación de Lightpath: Permite crear lightpaths con los atributos específicos entre un par de puntos de terminación en la red óptica. Esta función puede estar sujeta a políticas definidas de la red (por ejemplo, restricciones de conectividad) y procedimientos de seguridad.
- Eliminación de Lightpath: Permite eliminar un lightpath existente.
- Modificación de Lightpath: Permite modificar ciertos parámetros del lightpath.
- Consulta del estado del Lightpath: Este servicio permite al enrutador que creó el lightpath, consultar el estado de ciertos parámetros del lightpath (referenciado por su ID).

Un procedimiento de descubrimiento de sistema final puede ser usado sobre la UNI para verificar conectividad del puerto local entre los dispositivos óptico y de cliente, permitiendo a cada dispositivo obtener el canal de control UNI. Finalmente, un procedimiento de "descubrimiento de servicio" puede ser empleado como precursor para obtener los servicios UNI. Esto permite a un cliente determinar los parámetros estáticos de la interconexión con la red óptica, incluyendo los protocolos de señalización UNI soportados. Los protocolos para descubrimiento de vecino y de servicio son diferentes de los protocolos de señalización UNI.

Un pequeño conjunto de servicios bien definidos se ofrecen a través de la UNI, haciendo que los requerimientos del protocolo de señalización sean mínimos, puesto que este solamente es requerido para transportar unos pocos mensajes con ciertos atributos, de una forma punto a punto, entre el enrutador y la red óptica. Tal protocolo debe ser basado en RSVP-TE o LDP, por ejemplo.

El modelo óptico de servicios de dominio no trata con el tipo y naturaleza de los protocolos de enrutamiento dentro y a través de las redes ópticas. Además, resultaría en el establecimiento de una topología de lightpath entre enrutadores en las fronteras de la red óptica, tal como se propone en el modelo Overlay para redes IP ópticas, que será presentado más adelante.

2.4.2.2 Modelo de Servicio Unificado

En este modelo, las redes IP y óptica son tratadas como una sola red integrada desde el punto de vista del plano de control, haciendo que los OXCs y los enrutadores sean semejantes en este plano. De esta manera, en principio, no hay distinciones entre la UNI,

NNIs y cualquier otra interfaz entre enrutadores desde un punto de vista de señalización y enrutamiento.

Este modelo, hasta ahora, solamente ha sido discutido en el contexto de un solo dominio administrativo. Se debe tener en cuenta que un plano de control unificado es posible aún cuando hay límites administrativos en una interconexión de redes ópticas, pero algunas de las capacidades de enrutamiento integradas pueden no ser factibles o prácticamente atractivas en este caso.

Bajo el modelo de servicio unificado y dentro del contexto de una red GMPLS, los servicios de red óptica se obtienen implícitamente durante la señalización extremo a extremo. Específicamente, un enrutador de frontera puede crear un lightpath con atributos determinados, o eliminarlos y modificarlos como si creara LSPs GMPLS, haciendo que los servicios obtenidos de la red óptica sean similares a los del modelo de Servicios de Dominio. Estos servicios, sin embargo, pueden ser invocados de una forma más homogénea que en el modelo anterior. Por ejemplo, cuando los enrutadores están enlazados a una sola red óptica (donde no hay ENNIs), un enrutador remoto puede calcular una ruta extremo a extremo a través de toda la red óptica. No obstante, los enrutadores de frontera deben reconocer que un LSP a través de las redes ópticas es un lightpath, o un conducto para múltiples LSPs.

El concepto de adyacencia de envío, que es en esencia un enlace virtual anunciado dentro de un protocolo de enrutamiento de estado de enlace, puede ser usado para especificar enlaces virtuales a través de las redes ópticas en los protocolos de enrutamiento tales como OSPF. Esto quiere decir que, una vez el lightpath es establecido a través de una interconexión de redes ópticas entre dos enrutadores de frontera, puede ser anunciado como una adyacencia de envío (un enlace virtual) entre estos enrutadores. De esta manera, desde el punto de vista del plano de datos, los lightpaths resultan en una superposición entre enrutadores de frontera.

2.4.2.3 Posibles servicios

Sobre el servicio de conectividad punto a punto ofrecido por la red óptica se pueden construir servicios especializados, tales como redes privadas virtuales ópticas y ancho de banda por demanda.

Dado que el plano de datos entre los enrutadores IP sobre una red óptica implican una topología virtual, la cual es una sobreposición sobre la red óptica, es fácil imaginar una red privada virtual de lightpaths que interconectan enrutadores (o cualquier otro conjunto de clientes) pertenecientes a una sola entidad o a un grupo de entidades relacionadas a través de una red óptica pública, creando así una Red Privada Virtual Óptica (OVPN). Cabe aclarar que, en el caso donde la red óptica provee conectividad para múltiples conjuntos de redes clientes externas, debe implementarse políticas que aseguren la separación de enrutamiento entre diferentes conjuntos de redes clientes.

2.4.3 Modelos de Interconexión para el transporte de IP sobre redes ópticas

Para examinar las alternativas existentes en la implementación de redes IP ópticas, es importante distinguir entre el plano de datos y el plano de control sobre la UNI. La red óptica provee un servicio a las entidades externas en forma de tubos de transporte con ancho de banda fijo (trayectos ópticos). Los enrutadores IP en la frontera de las redes ópticas deben tener entre ellos estos trayectos establecidos antes de que la comunicación a nivel IP pueda comenzar. De este modo, el plano de datos IP sobre redes ópticas es realizado sobre una topología de trayectos ópticos. Por otro lado, los enrutadores IP y OXCs pueden tener una relación de pares con respecto al plano de control, especialmente para los protocolos de enrutamiento que permiten el descubrimiento dinámico de los puntos finales IP enlazados a la red óptica.

Como se ha dicho antes, la arquitectura de red IP óptica está definida esencialmente por la organización del plano de control. Dependiendo del modelo de servicios los planos de control en las redes IP y óptica pueden estar estrechamente acoplados. Este acoplamiento determina las siguientes características:

- Los detalles de la información de topología y enrutamiento anunciada por la red óptica a través de la interfaz cliente;
- El nivel de control que los enrutadores IP pueden ejercer en la selección de trayectos explícitos para conexiones a través de la red óptica;
- Políticas relativas de aprovisionamiento dinámico de trayectos ópticos entre enrutadores. Esto incluye asuntos de control de acceso, contabilidad y seguridad.

De esta forma, se pueden plantear los modelos de interconexión que se presentan a continuación:

2.4.3.1 El modelo Peer (de pares o iguales)

Bajo este modelo, el plano de control IP actúa como un par del control en la red de transporte óptico, lo cual implica que una sola instancia del plano de control es implementada sobre los dominios IP y óptico. Cuando hay una sola red óptica involucrada y los dominios IP y óptico pertenecen a la misma entidad, entonces un protocolo IGP común se puede utilizar para distribuir información de topología sobre la red IP-óptica integrada. Cuando una interconexión de redes ópticas con múltiples redes ópticas esta involucrada (por ejemplo, abarcando diferentes dominios administrativos), una sola instancia de un protocolo de enrutamiento intra-dominio no es atractiva o realista de implementar, haciéndose necesaria la utilización de protocolos de enrutamiento y señalización inter-dominio.

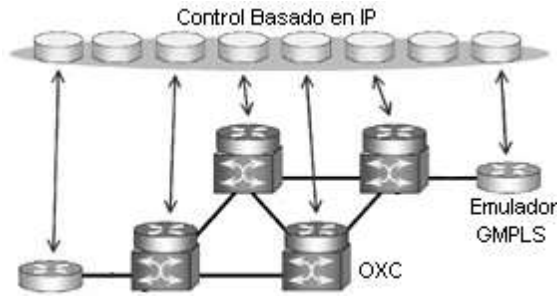


Figura 2.13. Arquitectura basada en OADMs/OXCs para el modelo "peer"

En este modelo, cada enrutador puede mantener una base de datos de estado de enlace que contenga:

- LSPs físicos (enlaces de fibra)
- LSPs ópticos (trayectos de OCh)
- LSPs lógicos (LSPs convencionales)

En una red basada en el modelo Peer, GMPLS trae inteligencia y aprovisionamiento dinámico de circuito (o trayecto) a servicios de paquetes, TDM y de longitud de ondas. Estos servicios conmutados inteligentes sacan provecho de la infraestructura existente de fibra y facilitan el transporte y la agregación de servicios.

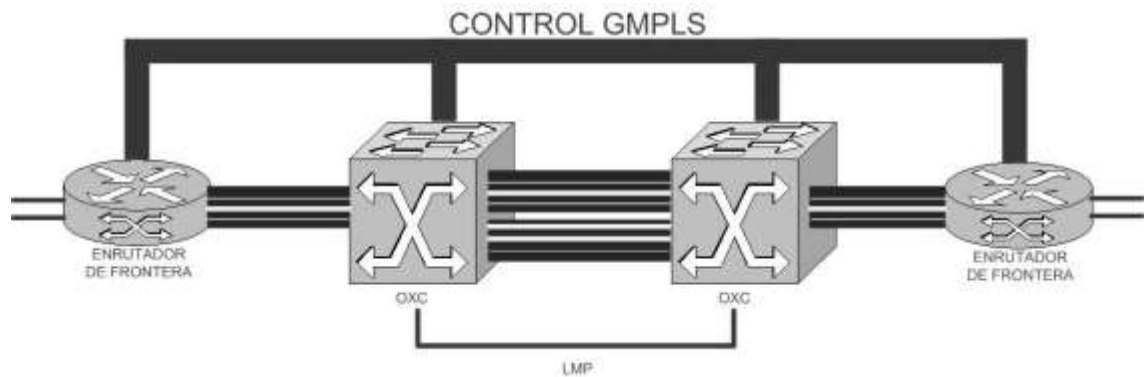


Figura 2.14. Modelo Peer

2.4.3.2 El modelo Overlay (de superposición)

Bajo este modelo, el enrutamiento, distribución de topología, y protocolos de señalización de la red IP son independientes del enrutamiento, distribución de topología, y protocolos de señalización dentro del dominio óptico. En esta situación, cada instancia del plano de control operará independiente de la otra, permitiendo máximo aislamiento del control entre los dos dominios.

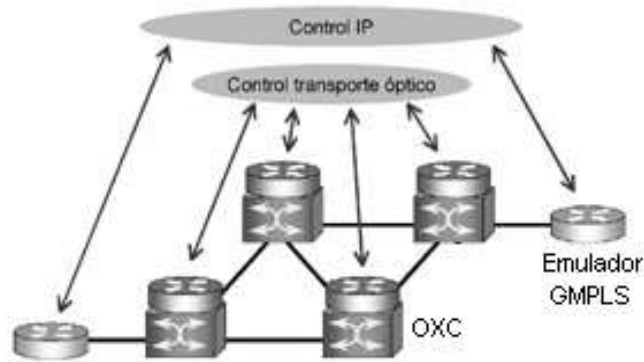


Figura 2.15. Arquitectura basada en OADM/OXC para el modelo "overlay"

Este modelo es conceptualmente similar al clásico IP sobre ATM, pero aplicados a una interconexión de redes ópticas. En el modelo Overlay, la distribución de topología, el cálculo de ruta y los protocolos de señalización podrían tener que ser definidos para el dominio óptico, independientemente de qué exista en el dominio IP. En ciertas circunstancias, también puede ser factible configurar estáticamente los canales ópticos que proveen conectividad en este modelo a través de funciones de gestión de red. Sin embargo, la configuración estática es improbable de escalar en redes muy grandes, y no soportará el aprovisionamiento rápido de conexiones como se requiere en los entornos competitivos existentes y futuros de sistemas de redes.

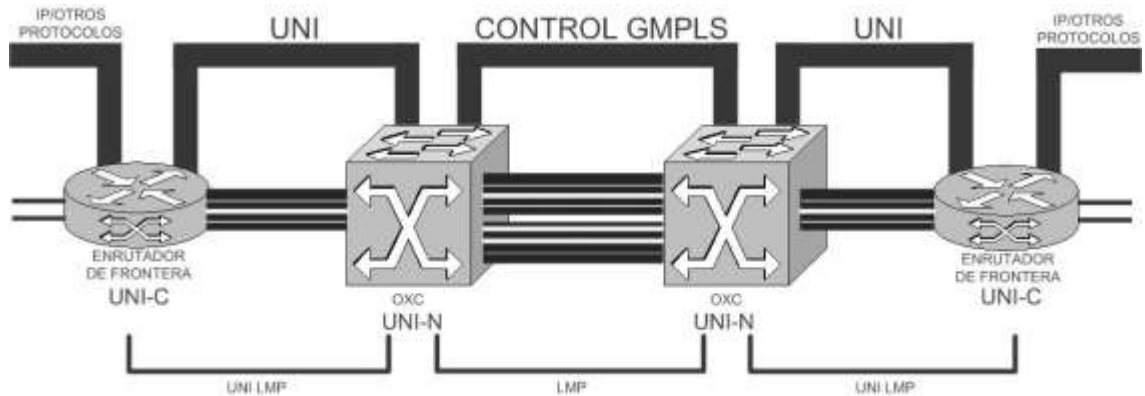


Figura 2.16. Modelo Overlay

2.4.3.3 El modelo ampliado

En este modelo, hay instancias de enrutamiento separadas en los dominios IP y óptico, pero cierto tipo de información de una instancia de enrutamiento puede ser pasada a la otra. Por ejemplo, las direcciones IP externas pueden ser transportadas dentro de los protocolos de enrutamiento óptico para permitir pasar a los clientes IP información de accesibilidad.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE REDES IPoDWDM

3.1 CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO

Teniendo en cuenta los requerimientos de los usuarios y las necesidades del transporte de información que se plantean hoy en día, se puede concluir que las redes ópticas deben ser de larga duración, muy flexibles y ampliamente controlables. Además, se hace necesaria la introducción de inteligencia al plano de control de las redes ópticas para hacerlas más versátiles, permitiendo a algunos proveedores de servicios ofrecer servicios genéricos de capa óptica que podrían no ser específicos al cliente. Un atributo esencial de las redes ópticas inteligentes es la capacidad de enrutar las conexiones de la capa óptica en tiempo real (o muy cerca al tiempo real).

3.1.1 Planeación de capacidad

El ancho de banda es un factor muy importante y decisivo en la implementación de servicios sobre una nueva red, pues asegura la adecuada prestación de servicios, con alta calidad, posibilitando además la implementación de nuevas soluciones en un futuro.

Al realizar la planeación de una red óptica, cualquiera que sea el propósito de esta, se debe definir si los requerimientos y necesidades que se presentan en la red a desarrollar son lo suficientemente fuertes para tomar la decisión de implementar DWDM. Este análisis se debe realizar en base a aspectos como las aplicaciones a implementar, los servicios que se van a prestar, la calidad de estos, y sobre todo la velocidad de transmisión y el ancho de banda necesario para satisfacer las necesidades planteadas. Esta capacidad necesaria para la transmisión de información en cada canal será el resultado de la sumatoria de los anchos de banda de cada uno de los servicios que se quiera transmitir a través de él.

También debe tenerse en cuenta que cualquier tecnología futura debe tener como característica fundamental la escalabilidad. De esta manera, se hace necesario indicar la forma en que el diseñador de la red podría reemplazar o actualizar los equipos ópticos de conmutación por OXCs, o alternatively, como se integraría el funcionamiento de un conmutador electrónico con un componente óptico para transformarlo en un OXC. Esto con el fin de reducir el costo del diseño, implementación y futura migración de la red DWDM.

3.1.2 Matriz de tráfico

Se observa la tendencia en las redes actuales de aumentar la capacidad en forma exponencial debido a las necesidades crecientes de tráfico y a los requerimientos cada vez

más altos en el transporte de la información. Esto hace que el planteamiento de una matriz de tráfico no se limite a una hoja de cálculo en dos dimensiones donde se indica el origen y el destino de una cierta cantidad de información, sino que se incluyan variables como el tipo de información, los protocolos IP sobre los cuales se transporta, la QoS que se debe garantizar, el tipo de conexión (unidireccional o bidireccional), etc.

Sin embargo, la representación de la matriz teniendo en cuenta todos esos aspectos puede llegar a ser tan compleja y extensa que no facilitaría las labores en el diseño. Ante esta situación, es recomendable generar una matriz de tráfico para cada uno de los aspectos que se consideren necesarios, según las necesidades de la red o el mismo criterio del diseñador (como por ejemplo los tipos de servicios transportados, el QoS requerido por tráficoes específicos, los tipos de clientes de la red, etc.). Con cada una de las matrices se obtiene la cantidad de longitudes de onda necesarias para las conexiones del tipo de tráfico tratado en cada una de ellas, permitiendo de esta forma obtener una matriz de tráfico final en la cual se plasman la totalidad de las longitudes necesarias para todas esas clases de tráfico entre dos nodos de la red.

Se espera que para una matriz de tráfico dada, el retardo promedio por paquetes a lo largo de la red sea minimizado para dar solución a las demandas actuales de tráfico, y que además se maximice el factor de escalamiento por el cual puede ser expandida la capacidad de esta matriz en la red, para así satisfacer las necesidades de tráfico futuras. También se deben optimizar parámetros como la distancia promedio de cada salto y el rendimiento total de la red, teniendo en cuenta las restricciones impuestas por esta.

Esta matriz debe tener en cuenta, como parte del desafío para el funcionamiento de la red basada en DWDM, la reconfiguración de tráfico y de topología virtual necesaria para continuar las operaciones con la mínima interrupción, adaptándose a los patrones de tráfico cambiantes.

Si las características futuras de tráfico van a modelar la características presentes de tráfico, es factible obtener una estimación de la capacidad de transferencia máxima que se puede esperar de la red óptica, teniendo en cuenta que las intensidades de tráfico que aumentan en un factor constante.

Un factor importante que se debe considerar en el diseño de una red DWDM es el número de longitudes de onda a utilizar, el cual puede estar determinado por factores como: El número máximo de canales disponibles con el equipo opto-electrónico utilizado, restricciones de costos, la fibra óptica que se va a utilizar, el número de enlaces entre dos nodos adyacentes y entre nodos no adyacentes, además de la capacidad de estos enlaces.

En un sistema DWDM es imperativo definir las longitudes de onda de operación para los canales a multiplexar, indicando la frecuencia central y la separación de canales (25, 50, 100 o 200 GHz.). Esta separación puede ser irregular o regular, y debe realizarse para disminuir al máximo los efectos no lineales de la fibra como la mezcla de cuatro ondas (FWM, Four Wave Mixing).

3.1.3 Migración de redes

Para lograr la evolución de una red óptica existente con una tecnología cualquiera hacia una red de transporte de IP sobre DWDM, deben ofrecerse en primer lugar, alternativas que no aumenten el costo de esta actualización y que permitan realizar la implementación de la forma más gradual posible. Para este propósito, DWDM ofrece la gran ventaja de ser transparente al transporte de información, permitiendo preservar la infraestructura de redes existentes mientras se realiza el proceso de evolución.

Además, se deben clarificar los objetivos principales que definirán la estrategia de migración. Entre estos objetivos se debe plantear la mejora de las prestaciones de la red y la satisfacción de la demanda de los usuarios, preservando las aplicaciones existentes y manteniendo el presupuesto con el que se venía trabajando.

Esto conduce a la toma de ciertas decisiones que guiarán el desarrollo de esta migración basándose en parámetros como:

- Medir el nivel de inversión realizado hasta el momento y el impacto que recibirá esta inversión con la migración.
- Determinar como los usuarios, clientes y personal técnico se verán afectados.
- Definir en que lugares de la red se debe realizar esta migración.
- Indagar si las aplicaciones actualmente existentes son compatibles con los cambios planeados.

En general, esta migración empieza reemplazando el Backbone de una con DWDM, extendiéndose a continuación hacia los extremos de la red. Para iniciar el proceso se debe tener en cuenta aspectos técnicos como la arquitectura de la red presente, el funcionamiento de las aplicaciones de software distribuido, las necesidades de velocidad y ancho de banda, además de los aspectos comerciales del operador de la red, tales como las políticas, objetivos de negocio y cultura de la compañía.

A continuación se debe segmentar la red tratando de definir las necesidades de servicio y ancho de banda para cada segmento, buscando la disminución del número de protocolos presentes en la red y la eliminación de los cuellos de botella. Esto puede realizarse fácilmente con la utilización del control sobre el ancho de banda y las aplicaciones, las cuales deben tener en cuenta los requerimientos para tráfico futuro, planos actualizados de la red, estadísticas de comportamiento, tiempos de respuesta, aplicaciones de usuario y los procesos de grupos de trabajo, MAN y WAN.

El control de aplicaciones debe indagar cómo se está utilizando la red, cuales aplicaciones requieren mayor ancho de banda y menores tiempos de respuesta; variables como protocolos de red utilizados, topologías, número de usuarios, tipo de tráfico (VBR o CBR). Además, se debe tener en cuenta como las aplicaciones emplean los recursos de red y como se afecta a los usuarios finales.

La definición de umbrales claves para el funcionamiento de la red, como el número de usuarios por segmento, los tiempos de respuesta y las necesidades de tráfico multimedia, a partir de los controles, permitirán mejorar el proceso de migración.

Entonces, se podría plantear tres opciones para actualizar las redes hacia una red óptica:

- Reemplazar o actualizar el equipo sobre la misma tecnología, por ejemplo, aumentando la jerarquía en el entorno SDH/SONET, o el nivel de una red basada en Ethernet.
- Instalar un nuevo anillo DWDM con las fibras existentes o fibras nuevas, integrando las dos redes sobre la red nueva.
- Instalar uno o más anillos con DWDM para el transporte de IP, manteniendo la red antigua como una red independiente, dando acceso único tanto a la red existente como a la red nueva e interconectarlas a través de una pasarela o gateway.

En el primer caso, la red continuaría bajo el esquema de prestación de servicios IP sobre infraestructura de otras redes, con todas las deficiencias y costos asociados de transporte de información que esto plantea. Este asunto ya ha sido planteado en el primer capítulo de este documento.

La ventaja de las dos últimas opciones es la posibilidad de ofrecer servicios independientes de la velocidad, liberando a los operadores de red el seguir al pie de la letra las tablas de jerarquía SDH/SONET ó Ethernet para aumentar la capacidad de su red, como si sucede en el primer caso.

En el tercer caso, la nueva red se encargaría de servir a los usuarios finales mediante OADMs y OXCs, permitiendo además interconectar mediante pasarelas las redes antigua y nueva. Este modelo de migración posiblemente no cumpla con uno de los principios definidos al inicio de esta sección, pues el costo de operar dos redes por separado para cumplir con el mismo propósito, generalmente, es bastante elevado y poco eficiente.

Para el segundo escenario, DWDM se puede utilizar para sustituir una clase entera de equipos que ya no se interconectarán directamente al backbone de red sino que lo harán a través de los nuevos equipos, permitiendo mantener una red virtual DWDM equivalente a la red existente. Además, este cambio permite que los enrutadores y otros dispositivos eviten el equipo de la red existente y se conecten directamente a DWDM, simplificando el tráfico de IP directamente sobre nivel óptico y facilitando el proceso de migración. También este esquema permitiría a las Redes de Área Local (LAN, Local Area Network) de acceso extenderse a través de las Redes de Área Metropolitana (MAN, Metropolitan Area Network) y las Redes de Área Extendida (WAN, Wide Area Network) sin infraestructura de red legada.

Una ventaja adicional de migrar una red a nivel óptico es que la protección y restauración son menos susceptibles de fallos en los componentes electrónicos; se crea una plataforma común de supervivencia para todos los servicios de red, incluidos los que no tienen protección propia.

Cualquiera que sea la metodología de migración utilizada para las redes ópticas, esta debe ser planeada tanto a corto, como a mediano y largo plazo, para así garantizar el funcionamiento de la red en el futuro.

3.2 TOPOLOGÍAS FÍSICAS DE RED

Las arquitecturas de red se basan en muchos factores, incluyendo tipos de aplicaciones y protocolos, distancias, uso y formas de acceso, y topologías de redes antiguas. En efecto, el nivel óptico debe ser capaz de soportar muchas tecnologías y, debido a que hay desarrollos impredecibles en esta área, estas topologías deben ser flexibles.

3.2.1 Topologías punto a punto

Las redes con topologías punto a punto pueden implementarse con o sin OXCs, debido a su simplicidad. Estas redes se caracterizan por su alta integridad y fiabilidad de la señal, y restauración rápida del camino. En las redes de larga distancia, la separación entre transmisor y receptor puede ser de varios cientos de kilómetros, y el número necesario de amplificadores entre extremos puede ser menor de 10. En las MAN, los amplificadores no son necesarios.

3.2.2 Topologías en anillo

Los anillos son la arquitectura más común en las redes ópticas, con espaciamentos de decenas o cientos de kilómetros entre nodos. El anillo de fibra, típicamente, posee menos nodos que canales o longitudes de onda. Un ejemplo de esta se muestra en la figura 3.1.

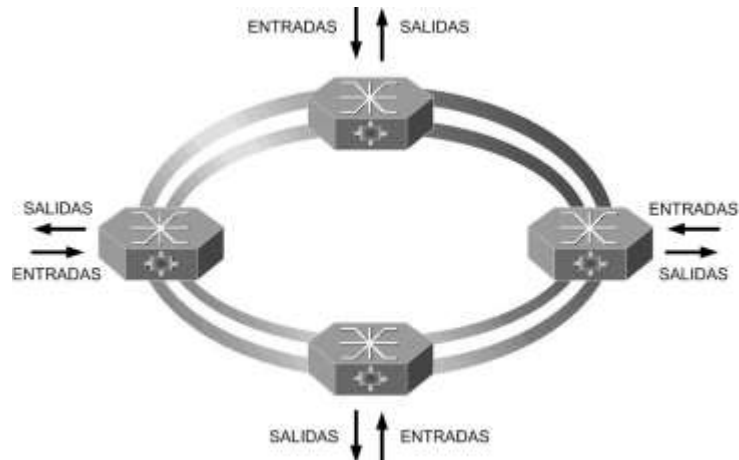


Figura 3.1. Ejemplo de topología en anillo

En los nodos OADMs, las longitudes de onda seleccionadas son removidas o añadidas, mientras que las demás pasan de forma transparente. De esta manera, las arquitecturas

en anillo permiten que los nodos en anillo suministren acceso a elementos de red como enrutadores, conmutadores o servidores solo con añadir o remover canales de longitud de onda en el dominio óptico. Sin embargo incrementando el número de OADMs, la señal tiene más pérdidas y se puede necesitar amplificación.

Las redes candidatas para aplicaciones DWDM en MAN están basadas a menudo en estructuras en anillo con protección de fibra 1+1. Así, los esquemas tales como Anillo de Conmutación de Trayecto Unidireccional (UPSR, Unidirectional Path Switched Ring) o Anillos de conmutación de Línea Bidireccional (BLSR, Bidirectional Line Switched Ring) se pueden reutilizar en implementaciones DWDM.

En un esquema UPSR con dos fibras, el concentrador y los nodos envían la información a través de dos anillos, pero normalmente la misma fibra se utiliza por todos los equipos para recibir la señal (de aquí el nombre de unidireccional). Si el anillo de trabajo fallase, el equipo receptor conmuta al otro par de hilos. Aunque esto suministra redundancia completa del camino, no hay posibilidad de reutilizar el ancho de banda, ya que la fibra redundante siempre debe estar preparada para transportar el tráfico de trabajo. Comúnmente este esquema es el más utilizado en las redes de acceso.

Otros esquemas, tales como BLSR (Bidirectional Line Switched Ring), permiten al tráfico viajar del nodo transmisor al nodo receptor por la ruta más directa. Debido a esto, el BLSR es preferible en el corazón de las redes DWDM, especialmente con implementaciones de cuatro fibras, que ofrecen redundancia completa.

3.2.3 Topologías en malla

Las arquitecturas en malla son el futuro de las redes ópticas. A medida que las redes evolucionan, las arquitecturas punto a punto y en anillo aún tendrán cabida, pero la malla suministra una topología más robusta. Este desarrollo se obtiene mediante la introducción de OXCs y conmutadores ópticos configurables que en algunos casos sustituirán y en otros complementarán los dispositivos fijos DWDM.

Desde el punto de vista de diseño, es una evolución directa el pasar de topologías punto a punto a topologías en malla. Al equipar los nodos iniciales con OADM para tener flexibilidad, y a continuación interconectarlos, la red puede evolucionar en una malla sin un rediseño completo.

Las redes en malla DWDM, que constan de nodos ópticos interconectados, requerirán la próxima generación de esquemas de protección. Donde los previos esquemas de protección se basan en la redundancia del nivel de sistema, tarjeta o fibra, ahora la redundancia migrará a nivel de longitud de onda. Esto significa entre otras cosas, que un canal de datos puede cambiar las longitudes de onda y lo hace a través de la red, mediante el enrutamiento o la conmutación de la longitud de onda como consecuencia de una falla. Esta situación es análoga a la de un circuito virtual a través de una nube ATM, que puede experimentar cambios en sus Identificadores de Trayecto Virtual / Canal Virtual

(VPI, Virtual Path Identifier) / VCI, Virtual Channel Identifier) en los puntos de conmutación. En las redes ópticas, este concepto se llama camino de luz.

Las redes en malla requerirán un alto grado de inteligencia para realizar las funciones de protección y gestión del ancho de banda, incluidas la conmutación de la fibra y la longitud de onda. Sin embargo los beneficios en flexibilidad y eficiencia son potencialmente mayores. El uso de la fibra, que puede ser bajo en soluciones en anillo debido al requerimiento de protección de las fibras en cada anillo, se puede mejorar con un diseño en malla. La protección y la restauración se pueden basar en caminos compartidos, de este modo se requieren pares de fibras para la misma cantidad de tráfico y no se dispone de longitudes de onda sin utilizar.

3.2.4 Topologías híbridas

Al ir evolucionando las tecnologías de red óptica, los OXCs y los conmutadores ópticos se han convertido en elementos cada vez más configurables y automatizados, permitiendo que las redes punto a punto y en anillo se interconecten para formar mallas, transformando las redes ópticas en plataformas plenamente flexibles.

Por ejemplo, las configuraciones de uno o más anillos se pueden instalar e interconectar a través de uno o varios nodos componentes de los dos anillos, o mediante enlaces punto a punto entre dos nodos de los dos anillos. También, un anillo puede tener un concentrador y unos o más nodos OADMs a los cuales se conectan otros nodos mediante enlaces punto a punto en una configuración de estrella, con la posibilidad de dar conectividad con otras redes establecidas a través del nodo concentrador. Adicionalmente las topologías malladas y en anillo se pueden unir con enlaces punto a punto en uno o varios de los nodos, en la misma forma utilizada para interconectar dos redes en anillo.

En la figura 3.2 se muestra un ejemplo de topología de red híbrida, que permite también implementar una red en malla.

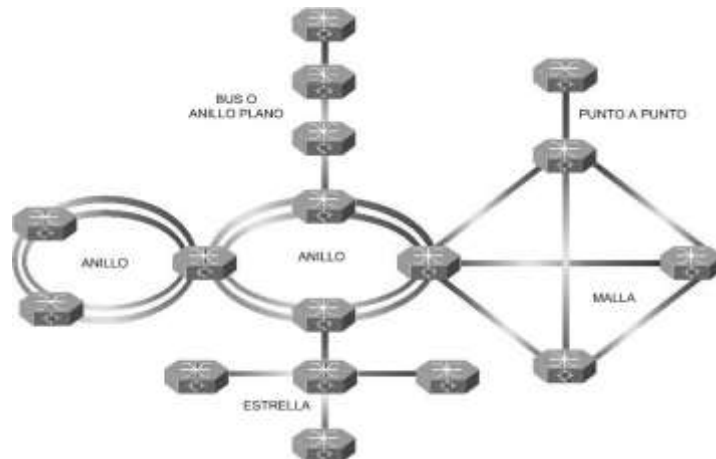


Figura 3.2. Ejemplo de topologías híbridas formando una sola red en malla

3.3 CRITERIOS DE FUNCIONAMIENTO DE RED

En el diseño de una red, y en especial de una red óptica para el transporte de IP, es importante considerar la funcionalidad requerida de esta, al igual que las capacidades y limitaciones de los componentes que la conforman, con el fin de realizar la mejor utilización posible de los recursos.

3.3.1 Topología lógica de red

El funcionamiento lógico de una red óptica depende en gran medida de la matriz de tráfico y la arquitectura física que se ha planteado para esta, además de la tecnología sobre la cual va a ser soportada.

De este modo, podemos definir la configuración lógica de una red IPoDWDM soportada por un plano de control GMPLS mediante el siguiente proceso:

- Definir las subredes ópticas que conforman la red IPoDWDM: Esto permite segmentar la red en grupos de nodos caracterizados por patrones similares, tales como fabricante de equipos, distancia entre equipos, cantidad de conexiones definidas en la matriz de tráfico, entre otros.
- Ubicar los puntos de frontera de cada una de las subredes ópticas y de la red óptica como un todo: Luego de definir las subredes que conformarán la red, se debe definir los puntos a través de los cuales estas se interconectarán a las demás subredes, formando así una gran red óptica. Además, se debe definir los puntos a través de los cuales la red conformada se interconectará con otras redes semejantes.
- Ubicar los puntos de acceso de clientes a la red óptica: Con esto se definen los nodos extremos a través de los cuales los dispositivos y las redes clientes se interconectarán a nuestra red óptica.
- Asignar las interfaces de red a cada uno de los puntos de frontera definidos: Luego de definir todos los puntos de frontera, se procede a asignarle a cada uno de estos la interfaz lógica conveniente, según lo planteado en el numeral 2.4.1, para conseguir la completa funcionalidad de la red.

3.3.2 Determinación del Modelo de Control

Después de haber definido la arquitectura lógica de la red, se procede a definir el modelo de control que va a ser implementado para el soporte de las necesidades planteadas por el diseñador de red. Este proceso se realiza teniendo en cuenta aspectos como el modelo de servicios y el método de conexión ofrecido a los dispositivos clientes por parte de la red, la cantidad y clase de información que debe viajar a través de las interfaces lógicas de red, y los modelos de conexión con otras redes semejantes.

3.3.2.1 Modelo de pares o iguales (Peer)

Este modelo es el ideal para redes que, como se dijo anteriormente, integran el plano de control de los dominios IP y óptico en uno solo, permitiendo a los dispositivos clientes conocer el estado de la red como un todo y calcular una ruta extremo a extremo a través de toda ella. La información de topología y estado de enlace es mantenida por todos los nodos (OXCs y enrutadores), y puede ser idéntica.

El tipo de interfaz UNI mas conveniente para este modelo es la de tipo directo, pues permite la implementación de los protocolos de enrutamiento y señalización esenciales para que el modelo pueda funcionar correctamente.

Como se mencionó en el numeral 2.4.3.1, un protocolo IGP común como OSPF o ISIS, se puede utilizar para distribuir información de topología sobre la red IP-óptica integrada. En el caso de OSPF, puede utilizar Adyacencias de Conmutación de Etiquetas (LSAs, Label Switched Adjacency) opacos para anunciar información de estado de la topología.

Cuando la red esta involucrada en una interconexión de múltiples redes ópticas abarcando diferentes dominios administrativos, una sola instancia de un protocolo de enrutamiento intra-dominio no es una solución atractiva o realista. En este caso, se hacen necesarios protocolos de enrutamiento y señalización inter-dominio como EBGp.

Los protocolos de señalización bajo este modelo, también funcionan en los dominios óptico e IP facilitando así el establecimiento de los trayectos ópticos y de los LSPs extremo a extremo.

Con este modelo, el direccionamiento es común en la red IP y la interconexión de redes ópticas, como se muestra en la siguiente figura (figura 3.3).



Figura 3.3. Modelo de señalización de servicios unificados

Aunque la señalización GMPLS se implemente en los dos dominios, la semántica de servicios entre ellos pueden ser diferentes. De este modo, los atributos y servicios de señalización deben definirse independientemente para cada uno de ellos.

Los enrutadores en los extremos de la interconexión de redes ópticas deben por lo tanto identificar fronteras de servicio y realizar una adecuada traducción de los mensajes de señalización que atraviesan esta frontera.

En cualquier caso presentado en el modelo Peer, una suposición tácita es que un esquema de direccionamiento común será utilizado para las redes óptica e IP. Un espacio de direcciones común puede ser realizado trivialmente al utilizar direccionamiento IP en ambos dominios. De esta manera, los elementos de red ópticos se convierten en entidades direccionables IP.

3.3.2.2 Modelo de superposición (Overlay)

El modelo de superposición es ideal para su implementación en redes que no facilitan la integración de los dominios IP y óptico. El funcionamiento de los servicios prestados por la red, como se dijo antes, está basado en la solicitud de estos a través de la interfaz UNI, sin conocer el comportamiento interno de la red óptica.

La aproximación de enrutamiento del Modelo de Superposición permite el soporte al modelo de interconexión del mismo nombre. Bajo esta, un mecanismo superpuesto que permite a los enrutadores extremos registrarse y realizar consultas. Este es implementado de manera similar al mecanismo de resolución de direcciones utilizado por IP sobre ATM, permitiendo a los enrutadores extremos registrar las direcciones IP y los identificadores VPN. Una consulta satisfactoria retornaría la dirección de salida del puerto óptico a través del cual el destino externo podría ser alcanzado.

Con esta aproximación, un enrutador extremo podría determinar primero otros enrutadores extremos de interés consultando el registro. Después de que obtiene la dirección apropiada, inicia la solicitud de creación de un trayecto óptico hacia el destino deseado.

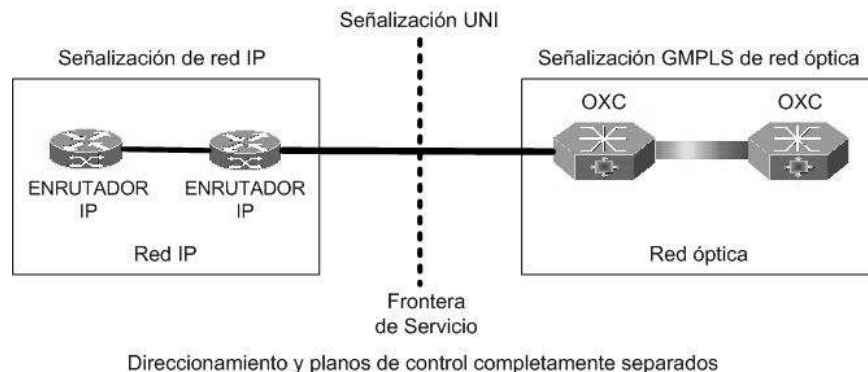


Figura 3.4. Modelo de señalización de dominio de servicio

Bajo este modelo, el plano de señalización de control en las redes IP y óptica están completamente separados, como se muestra en la figura anterior (figura 3.4).

Esta separación también implica la separación de los espacios de dirección IP y óptico (aún cuando la red óptica este usando direccionamiento IP interno). RSVP-TE y LDP pueden ser adaptados para la señalización UNI, aunque la completa funcionalidad de estos no es utilizada. Por ejemplo, la señalización de la UNI no requiere la especificación de rutas explícitas.

3.3.2.3 Modelo Ampliado

Este modelo, como se especifica al final del capítulo anterior, se plantea para redes que no implementan integración en el plano de control de los dominios IP y óptico, pero que pueden realizar intercambio de información relevante para el enrutamiento.

La aproximación de enrutamiento de dominio específico da soporte al modelo de interconexión ampliado. Bajo esta, el enrutamiento dentro de los dominios IP y óptico está separado, pero con un protocolo de enrutamiento estándar corriendo entre los dominios. Esto es similar al modelo de enrutamiento IP inter-dominio. Por ejemplo, el protocolo de enrutamiento IP inter-dominio BGP puede ser adaptado para intercambiar información de enrutamiento entre los dominios óptico e IP. Esto permitiría a los enrutadores anunciar prefijos de direcciones IP dentro de su red a la red óptica y recibir prefijos de direcciones IP externos de la red óptica. Bajo este esquema, es necesario identificar los puntos de salida en la red óptica correspondientes a las direcciones IP externamente alcanzables.

3.3.3 Esquema de direccionamiento

El principal asunto a tener en cuenta cuando se habla de direccionamiento, es el hecho de la granularidad en la identificación que se espera alcanzar sobre los trayectos ópticos. No es razonable asumir que cada terminación de canal o subcanal, o aún puertos de OXC, puedan tener asignada una dirección IP única. Además, el enrutamiento de un trayecto óptico dentro de la red no depende de la información precisa del punto de terminación, excepto solamente en el OXC de terminación (claro está, que la asignación de recursos en cada punto intermedio dependerá de la granularidad de los recursos requeridos).

Esto sugiere la utilización de un esquema de identificación por el cual los OXCs son identificados por una dirección IP única y un "selector" que indica la información de menor granularidad y que es de relevancia para un OXC. Esto no excluye la identificación de los puntos de terminación directamente con una dirección IP (y un selector nulo).

Este selector debe configurarse para tener el número adecuado de bits y una estructura que exprese la identificación de puerto, canal, subcanal, etc.

3.3.4 Enrutamiento

El enrutamiento dentro de una red óptica se basa en el conocimiento de la topología de red y la disponibilidad de recursos. Esta información permite la verificación del estado de los enlaces locales hacia todos los vecinos por cada OXC, por lo cual cada uno de estos debe determinar el estado de cada enlace óptico, el ancho de banda y otros parámetros del enlace, y la identidad del extremo remoto del enlace (por ejemplo, el número de puerto remoto). Esta última pieza de información se usa para especificar una etiqueta apropiada cuando se hace la señalización para el aprovisionamiento de trayectos ópticos.

La información de estado de enlace debe capturar los parámetros relacionados con restauración en los enlaces ópticos. Específicamente para la protección, las actualizaciones de estado de enlace deben tener información que permita el cálculo de los trayectos de protección compartidos.

El cálculo de una ruta primaria para un trayecto óptico dentro de una red óptica es esencialmente un problema de enrutamiento basado en restricciones. La restricción es típicamente el ancho de banda requerido por el trayecto óptico, posiblemente junto con restricciones administrativas y políticas. El objetivo del cálculo de rutas podría ser el minimizar la capacidad total requerida para enrutar los trayectos ópticos. Esto puede lograrse utilizando varios algoritmos.

Es de tener en cuenta que para el cálculo de los trayectos de protección se tienen dos posibilidades: Calcular primero el trayecto primario, y luego calcular el trayecto secundario, sea exclusivo o compartido, basándose en la ruta escogida para el primer trayecto; ó calcular en un solo paso los trayectos primario y secundario, utilizando un algoritmo como el de Suurbaale's, utilizando información específica de agrupamiento. En resumen, es esencial capturar la información suficiente para realizar los procedimientos de cálculo de ruta y maximizar los chances de establecimientos de trayecto exitoso. Dependiendo del procedimiento de cálculo de ruta utilizado, el tipo de soporte necesario durante el establecimiento de la ruta puede diferir.

La implementación distribuida del cálculo de ruta para rutas de protección compartidas requiere conocimientos sobre el enrutamiento de todas las rutas primarias y de protección en cada nodo. Esto aumenta lo que tiene que ver con escalabilidad. Por esta razón, puede ser práctico considerar la centralización del algoritmo de cálculo de ruta en un servidor de ruta que tiene completo conocimiento del estado de enlace y cálculo de rutas. La heurística para el cálculo de ruta completamente distribuido sin conocimiento completo de rutas de trayecto están por definirse.

Los protocolos de enrutamiento postulados para trabajar en las redes ópticas bajo un mismo dominio administrativo son OSPF e ISIS, cada uno con sus respectivas extensiones para el soporte de este tipo de redes. Estos protocolos, basados en algoritmos de estado de enlace, son muy similares en sus funcionalidades y mecanismos, además de ser ampliamente desplegados (incluyendo múltiples implementaciones interoperables de

ellos). Las funcionalidades de Ingeniería de tráfico para los dos protocolos son idénticas en su diseño.

OSPF es para la mayoría más optimo, y por lo tanto, más complejo. Corre en el la parte más de IP, permite enlaces virtuales, y se basa en la fragmentación IP para LSAs grandes. OSPF utiliza procesos complejos y de múltiples estados para sincronizar los datos entre vecinos. Su esquema de codificación es difícil de extender, además fue optimizado para IPv4, aunque ya existe la implementación de este para IPv6, la cual funciona en base a los enlaces y no en base a las subredes IP, como su predecesor.

ISIS no fue diseñado como un protocolo de enrutamiento IP. Corre directamente sobre el nivel 2, es más seguro ante suplantación (spoofing) o ataques, y el reparar particiones requiere entunelamiento. ISIS utiliza en esencia sus técnicas regulares de rebosamiento (flooding) para sincronizar los vecinos. Su codificación es ineficiente y dispuesto de forma simple, pero es fácil de extender (de ciertas formas) y esta listo para IPv6.

En conclusión, tanto OSPF como ISIS son muy parecidos en escalabilidad y funcionalidad, y su estabilidad y escalabilidad dependen en gran parte de la implementación de estos y no de su diseño.

3.3.5 Señalización

La señalización al interior de una red óptica para el aprovisionamiento de trayecto óptico es una operación relativamente simple al utilizar un procedimiento estándar dentro de todas las subredes. De otro modo, habría que utilizar señalización prioritaria dentro de las subredes, pero convirtiéndola a una señalización estándar a través de las INNI.

El impacto de fallas parciales transitorias debe ser minimizado en una red óptica. Específicamente, las rutas ópticas que no son afectadas directamente por una falla no deben ser eliminadas debido a ella. Es probable que cuando haya fallas de sistemas como el procesador central de un OXC, sea activado un sistema de respaldo. El protocolo de señalización debe estar diseñado de forma elástica ante fallas transitorias.

La señalización para restauración tiene dos fases diferentes. Hay una fase de reserva en la cual la capacidad para el trayecto de protección se establece. Luego, hay una fase de activación en la cual la ruta de protección es puesta en servicio. La primera fase no tiene restricciones de tiempo, mientras que la segunda si. Esta última también es dividida en dos fases: La propagación de información de falla al OXC de origen desde el punto de falla, y la activación de la ruta de protección. La señalización para estas dos fases debe ser muy rápida para obtener respuestas del orden de décimas de milisegundos.

Los principales protocolos de señalización, junto con sus respectivas extensiones para el plano de control en redes ópticas, son RSVP-TE y CR-LDP. Los dos proveen funcionalidad muy similar en el establecimiento de los trayectos ópticos. Cada uno tiene sus fortalezas y debilidades (las principales se indican en la tabla 3.1), aunque es seguro que mientras

sigan evolucionando ofrecerán funcionalidades cada vez mas semejantes, terminando talvez en la definición de una sola entidad que combine los mejores atributos de ambos protocolos.

CARACTERISTICAS	CR-LDP	RSVP-TE	COMENTARIOS
Estado de desarrollo	Reciente	Antiguo con varias extensiones, soporte para redes legadas	Los objetos RSVP han sido modificados para usarse en un entorno GMPLS
Transporte de señalización	UDP para descubrimiento, TCP para sesiones	Datagramas IP o encapsulación UDP para intercambio de mensajes	Detección de fallas no determinística con RSVP; fallas TCP pueden tener un impacto catastrófico en los LSPs con CR-LDP
Tipo de estado de conexión	Estado rigido	Estado suave	El estado suave se dice que no es escalable; RSVP soporta agregación de renovaciones (también conocida como reducción de renovaciones)
Confiabilidad	Fallas producen acciones proactivas de señalización	Dependiente de la respuesta del timer de estado suave para detectar fallas	Detección de fallas no determinística con RSVP-TE
Escalabilidad	Conexiones de estado rígido reducen el número de mensajes de señalización	Requiere reducción de renovaciones, agregación para minimizar el número de mensajes de señalización de estado suave	
Inicio de establecimiento	Mensaje de requerimiento de etiqueta (label request)	Mensaje PATH conteniendo el objeto LABEL-REQUEST	
Finalización de establecimiento	Mensaje de mapeo (mapping)	Mensaje RESV	
Definición de servicios diferenciados	TLV DIFF-SERV_PSC	Objeto DIFFSERV_PSC	Los dos contienen la información DSCP (Diffserv code point) y es incluida en el mensaje de requerimiento de establecimiento
Capacidad de ruta fuente	Esta es transportada en la lista TLV de EXPLICIT_ROUTE	Esta es transportada en el objeto EXPLICIT_ROUTE	Especifican la ruta utilizada para configurar el trayecto conmutado.

Tabla 3.1. Comparación entre CR-LDP y RSVP-TE

Actualmente, se considera como la mejor opción el dar soporte a las dos aproximaciones de señalización para asegurar interoperabilidad.

3.3.6 Interconexión de redes ópticas

El trabajo para lograr la interconexión de redes ópticas con diferente administración todavía no se ha completado. Sin embargo, en estas situaciones debe ser posible aprovisionar dinámicamente y restaurar los trayectos ópticos a través de estas redes. Por lo tanto, se requiere para este fin:

- Un esquema estándar para la identificación única de los puntos extremos de un trayecto óptico en diferentes redes.
- Un protocolo para determinar la accesibilidad de los puntos extremos a través de redes.
- Un protocolo de señalización estándar para aprovisionamiento de trayectos ópticos.
- Un procedimiento para la restauración de trayectos ópticos a través de redes.
- Soporte para políticas que afecten el flujo de información de control a través de redes.

La solución a estos inconvenientes puede encontrarse extendiendo la arquitectura de control IP para las redes ópticas, satisfaciendo los requerimientos funcionales de la interconexión de redes a través de la estandarización del enrutamiento y señalización a través de la ENNI.

Los procedimientos de descubrimiento de vecinos, utilizando algún protocolo de estado de enlace, pueden ser idénticos a los escritos anteriormente. Para esto, deberían estandarizarse estos mecanismos tanto para el descubrimiento entre y a través de redes.

Los mecanismos de direccionamiento nombrados antes pueden ser utilizados para identificar OXCs, puertos, canales y subcanales en cada red, siendo esencial que la dirección IP del OXC sea única en la interconexión de redes.

El aprovisionamiento extremo a extremo de un lightpath a través de múltiples redes involucra el establecimiento de segmentos de ruta en cada red secuencialmente. Por lo tanto, un segmento de ruta es establecido desde el OXC de origen hasta el OXC extremo en la red fuente. Desde este OXC, la señalización a través de NNI se utiliza para establecer un segmento de ruta hasta el OXC extremo en la siguiente red. Este procedimiento continua así hasta llegar al OXC de destino.

La restauración local a través de la ENNI es semejante al de la INNI, tal como se presento en el numeral anterior. La restauración a través de redes probablemente será del tipo 1+1, o segmentada dentro de cada red.

3.3.7 Esquemas de protección y seguridad lógica de red

Las conexiones manejadas por las redes ópticas cargan altos volúmenes de datos y consumen recursos de red significativos, por tanto se requieren mecanismos para el control del uso no autorizado de los recursos de red, que aseguren la autenticación de las entidades intercambiando información (señalización, enrutamiento o gestión de enlace) a

través de una interfaz de control, la integridad de la información intercambiada a través de la interfaz y la protección de los mecanismos de control de interferencias externas.

Además de los aspectos de seguridad relacionados con el plano de control, el plano de datos debe ser además protegido de la interferencia externa.

3.3.7.1 Aspectos generales de seguridad

Los protocolos de comunicaciones normalmente requieren dos mecanismo de seguridad principalmente: autenticación y confidencialidad. Los mecanismos de autenticación aseguran la verificación del origen de los datos y la integridad del mensaje, así las operaciones no autorizadas pueden ser detectadas y descartadas. Por ejemplo, el servicio de autenticación de mensaje puede impedirle a un cliente IP malicioso que monte un ataque de servicio contra la red óptica insertando un número excesivo de peticiones de creación de conexiones UNI. Adicionalmente, los mecanismos de autenticación pueden proveer:

1. Protección repetida, la cual detecta y rechaza intentando reordenar,
2. No-repudio, el cual puede ser deseable en propósitos de facturación y contabilidad.

La autenticación y la confidencialidad pueden ser logradas utilizando algoritmos criptográficos (de idioma clave) simétricos o de llave-pública (public-key). La integridad de mensajes simples y la confidencialidad se logran normalmente utilizando algoritmos simétricos criptográficos. Estos algoritmos típicamente requieren llaves secretas compartidas en pares y no proveen no-repudio, pero son típicamente menos profundos para hacer el cálculo. La Protección repetida se logra normalmente adicionando secuencia de números a los mensajes o contando con otros protocolos (p.e. TCP) para garantizar la secuencia apropiada de flujo de mensajes por encima del la integridad del servicio. Los algoritmos criptográficos de llave pública o asimétricos se utilizan típicamente, inicialmente para proveer autenticación de entidades iguales por dos caminos y acuerdo de llaves, el cual facilita el uso de los servicios de integridad y confidencialidad descritos anteriormente. Los algoritmos asimétricos proveen además firmas digitales utilizadas para implementar un servicio de no-repudio. La utilización de algoritmos asimétricos puede ser soportado por una infraestructura de llave-pública (PKI) o alguna otra, comunidad-definida, esquemas de asignación de llaves. Los algoritmos asimétricos son típicamente mas complejos computacionalmete que los algoritmos simétricos.

La confidencialidad de los mensajes de señalización es muy probable que sea deseada, esencialmente en casos donde los atributos de los mensajes incluyen información privada a las partes o grupos de comunicación (cliente y operador de red óptica). Ejemplos de dichos atributos incluyen cuenta de números, números de identificación de contrato, etc.

Desde que una red pueda estar fuera del control de el operador de red óptica (o cliente), la comunicación de control entre parejas puede estar sujeto a incrementadas amenazas de seguridad, tales como falsificación de direcciones, espías, e intentos de ingreso no

autorizados. Para contrarrestar estas amenazas, se deben emplear mecanismos de seguridad apropiados para proteger el (los) canal (es) de señalización y control.

3.4 CRITERIOS EN LOS DISPOSITIVOS FISICOS Y EL MEDIO DE TRANSMISIÓN

La escogencia de los equipos, así como de la fibra óptica durante el proceso de planeación de un sistema DWDM, son fundamentales para garantizar el cumplimiento de los requerimientos en cuanto a desempeño, flexibilidad, calidad, funcionalidad y escalabilidad de la red.

Para definir dichos requerimientos, es necesario que el diseñador visualice de una manera clara lo que pretende implementar, y para ello debe responder a 3 inquietudes básicas sobre la futura red: ¿Que tanto puede invertir?, ¿Que velocidad quiere alcanzar? y ¿Que tan lejos quiere llegar?. La solución de estas inquietudes brindará al diseñador información de gran utilidad para determinar que elementos y equipos debe adquirir con el fin de alcanzar los objetivos propuestos.

Una vez definidos los componentes necesarios se debe tener en cuenta que, así como DWDM es una tecnología que introduce potentes capacidades, de la misma manera trae consigo factores críticos que hay que considerar para obtener el mayor provecho durante su utilización. Las principales consideraciones de los usuarios de los sistemas de DWDM son la confiabilidad y la estabilidad que tienen en el tiempo, por tanto la prueba de los parámetros ópticos de calidad y del comportamiento desde la fabricación de los componentes hasta los integradores del sistema, son de vital importancia para asegurar que dicho sistema sea configurado con las especificaciones correctas y presente un funcionamiento robusto por muchos años.

En la Figura 3.5 se muestran los factores críticos que limitan el desempeño de los sistemas DWDM. Estos se han dividido en tres grandes categorías: Potencia, Tiempo y Longitud de onda. Pero al mismo tiempo la combinación de estas categorías dan origen a otros factores de igual importancia.

En el eje de la potencia se encuentran: la atenuación de la fibra, la potencia del láser, y las pérdidas en los componentes. En el eje del tiempo, se tienen: la dispersión por modo de polarización (PMD - Polarization Mode Dispersion) de la fibra, la dispersión cromática, así como el Jitter de la señal y la tasa de transmisión de datos. En la intersección de los dos ejes mencionados anteriormente aparecen nuevos factores como la profundidad de la modulación del láser, falta de linealidad de la fibra y de los componentes, la Intensidad de Ruido Relativa (RIN), y tasa de error de bit (BER).

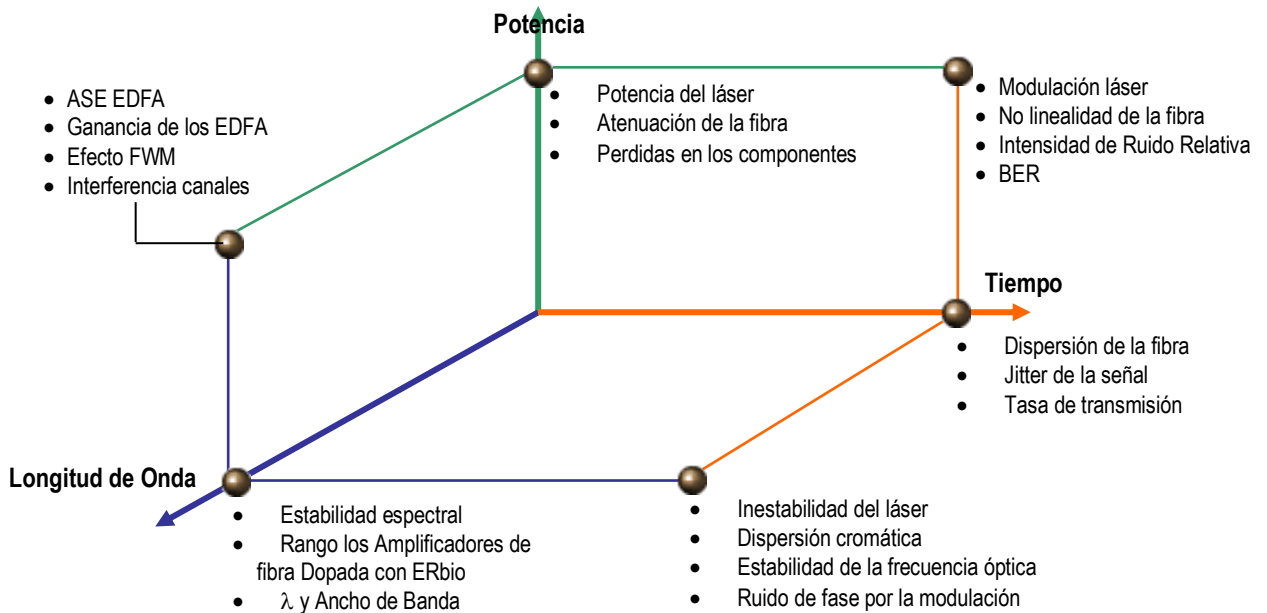


Figura 3.5. Dimensionamiento de factores críticos en sistemas WDM.

Una dimensión característica de los sistemas DWDM son las longitudes de onda, las cuales traen consigo nuevos aspectos críticos. Por tanto, en este eje se pueden encontrar elementos como la estabilidad espectral, el rango espectral EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier), longitud de onda central y ancho de banda. En la esquina entre este eje y el del tiempo, aparecen: la inestabilidad del láser, la dispersión cromática, la estabilidad de la frecuencia óptica y el ruido de fase por la modulación. Y finalmente, en la intersección entre la longitud de onda y la potencia están: la emisión espontánea amplificada (ASE) EDFA, la ganancia de los EDFA, la interferencia entre canales y la mezcla de cuatro longitudes de onda (Four Wave Mixing).

Durante la planeación de la red y etapas de implementación se deben considerar de manera apropiada todos estos aspectos anteriormente mencionados.

A continuación se profundizará en los parámetros y fenómenos, que en mayor grado afectan la calidad de la transmisión de las señales en este tipo de sistemas, y que están directamente relacionados con la fibra y los componentes ópticos.

3.4.1 Fibra Óptica

Actualmente existen diferentes tipos de fibra, de los cuales no todos son aptos para la implementación de la tecnología DWDM. El tipo de fibra NZ-DSF (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber – G.655), es el mejor para dicho fin. Aunque la fibra estándar NDSF (Non-Dispersion-Shifted Fiber - G.652) es la que se encuentra en la mayoría de instalaciones de

fibra y puede soportar WDM en el área metropolitana, sus características no permiten obtener el mayor rendimiento en sistemas de alta capacidad como DWDM.

El tipo de fibra NZ-DSF trabaja en la tercera ventana (C) cuyo rango va desde 1528 nm hasta 1561 nm permitiendo conjugar, sin problema, velocidades por encima de los 10 Gbps y donde los niveles de dispersión se mantienen entre 1 y 6 ps/nm, pero adicionalmente los desarrollos en la fabricación de fibras mucho más avanzadas permiten que se pueda trabajar, en algunos casos, en la cuarta ventana (L) que va desde 1561-1620 nm.

Esta fibra permite trayectos entre amplificadores de 120 a 160 Km, y entre repetidores de 600 a 1200 Km para regenerar la señal.

Adicionalmente a la elección del tipo de fibra, en el diseño de este tipo de redes se deben tener en cuenta parámetros que hacen referencia a diversos factores que afectan la señal durante su paso por este medio de transmisión. Para implementar sistemas basados en fibra óptica que permitan cumplir con los estándares internacionales adaptándose a los requerimientos del sistema, tales como: tipo y número de empalmes requeridos, tipo de cable (cubierta más apropiada), número de extensiones de fibra, entre otros, se recomienda la lectura del trabajo GUTIERREZ/RAMÍREZ (Referenciado en la bibliografía).

Los tres efectos importantes que se presentan en la fibra óptica y que afectan la transmisión de las señales limitando su desempeño son: atenuación, dispersión y no linealidad.

3.4.1.1 Atenuación

La atenuación en las fibras ópticas es originada por factores intrínsecos al material, principalmente dispersión y absorción, y por factores extrínsecos que incluyen defectos en el proceso de fabricación, el entorno y la torcedura física.

La atenuación debido a la absorción es causada por las impurezas del vidrio, y cualquier defecto atómico en el vidrio. Estas impurezas absorben la energía óptica, haciendo que la potencia de la luz disminuya. Por otra parte, la absorción debida al agua, y que es introducida en el proceso de fabricación está siendo eliminada en algunos nuevos tipos de fibra.

La atenuación en las fibras ópticas están directamente relacionadas con la longitud de la fibra y la longitud de onda de la luz. En la figura 3.6 se muestra la pérdida en dB/Km en función de la longitud de onda.

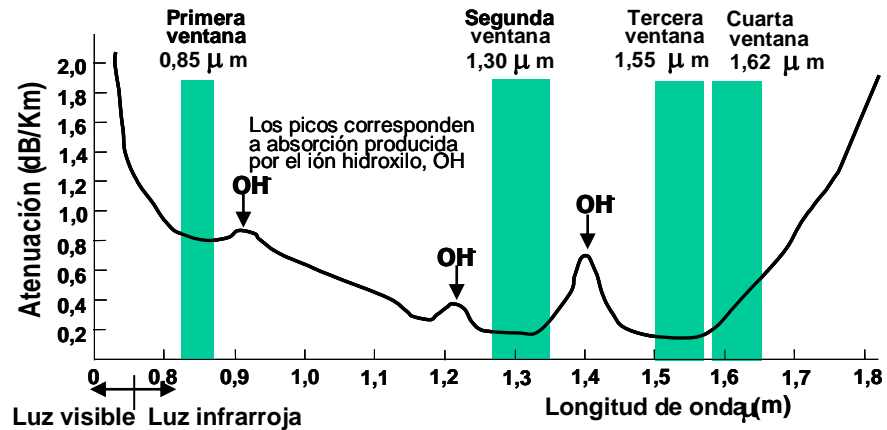


Figura 3.6. Atenuación en función de la Longitud de onda

La atenuación en fibra se compensa principalmente con el uso de amplificadores ópticos. Por tanto es importante hacer un análisis para determinar la atenuación de acuerdo con las distancias determinadas para los enlaces y con ellos disponer del equipo necesario para garantizar el correcto desempeño del sistema.

Dicho análisis permite la previsión de las pérdidas del enlace y con ellas determinar la potencia óptica requerida, que es una parte crítica y necesaria en la planificación de una red. Los fabricantes deben suministrar pautas, o reglas de ingeniería, a emplear para sus equipos. En general hay muchos factores que pueden causar pérdidas de señal óptica. El más obvio es la distancia de la propia fibra, el cual acostumbra a ser el factor más importante en el transporte a larga distancia. En las MAN, el número de nodos de acceso, tales como OADMs (Optical Add/Drop Multiplexer), es generalmente el factor que más contribuye a las pérdidas ópticas.

La clave para un cálculo preciso de la previsión de la potencia óptica es conseguir una lectura exacta de la fibra utilizando un OTDR (Optical Time Domain Reflectometer). Este es un equipo de prueba que permite obtener información importante sobre un tramo de fibra (tal como: medida de la longitud de la fibra, atenuación en dB del enlace), así como la atenuación de cada una de las secciones que conforman todo el tramo, características de atenuación de la propia fibra, ubicación de los conectores, empalmes y fallos en el cable.

El objetivo del cálculo de la pérdida óptica es asegurar que la pérdida total no exceda del previsto para dicho trayecto del enlace de fibra. Típicamente se tienen unos valores de pérdidas debidas por:

- Pérdida por conector. Aproximadamente de 0,2 dB si los conectores son modernos monomodo del mismo fabricante. Si los fabricantes de los dos conectores (mitades de cada conexión) son diferentes, entonces la pérdida media es de 0,35 dB.
- Pérdida de fibra. Es de 0,25 dB/Km debido a la atenuación (típicamente pero depende del fabricante).

- Edad de la fibra. Es de 2 dB sobre la vida del sistema.

Posteriormente se suman todos estos valores según los requerimientos (número de empalmes, longitud de la fibra, etc), para luego obtener las pérdidas totales del sistema. Este valor final se compara con las presupuestadas y si están dentro de la previsión no hay problema, pero si por el contrario sobrepasa lo estimado deben hacerse cambios sobre el diseño para compensar el margen excedido. Esto puede incluir la adición de un amplificador o reducir el número de elementos que están introduciendo pérdidas en el tramo.

Además hay que anotar que los amplificadores ópticos amplifican toda la entrada, incluido el ruido. Así la relación señal/ruido puede llegar a ser tan baja que una señal limpia no puede ser detectada en el extremo receptor. Y para resolver este inconveniente se deben usar regeneradores que realicen funciones 3R (Reshape, Retime, Retransmit).

3.4.1.2 Dispersión

La dispersión es un efecto que produce distorsión en la señal, debido a que ensancha el pulso de luz mientras viaja a través de la fibra, lo que limita el ancho de banda de la fibra. Dos tipos generales de dispersión afectan a los sistemas DWDM, la dispersión cromática, y la dispersión por modo polarizado (PMD).

3.4.1.2.1 Dispersión cromática

Se produce cuando las distintas longitudes de onda se propagan a diferentes velocidades, y se incrementa con el cuadrado de la longitud. En la fibra monomodo, la dispersión cromática está formada por dos componentes que son la dispersión material, que ocurre cuando las longitudes de onda viajan a diferentes velocidades a través del material, y la dispersión de guía de onda, que es consecuencia de los diferentes índices de refracción del núcleo y el revestimiento de la fibra. Por tanto, se puede deducir que la dispersión varía como función de la longitud de onda para un material dado.

Adicionalmente, esto origina la ampliación del pulso, lo que hace que se mezcle dentro de pulsos adyacentes, haciendo difícil la recuperación de la señal en su destino (ver figura 3.7). A medida que el la longitud del enlace y tasa de bit aumentan, los efectos de la dispersión cromática también se incrementarían.

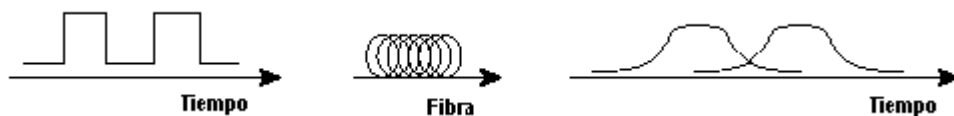


Figura 3.7. Principio de dispersión

Es importante tener en cuenta que, la dispersión cromática no está influenciada significativamente por el decremento en el espaciamiento de los canales o el incremento en el número de canales.

Los nuevos diseños de fibra buscan disminuir en gran parte los efectos de este fenómeno, pero se pueden atenuar haciendo uso de compensadores de dispersión, dispositivos conocidos como Módulos de Compensación de Dispersión (DCM, Dispersión Compensation Module), aunque se debe evitar el uso de estos componentes debido a su elevado costo.

Como ya se dijo, la dispersión cromática de todas las fibras cambia en función de longitud de onda y la velocidad de dicho cambio se expresa como la pendiente de la dispersión cromática. A menor pendiente de dispersión cromática, la dispersión cromática con respecto a la longitud de onda será menor. Para redes DWDM, la baja pendiente de dispersión cromática permite un funcionamiento óptimo y más uniforme a lo largo de toda la banda de la longitud de onda. Una dispersión cromática muy baja, que puede ocurrir en el extremo inferior de la banda C en las fibras ópticas NZDF pero con una elevada pendiente, puede causar el fenómeno de la mezcla de cuatro longitudes de ondas (FWM - el cual será explicado posteriormente) y una degradación del rendimiento de sistema multicanal DWDM. La figura 3.8 ilustra lo anteriormente dicho.

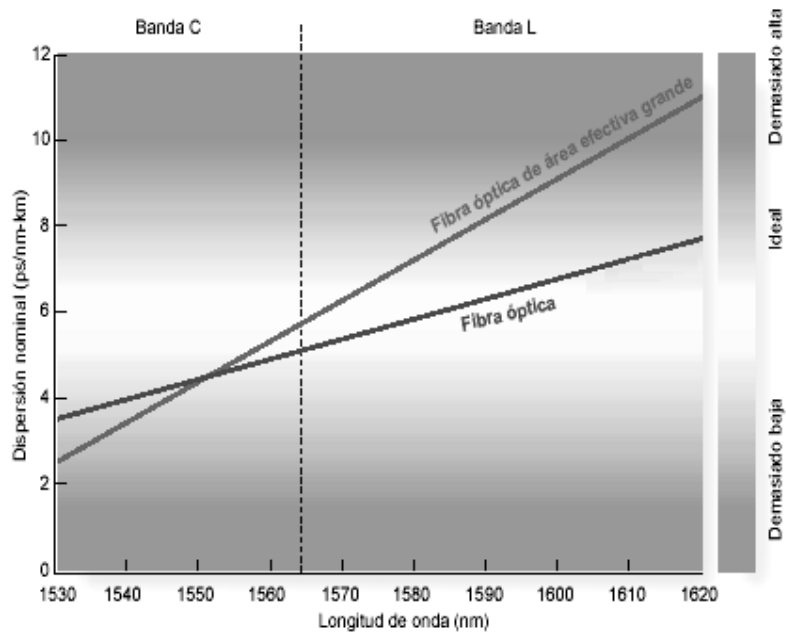


Figura 3.8. Pendientes de la dispersión cromática en función de la longitud de onda.

El objetivo de los fabricantes, es lograr en el diseño de sus fibras una baja pendiente de dispersión cromática para que las señales se desplacen grandes distancias con un mínimo de dispositivos de compensación de dispersión cromática, debido al elevado costo de estos.

Por otra parte, la dispersión cromática residual es la dispersión cromática que queda después de la transmisión por un tramo de fibra óptica, con o sin compensación de la dispersión cromática. Aunque compensar la dispersión cromática acumulada de un solo canal es relativamente fácil, compensarla en toda la banda de canales de un sistema DWDM es más difícil. En una red óptica transparente, la dispersión cromática residual se acumulará de un nodo al siguiente. En una red OXC, la menor dispersión cromática residual minimiza la acumulación de la dispersión cromática, permitiendo así redes transparentes más grandes con un menor costo total de los sistemas.

De esta manera, se puede concluir que como la baja pendiente de dispersión cromática de la fibra óptica es una característica que depende fundamentalmente del fabricante, se requiere de un análisis detallado de las ventajas que puede ofrecer cada uno de ellos en el mercado, para determinar cual es que mas se ajusta a las necesidades de la nueva red, y así evitar la implementación de un sistema de compensación y en su defecto el mínimo de componentes posible.

3.4.1.2.2 Dispersión por modo de polarización

La mayoría de las fibras monomodo soportan dos modos de polarización perpendiculares, uno vertical y otro horizontal. Debido a que los estados de polarización no se mantienen, hay una interacción entre los pulsos y como consecuencia un ensanchamiento de la señal. La dispersión en modo polarización (PMD) es causada por la forma ovalada de la fibra como resultado del proceso de fabricación o de tensiones externas.

Debido a que las tensiones pueden variar con el tiempo, la PMD, a diferencia de la dispersión cromática, puede variar con el tiempo. La PMD solo se ha convertido en un problema con el surgimiento de velocidades de transmisión más altas, generalmente a velocidades sobre 10 Gbps.

La diferencia en los tiempos de arribo en los modos de dispersión por polarización (PMD), tal como se muestra en la figura 3.9, es típicamente medida en picosegundos. Sino es propiamente controlado, la PMD puede producir errores excesivos en sistemas digitales y que pueden distorsionar señales de video transmitidos utilizando formato de modulación de amplitud analógico.

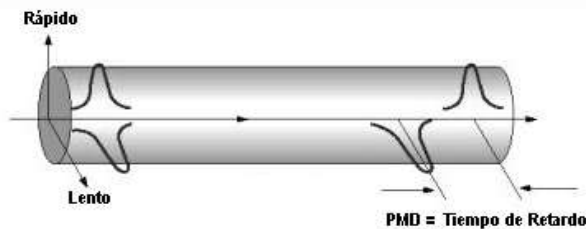


Figura 3.9. PMD –Dispersión por Modo de Polarización

El efecto PMD es impredecible y sus efectos no son uniformes, además su compensación es muy difícil. Actualmente no hay dispositivos comerciales para la compensación de PMD disponibles todavía, pero existen unos límites en los valores PMD específicos para el diseño de las fibras que son recomendados por el grupo de trabajo de la Comisión Electrónica Internacional (IEC, International Electrotechnical Commission) y que aún siguen actualmente en desarrollo con el objetivo de ser publicados como documentos de la Asociación de Industria de Telecomunicaciones (TIA, Telecommunications Industry Association), los cuales son adoptados por los principales fabricantes.

3.4.1.3 No linealidad

La no linealidad en la fibra óptica tiene efectos similares a los de los sistemas físicos no lineales, ya sean mecánicos o electrónicos. Esto causa la generación de frecuencias espúreas y de nuevas frecuencias resultado de la suma o diferencia entre ellas. Estas señales adicionales causan efectos de pérdidas inesperadas en redes de comunicaciones ópticas.

La no linealidad no es un defecto de diseño o fabricación de la fibra óptica; es una característica inherente que presenta cualquier energía electromagnética al pasar a través de un medio físico. Preocupa especialmente a los diseñadores y usuarios de sistemas de comunicación con fibra óptica, debido a la alta coherencia de la energía del láser que utilizan. La fuerza del campo eléctrico necesario para un nivel dado de potencia transmitido, incrementa con el nivel de coherencia en la onda. De esta manera, aún niveles moderados de potencia en sistemas DWDM altamente coherentes, llevan a niveles eléctricos suficientes para producir efectos no lineales. Pero los efectos no lineales tienden a manifestarse cuando la potencia óptica es muy alta (ver figura 3.10), como la requerida en sistemas DWDM de largas distancias.

Los efectos lineales tales como la atenuación y la dispersión cromática pueden ser compensados, pero los efectos no lineales son acumulativos y adicionalmente limitan la cantidad de datos que pueden ser transmitidos por fibra óptica. Los más importantes tipos de efectos no lineales son: la dispersión, la automodulación de fase, la modulación de fase cruzada, dispersión estimulada de Brillouin, dispersión estimulada de Raman, y la mezcla de cuatro ondas. En sistemas DWDM, la mezcla de cuatro ondas es la más crítica.

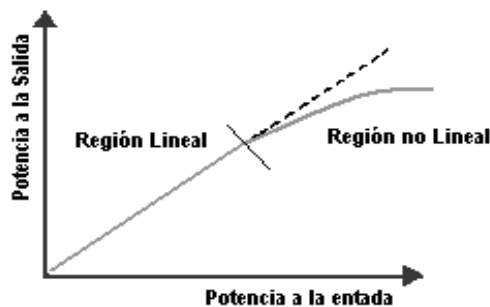


Figura 3.10. Efectos de no linealidad a altos niveles de potencia

3.4.1.3.1 Mezclado de cuatro ondas (four-wave mixing, FWM)

FWM es uno de los efectos no lineales más destructivos en los sistemas DWDM. Es un fenómeno por el cual cuando se propagan varias longitudes de onda diferentes, la dependencia con la intensidad del índice de refracción no sólo induce a desplazamientos de fase dentro de cada canal sino también a la aparición de nuevas ondas a frecuencias indeseadas. Es decir, suponiendo que se propagan dos portadoras a frecuencias ópticas f_1 y f_2 por una misma fibra, el proceso no lineal generará dos nuevas bandas laterales a frecuencias $2f_1 - f_2$ y $2f_2 - f_1$ (ver figura 3.11).

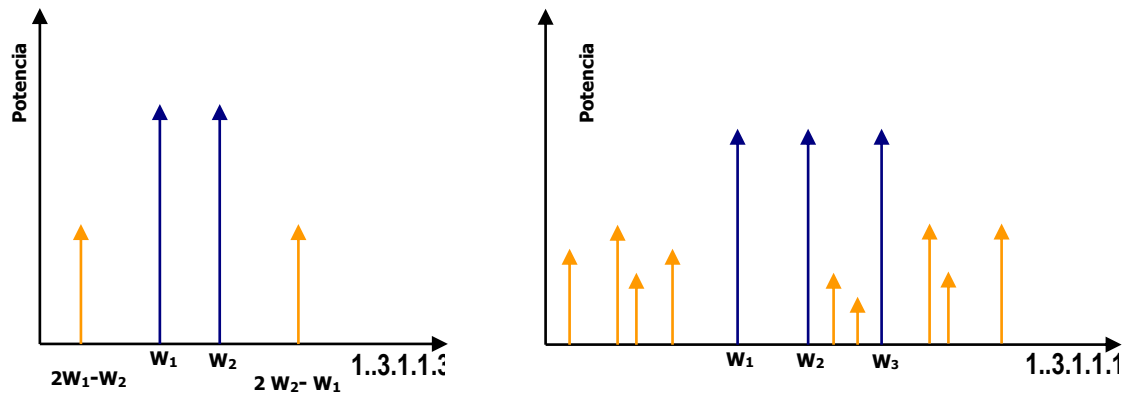


Figura 3.11. Creación de señales indeseadas dentro del rango espectral de transmisión debida a FWM

Estas bandas laterales se propagarán junto con las dos ondas iniciales aumentando su amplitud a expensas de la energía de las originales. Si los canales se encuentran igualmente espaciados, algunas de las nuevas ondas generadas tendrán frecuencias coincidentes con las de los canales inyectados en la fibra. Los efectos inmediatos serán una atenuación adicional de la potencia de los canales y fenómenos de diafonía. La eficiencia del proceso no lineal de FWM depende del espaciado de los canales y de la dispersión de la fibra. Las velocidades de grupo de las ondas iniciales y generadas son distintas como consecuencia de la dispersión cromática. Esto provoca la destrucción de la condición de adaptación de fases del proceso de FWM y reduce la eficiencia de potencia en la generación de nuevas ondas.

Por tanto, el número de señales indeseadas que aparecen, está dado por:

$$N^2 (N - 1) / 2$$

Donde N es el número de canales. De esta manera, 24 canales aparecerían en un sistema de 4 canales, 224 en uno de 8 y 1920 canales en uno de 16 canales, lo que produciría una interferencia catastrófica en el receptor.

FWM es sensible a:

- Dispersión de la fibra óptica
- El incremento en la potencia del canal
- Un decremento en el espaciamiento entre canales
- Un incremento en el número de canales (aunque un valor de saturación podría ser alcanzado)

Este efecto se puede atenuar incrementando el área efectiva en la fibra o incrementando el valor absoluto de la dispersión cromática. Adicionalmente este factor no es influenciado significativamente por el incremento en la tasa de bit del canal.

Por las razones anteriormente mencionadas, el diseño de las fibras de tipo NZDSF se hizo con el objetivo de obtener valores de dispersión suficientemente reducidos, pero no nulos, para evitar al máximo los efectos no lineales.

3.4.1.3.2 Automodulación de Fase (SPM, Self Phase Modulation) y Modulación de Fase Cruzada (XPM, Cross Phase Modulation)

Estos efectos no lineales se caracterizan por una modulación de fase de la señal óptica inducida por la potencia óptica de la propia señal (SPM) o de otra portadora óptica o canal vecino (XPM).

Se presentan principalmente en fibras ópticas monomodo. La eficiencia del XPM es el doble que en el caso del SPM. Los fenómenos de SPM y XPM en fibras estándar se producen debido a la existencia de una componente del índice de refracción dependiente de la intensidad de las señales ópticas. En el caso del sílice se tiene un valor reducido, pero a pesar de ello, las elevadas longitudes de interacción típicas de los enlaces ópticos magnifican estos efectos no lineales. Estos efectos no lineales resultan especialmente perjudiciales en combinación con la dispersión cromática de la fibra, ya que esta última convierte las variaciones de fase en variaciones de intensidad que limitan las prestaciones del sistema a la salida del fotorreceptor. Para evitar estas degradaciones puede emplearse la técnica de inversión espectral, conocida también habitualmente como Conjugación de Fase Óptica (OPC, Optical Phase Conjugation) y que consiste en situar un elemento conjugador óptico en mitad del enlace de fibra. Bajo ciertas condiciones de diseño, se pueden compensar los efectos conjuntos de dispersión y SPM.

En sistemas DWDM, el ensanchamiento del espectro creado por SPM en un canal de señal puede interferir con las señales adyacentes.

SMP se incrementa por varias razones, cuando se aumenta la potencia inyectada en un canal de una fibra determinada con un área eficaz fija, incrementando en la tasa de bit del canal, o con dispersión cromática negativa. Pero estos efectos se pueden contrarrestar consiguiendo valores de dispersión cromática pequeños o iguales a cero, incrementando el área efectiva de la fibra o mediante mecanismos de compensación de dispersión.

De la misma manera, XPM es sensible a los mismos factores nombrados anteriormente, así como al incremento en el número de canales. Pero no es influenciado significativamente por la disminución en el espaciamiento entre canales, como si es el caso de SPM. Pero así mismo se puede solucionar incrementando el área efectiva de la fibra y compensando la dispersión.

3.4.1.3.3 Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS, Stimulated Brillouin Scattering,) y Dispersión Estimulada de Raman (SRS, Stimulated Raman Scattering)

La dispersión estimulada Raman es un proceso no lineal producido por la interacción que sufren las ondas ópticas con las vibraciones moleculares del material, y las ondas incidentes se dispersan al chocar con las moléculas y experimentan una reducción de su frecuencia óptica. La dispersión estimulada de Brillouin es similar al SRS, salvo que el SBS depende de ondas sonoras en lugar de vibraciones moleculares. En este aspecto, ambos procesos involucran tres ondas según las cuales la onda óptica incidente (de bombeo) se convierte en una onda de mayor longitud de onda por medio de la excitación de una vibración molecular (SRS).

No obstante, existen importantes diferencias entre el SBS y el SRS que conducen a consecuencias distintas en el sistema de comunicaciones ópticas. En primer lugar, el valor de pico del coeficiente de ganancia en fibras ópticas monomodo es dos órdenes de magnitud superior que el coeficiente de ganancia para el SRS y aproximadamente independiente de la longitud de onda. Como consecuencia de ello, bajo determinadas condiciones el SBS será el proceso no lineal dominante. En segundo lugar, el ancho de banda de ganancia óptica del SRS es del orden de 6 THz. Por lo tanto, no existe prácticamente reducción en la ganancia Raman para láseres de bombeo de gran ancho de línea. El ancho de banda del SBS en fibras de sílice, por otro lado, es de unos 20-100 MHz a 1550 nm y varía inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda. En este caso, la máxima ganancia del SBS se producirá para láseres con anchos de línea inferiores a 20 MHz.

Adicionalmente y a diferencia del SRS, el cual puede actuar en ambas direcciones, el SBS se produce únicamente en la dirección de propagación opuesta a la del bombeo, generando una onda reflejada hacia el transmisor y provocando la atenuación de la potencia óptica inyectada. En el caso de fibras estándar operando a 1550 nm la onda dispersada se encuentra desplazada con respecto a la onda incidente una frecuencia de unos 11 GHz. Con respecto al nivel de potencia óptica crítico para el cual el SBS degrada la calidad del sistema, éste se encuentra en torno a los 5-10 mW para una longitud efectiva de unos 25 km.

En sistemas multicanal DWDM puede demostrarse que cada canal óptico interactúa con la fibra independientemente de los otros, por lo que la potencia crítica se mantiene constante aumentando el número de canales del sistema. Por último, conviene indicar que el SBS es bastante sensible al formato de modulación empleado. Velocidades de

modulación elevadas producen espectros ópticos anchos. De este modo, el empleo de modulaciones PSK permite reducciones mayores que utilizando modulaciones ASK o FSK. Por ello, para aumentar el nivel de potencia crítico del SBS en sistemas modulados en intensidad suelen utilizarse técnicas de modulación de fase de la portadora óptica que no afectan al proceso de detección directa. Un efecto beneficioso se obtendría empleando modulación directa frente a modulación externa debido precisamente a la variación de frecuencia introducido en el transmisor óptico que provoca un ensanchamiento del espectro de modulación.

3.4.1.4 Cuadro resumen

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se muestra a continuación un cuadro resumen que indica los factores mas relevantes a evaluar en el diseño de sistemas de fibra óptica:

Factores del Sistema	Consideraciones / Opciones
Tipo de fibra	NDSF (G.652) - NZ-DSF (G.655)
Dispersión	Regeneradores o compensadores de dispersión
No linealidades de la fibra	Características de la fibra, longitudes de onda y potencia del transmisor
Operación de longitudes de onda	Recomendaciones de la ITU-T
Potencia del transmisor	Normalmente expresado en dBm
Tipo de fuente	Led ó Laser
Sensibilidad en el receptor / Características de sobrecarga	Normalmente expresada en dBm
Tipo de Detector	Diodo PIN, APD o IDP
Código de modulación	AM, FM, PCM o Digital
Tasa de errores de bit (BER) (Sis. Digitales)	10^{-9} , 10^{-12} normalmente
Promedio de ruido en la señal	Especificado en dB
Número de conectores	Incrementa la pérdida con el número de conectores
Número de empalmes	Incrementa la perdida con el número de empalmes
Requerimientos del Medio Ambiente	Humedad, temperatura, exposición a la luz del sol
Requerimientos Mecánicos	Flamable, aplicaciones Interiores/Exteriores

Tabla 3.2. Cuadro Resumen de factores a evaluar en el diseño de sistemas de fibra óptica

3.4.2 Equipos

Actualmente la fabricación y comercialización de equipos para la implementación de soluciones basadas en tecnología GMPLS/DWDM es bastante limitada, ya que apenas está entrando en el mercado para perfilarse como una solución integral a la necesidad de capacidad de transporte y funcionalidad tanto para las redes MAN como WAN.

Aún así, existe un abanico de posibilidades para la configuración de una red, de acuerdo con los requerimientos que se tenga. Pero existen factores intrínsecos a los equipos que degradan el comportamiento de la señal y que por tanto afectan el diseño inicial planteado, y otros, que adicionalmente aparecen en la etapa de implementación.

De manera general se encuentran las pérdidas por inserción y la interoperabilidad entre equipos, sobre los cuales se hablará a continuación. Posteriormente se especificará para ciertos equipos, criterios importantes para obtener el desempeño esperado una vez se encuentre en funcionamiento la red.

3.4.2.1 Pérdidas por inserción

Las pérdidas por inserción (IL, Insertion Loss) de un componente están dadas por la diferencia entre la potencia de entrada y la de salida de este, tal como se indica en la siguiente ecuación:

$$IL(dB) = 10\text{Log}_{10}((P_{in} - P_{out}) / P_{in})$$

Esta formula cuantifica las pérdidas de potencia en el dispositivo en una longitud de onda en particular o sobre una región espectral dada. Para un componente DWDM, IL está normalmente citado para la banda de transmisión de este. Obviamente, las perdidas por inserción deben ser lo mas bajas posibles.

Para cuantificar las pérdidas por inserción en un dispositivo DWDM, se requiere una curva donde se enfrentan las pérdidas contra la longitud de onda, dadas por el fabricante de dicho equipo. De esta gráfica, el valor más útil es la longitud de onda en la cual las pérdidas son mayores. Utilizando este dato, el diseñador puede calcular de manera segura un presupuesto de pérdidas que aplicará en cada longitud de onda de transmisión. De hecho, esta es la forma que usan gran parte de los proveedores de equipos para especificar las pérdidas por inserción de los canales.

Este método es aplicable cuando el ancho del canal es desconocido, pero algunos componentes son propuestos para aplicaciones generales donde las condiciones exactas de operación no pueden ser determinadas de antemano. En estas situaciones, la mejor forma de describir las IL de el dispositivo es calcular la longitud de onda central del pasabanda y determinar las perdidas a esa longitud de onda determinada. Este método es utilizado con frecuencia para caracterizar dispositivos de un solo canal o aquellos con pasabanda simétrico.

Factores importantes a considerar cuando se están comparando los valores de IL para diferentes dispositivos incluyen el efecto de los conectores y la uniformidad de la IL a lo largo de los canales en una unidad multicanal.

3.4.2.2 Interoperabilidad

Actualmente es muy difícil conseguir una plena interoperabilidad entre equipos DWDM de diferentes fabricantes, esto es consecuencia de la poca implementación que hasta ahora se tiene de dicha tecnología a pesar de la alta aceptación en el entorno de las telecomunicaciones, vista como la solución más acertada a los problemas de capacidad de las actuales redes ópticas.

Adicionalmente, esta falta de interoperabilidad obedece muchas dificultades, sobre todo por el carácter analógico de las interfaces y el extenso rango de parámetros en los cuales hay que ponerse de acuerdo.

Por tanto, una solución práctica por el momento es emplear regeneradores para interconectar subredes totalmente ópticas de diferente naturaleza, donde cada subred debe estar equipada por un solo fabricante. Aunque esta solución es un poco más costosa en términos de equipamiento, proporciona fronteras claras entre subredes.

De esta manera queda resuelto parcialmente el problema en cuanto a equipos se refiere, porque para comunicar dichas subredes debe haber interoperabilidad en los protocolos, tanto de señalización como de control, factores que juegan un papel importante en el proceso de diseño de la red.

3.4.2.3 Pérdidas por retorno óptico

Cuando se inyecta una luz dentro de un componente de fibra óptica, tal como un conector, un multiplexor o la misma fibra óptica, parte de su energía es transmitida, otra parte es absorbida y otra es reflejada.

La reflexión óptica de potencia es indeseable por muchas razones:

- Contribuye a todas las pérdidas de potencia.
- Los transmisores láser de alto rendimiento como los usados en sistemas DWDM son bastante sensibles a la reflexión de la luz, lo cual puede degradar significativamente la estabilidad de el láser y la relación señal a ruido del sistema. En una situación extrema, una reflexión fuerte de potencia puede dañar el transmisor.
- La luz reflejada puede reflejarse de nuevo en dirección hacia delante. Estas nuevas reflexiones retrazan la señal original, causando problemas en etapa de demodulación. Este fenómeno es llamado interferencia multitrayecto (MPI).

- Las reflexiones que ocurren dentro del amplificador óptico EDFA, pueden conducir a interferencia multitrayecto adicional y pueden contribuir significativamente al ruido del amplificador.

Por ejemplo un componente con una reflexión de -55 dB sería preferible a uno con una reflexión de -50 dB.

3.4.2.4 Emisores ópticos

Las fuentes de luz son dispositivos activos encargados de convertir las señales eléctricas a pulsos de luz, razón por la cual la escogencia de la fuente de luz a usar es de alto cuidado durante el diseño del sistema, además de ser uno de los elementos más costosos.

La fuente óptica debe reunir un número de requerimientos. Mecánicamente, por supuesto, sus dimensiones físicas deben ser compatibles con el tamaño del cable de fibra óptica que va a ser utilizado para acoplar adecuadamente su potencia, con el fin de obtener la mayor eficiencia posible. Para evitar problemas de ensamblaje en sistemas DWDM, donde un número de módulos transmisores se utilizarán necesariamente a proximidades bastante cercanas, la fuente debe ser físicamente pequeña, de muy poco peso y altamente confiable.

Adicionalmente debe ser capaz de generar suficiente potencia óptica para enfrentar los requerimientos de tasa de error (BER) en la aplicación particular, y su salida debe ser fácilmente modulada a la tasa requerida. La linealidad puede ser importante si la salida de potencia varía o cuando se realiza la modulación analógica.

Aunque los Diodos Emisores de Luz (LEDs, Light Emitting Diodes) y los láseres (diodos o semiconductores) reúnen estos requerimientos hasta cierto grado de utilidad, la potencia y el ancho de banda ofrecidos por el último hacen de éste la fuente más apropiada y por tanto la más demandada para los sistemas DWDM.

Los requerimientos para los láseres incluyen una longitud de onda precisa, un espectro de emisión estrecho, suficiente potencia, y control del chirp (el cambio en frecuencia de una señal en el tiempo). Estos elementos semiconductores satisfacen bien los tres primeros requerimientos. Sin embargo, el chirp puede estar afectado por los medios usados para modular la señal. En los Láseres modulados directamente, la modulación de la luz que representa el dato digital se hace internamente. Cuando los láseres semiconductores son modulados directamente, el chirp puede llegar a ser un factor limitante a altas velocidades (por encima de 10 Gbps). Por otro lado la modulación externa (cuando la modulación se hace en un dispositivo externo) ayuda a limitar el chirp.

Los tipos de Láseres semiconductores habituales son: monolíticos Fabry- Perot, y con realimentación distribuida (DFB, Distributed FeedBack). El segundo tipo se adapta bien a las aplicaciones DWDM, emitiendo una luz casi monocromática, que es capaz de funcionar a altas velocidades, tiene una favorable relación señal/ruido, y tiene una linealidad superior. Los Láseres DFB también tienen frecuencias centradas en la región de los 1310

nm y de 1520 a 1565 nm. El último rango de longitud de onda es compatible con amplificadores EDFAs. Hay muchos otros tipos y subtipos de Lasers, como los sintonizables de espectro estrecho que podrían ser útiles, pero su rango de sintonización está limitado a 100-200 GHz aproximadamente.

Otros Requerimientos de las fuentes láser son:

- Las fuentes láser deben ser protegidos adecuadamente, dado que son susceptibles de recibir las reflexiones que se regresan, las cuales pueden volverlos inestables.
- En caso de fallas, la reparación del módulo láser puede incurrir en un costo bastante alto, además de los complicados mecanismos de desensamblado y realineación de los componentes que son críticos para la operación efectiva de un enlace. Por tanto, un MTBF grande es un requisito indispensable para estos equipos.
- La energía no convertida en luz se convierte en calor, y esta afecta las características del Laser (longitud de onda y potencia) y genera inestabilidad. Refrigeradores termoeléctricos se utilizan generalmente para mantener la temperatura deseada en las fuentes de láser.

3.4.2.4.1 Recomendación de la ITU

La recomendación UIT-T G.694.1 (2002) - Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, define una tabla con una guía longitudes de onda para láser en sistemas DWDM, basados en un espaciamiento de 100 GHz por longitud de onda.

Mientras la tabla define un estándar, los usuarios son libres de usar las longitudes de onda de forma arbitraria y elegir de cualquier parte del espectro. Además los fabricantes se pueden desviar de la tabla ampliando sus límites superior e inferior o espaciando menos las longitudes de onda, siendo el valor típico de 50 GHz, para doblar el número de canales. Cuanto menor sea el espaciado, mayor será la diafonía. Además el impacto de algunas no linealidades de la fibra, tales como FWM, se incrementan. El espaciado de 50 GHz también limita la máxima velocidad de datos por longitud de onda. Las implicaciones de la flexibilidad en la implementación tiene dos partes: no hay garantía de compatibilidad entre dos sistemas finales de diferentes fabricantes y hay un diseño negociable en el espaciado de las longitudes de onda entre el número de canales y la velocidad máxima.

3.4.2.5 Detectores de Luz

En el lado receptor, es necesario recuperar las señales transmitidas a diferentes longitudes de onda en la fibra. Debido a que por naturaleza los fotodetectores son dispositivos de banda ancha, las señales ópticas son demultiplexadas antes del detector.

Se utilizan fundamentalmente dos tipos de fotodetectores, el fotodiodo Intrínseco Positivo-Negativo (PIN, Positive-Intrinsic-Negative) y el fotodiodo de Avalancha. El fotodiodo PIN trabaja bajo principios similares a los LEDs pero al revés, es decir, la luz es absorbida más

que emitida, y los fotones se convierten en electrones en una relación 1:1. Los fotodiodos de avalancha son dispositivos similares a los fotodiodos PIN, pero su ganancia se obtiene a través de un proceso de amplificación. Los fotodiodos PIN tienen muchas ventajas, incluido su costo y su fiabilidad, pero los fotodiodos de avalancha tienen mayor sensibilidad de recepción y mayor exactitud. Sin embargo los fotodiodos de avalancha son más caros que los fotodiodos PIN, y pueden tener requerimientos de intensidad mayores y más sensibles a la temperatura. Por tanto la escogencia del detector más adecuado queda a criterio del diseñador, de acuerdo con los exigencias que tengan del sistema que va a implementar.

3.4.2.6 Multiplexores y demultiplexores

En los sistemas DWDM se envían señales de varias fuentes sobre una sola fibra, razón por la cual se requieren dispositivos para combinar las señales de entrada. Este dispositivo es el multiplexador (MUX, Multiplexer), que toma las longitudes de onda ópticas de múltiples fibras y las convierte en una sola señal. El demultiplexor (DEMUX, Demultiplexer) tiene conceptualmente un funcionamiento opuesto al MUX, sin embargo, el DEMUX requiere una tecnología más compleja, porque es el encargado de separar una señal con múltiples longitudes de onda en sus componentes individuales, y se debe hacer antes de la detección de la luz, ya que los fotodetectores son dispositivos de banda ancha y no pueden selectivamente detectar una sola longitud de onda.

Estos dispositivos son la base para la transmisión de múltiples señales a través de una sola fibra óptica en las redes DWDM, por tanto es necesario considerar factores que actúan durante la etapa de planeación de la red, y también en la etapa de implementación pues se pueden traducir en pérdidas que impedirán que la calidad de la señal se mantenga hasta alcanzar su destino final.

Los multiplexores y los demultiplexores pueden ser de diseño pasivo o activo. El diseño pasivo se basa en prismas, rejillas de difracción o filtros, mientras que el diseño activo combina dispositivos pasivos y filtros sintonizables. Los principales retos en estos dispositivos es minimizar la diafonía y maximizar la separación de canal.

3.4.2.6.1 Banda de Canal

El desempeño de un mux/demux depende de su habilidad para aislar los canales entrantes o salientes. Cada canal está caracterizado por ciertos parámetros que deben ser medidos y controlados para mantener un adecuado funcionamiento sobre estos dispositivos.

Longitud de onda central del canal:

La medida de la longitud de onda central es usualmente utilizada para caracterizar al filtro o un canal multiplexor/demultiplexor. La longitud de onda central es la longitud de onda media, que generalmente se define como el punto medio entre las longitudes que están a

3dB hacia abajo sobre los lados de la longitud de onda del pico de transmisión. Para una distribución perfectamente simétrica, la longitud de onda central será la misma que el pico de transmisión, pero rara vez es el caso. De hecho, diferencias relativamente menores en la forma de la curva de transmisión pueden liderar cambios marcados en la longitud de onda central.

El canal transmisor estará operando cerca de la longitud de onda nominal, la longitud a la cual el dispositivo ha sido diseñado para operar, usualmente sobre una de las longitudes de onda del estándar de la ITU. De esta manera, la longitud de onda central deberá estar lo más cerca posible de esta frecuencia, como de la longitud de onda del canal de la ITU. El punto de separación de las longitudes de onda, hacia abajo o hacia arriba, son las longitudes de onda en las cuales las pérdidas por inserción alcanzan un valor específico, usualmente 3 dB.

Separación entre canales:

En los sistemas de red existentes, se usan canales espaciados uniformemente y no uniformemente. Los canales espaciados uniformemente están comúnmente en acuerdo con las recomendaciones de la ITU-T (G.692), espaciados en intervalos de 100 GHz.

Un espaciamiento poco uniforme es utilizado para minimizar y predecir los efectos no lineales como la combinación de cuatro longitudes de onda (FWM), el cual genera longitudes de onda indeseadas. Con un espaciamiento de canal parejo, estas nuevas longitudes de onda caen sobre los canales existentes y crean interferencia entre canales. Adicionalmente este efecto genera ruido entre los canales.

Ancho de banda:

El ancho de banda define el rango espectral sobre el cual el dispositivo puede ser utilizado efectivamente. El ancho de banda de todos los componentes (y subcomponentes) es crítico en la determinación de las características permisibles del espaciamiento de canal y de la fuente de láser.

Aislamiento y diafonía:

El aislamiento entre canales y diafonía entre ellos, describe las señales rechazadas de un canal adyacente u otro canal en un dispositivo multicanal. Para su medición se tienen en cuenta las características del pasabanda de cada canal y normalmente se especifica para los casos en las peores condiciones. El aislamiento y diafonía tienen ligeramente dos interpretaciones. Mientras el aislamiento entre canales describe la capacidad de rechazo de la señal de un canal a otro, la diafonía describe la capacidad que tiene una señal de filtrarse de un canal a otro. El aislamiento es el mínimo valor en dBm al cual el dispositivo, sobre el cual se está haciendo la prueba, elimina una señal externa, mientras que la diafonía es la diferencia en dB entre el máximo valor de potencia de entrada y el mínimo valor de potencia filtrada.

Además de la estimación de la interferencia entre canales en los peores casos en un sistema DWDM, el usuario debe también determinar los niveles de interferencia que puedan tolerarse. Tradicionalmente, el aislamiento entre canales adyacentes de 25 dB o superiores era suficiente. Sin embargo, como la complejidad de las redes crece y los receptores requieren aislamiento entre canales de forma confiable, a pasado a ser un parámetro insignificante a un factor que debe ser cuidadosamente tenido en cuenta en el diseño de las redes.

Variación de potencia en la parte superior de la banda:

Examinando de cerca, la respuesta espectral de un dispositivo DWDM nunca es perfectamente plana. La variación (diferencia entre las pérdidas mínimas y máximas sobre el pasabanda definido) es llamado ondulación. La ondulación da al diseñador del sistema información a cerca de las posibles variaciones en la potencia transmitida, así como las variaciones en la transmisión de la longitud de onda dentro de pasabanda nominal. La ondulación excesiva no es aceptada por la mayoría de las aplicaciones prácticas.

Otro parámetro importante es la máxima pendiente de la ondulación, la cual representa la relación entre el cambio de las pérdidas y el cambio en la longitud de onda. Usando este parámetro, el diseñador puede determinar cuanta potencia del canal podría cambiar dado un pequeño cambio en el transmisor de longitud de onda. En algunos casos, las pérdidas por inserción totales y la variación total en las pérdidas por inserción para un dispositivo podrían ser aceptables, pero una ondulación de corto periodo podría descalificarlo para una aplicación en particular de DWDM.

Uniformidad del canal:

La uniformidad del canal se refiere a variación en la transmisión o en las pérdidas por inserción de un canal a otro en un mux/demux.

3.4.2.6.2 Efectos dependientes de la polarización

Dado que las características de varios componentes comúnmente usados en redes de fibra óptica varían en función del estado de la polarización, todas las características de los canales tales como pérdidas por inserción, longitud de onda central y ancho de banda, variarán además con la polarización. Por consiguiente, para garantizar un desempeño confiable, el diseñador de la red debe acomodarse a los peores casos, dependientes de la polarización, de todos los componentes pasivos usados en el sistema.

Pérdidas, ancho de banda, y frecuencia central, son particularmente sensitivos al estado de la polarización. Cada uno de los factores anteriormente nombrados, debe ser medidos con diferentes estados de polarización, usando un controlador de polarización. La variación en los resultados es la dependencia de los parámetros en cuestión. Idealmente, las medidas deben ser realizadas para todos los estados de polarización, pero de manera aleatoria es suficiente.

Las principales medidas que se deben hacer son:

Pérdidas por polarización (PDL – Polarization Dependent Loss):

Estas pérdidas corresponden a la variación de las pérdidas sobre el rango de los posibles estados de polarización. Esta se obtiene del cociente entre la transmisión en los mejores y peores estados de polarización, y se expresa normalmente en dB. Cuando la mitad de este valor es adicionado a las pérdidas por inserción, donde estas pérdidas son medidas con una luz sin polarización, es el peor caso de pérdidas para el componente en la longitud de onda especificada (usualmente la longitud de onda nominal de operación). La mayoría de los fabricantes y usuarios consideran suficiente hacer la medida del PDL en el canal central y en las fronteras del bandabase.

Dispersión por modo de polarización (PMD – Polarization Mode Dispersion):

Como se dijo anteriormente, esta dispersión es el resultado de la diferencia de velocidades lo cual genera un desfase a lo largo de un enlace de fibra. De esta manera, aunque el PMD total es citado generalmente en unidades de tiempo (ps), su coeficiente, que es el valor por unidad de longitud de fibra, debe ser expresado como un retardo por la raíz cuadrada de la unidad de distancia (ps/Km). Sin embargo, el PMD también es evaluado en componentes tales como mux/demux, y es un proceso determinístico y para efectos de mediciones específicamente sobre el dispositivo (por canal del dispositivo), simplemente será especificado en unidades de tiempo (ps).

3.4.2.6.3 Directividad

La directividad, referida algunas veces como la interferencia ente canales por terminaciones muy cercanas, es la medida de el aislamiento entre los puertos de entrada de un dispositivo multi-entrada. Es particularmente importante en un MUX, donde la potencia que retorna a los transmisores se debe mantener en un mínimo.

Los usuarios deben proveer una terminación antireflectiva en la salida del dispositivo cuando se esta midiendo la Directividad. De no ser así, las reflexiones en la fase terminal de la fibra podrían degradar la medición.

Con mucha frecuencia, es suficiente realizar las mediciones de directividad únicamente en las longitudes de onda nominales del canal.

3.4.2.7 Multiplexores de Extracción e Inserción (OADM – Optical Add/Dropp Multiplexer)

Los filtros, también llamados multiplexores de extracción e inserción óptica (OADM), son elementos que extraen de una fibra una portadora óptica e insertan otra. En unos filtros la longitud de onda que se inserta es nominalmente igual a la que se extrae; en otros es

diferente. La extracción e inserción de una portadora se puede generalizar a una banda óptica, en la que caben varias portadoras contiguas.

En el mercado se encuentran generalmente OADMs de dos generaciones, las cuales hacen referencia a dos tipos diferentes de equipos. La primera generación es un dispositivo fijo que se configura físicamente para extraer una longitud de onda predeterminada mientras se añaden otras. La segunda generación es reconfigurable y capaz de seleccionar dinámicamente que longitudes de onda se añaden y cuales se remueven. Los filtros de película delgada han emergido como la tecnología elegida para los OADMs en los sistemas DWDM metropolitanos actuales porque son menos caros y más estables. En cuanto a la segunda generación de OADMs, se prefieren otras tecnologías tales como las rejillas de fibra sintonizables y circuladores.

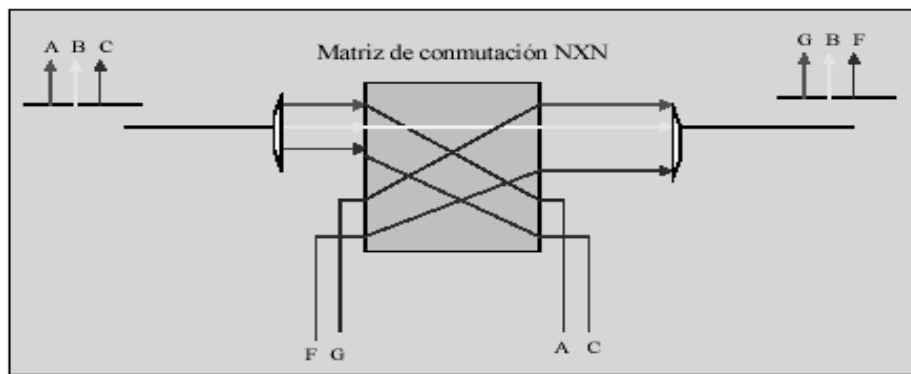


Figura 3.12. OADM reconfigurable basado en conmutadores NxN

3.4.2.8 Crossconectores ópticos (OXC)

Un OXC es un componente del sistema DWDM que ofrece la funcionalidad de interconexión entre N portadores a la entrada con N portadoras de salida, operando con un arreglo de señales multiplexadas.

En otras palabras, un crossconector es un switch de división de espacio que puede conmutar flujos de información sobre un puerto de entrada a un puerto de salida. De esta manera este dispositivo puede tener una conversión óptico-eléctrica en el puerto de entrada y una conversión eléctrica-óptico en el puerto de salida, o pueden ser todos ópticos. Se asume que el crossconector tiene un procesador de plano de control que implementa los protocolos de señalización y enrutamiento necesarios para una red óptica.

Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que los conmutadores deben cumplir con ciertos requisitos mínimos de calidad de transmisión, y que son los relativos a pérdidas de inserción y diafonía. Las pérdidas de inserción deben ser inferiores a las que puede compensar un amplificador óptico sin introducir un ruido excesivo de emisión espontánea, la diafonía debe ser lo suficientemente baja como para no degradar enlaces por el mecanismo de interferencia.

Estos dispositivos se dividen en tres categorías: Estrellas pasivas (Passive star), Conmutadores pasivos (passive router) y Conmutadores activos (active switch).

Las estrellas pasivas son dispositivos de multidifusión (broadcast), ya que la señal que se inserta en una λ dada desde un puerto de entrada de una fibra verá su potencia igualmente dividida por todos los puertos de salida y en la misma λ .

Se producirá una colisión si se envían varias señales de entrada con la misma λ . Una estrella de NxN puede enrutar N conexiones simultáneas.

Un conmutador pasivo puede enrutar separadamente cada una de las λ incidentes a la misma λ en fibras de salida separadas. Este dispositivo permite reutilización de frecuencias, ya que cada longitud de onda se puede reutilizar espacialmente para transportar múltiples conexiones. La λ por la que se enrutará la señal de salida de cada puerto depende de una matriz de enrutamiento que caracteriza al conmutador. La matriz de enrutamiento es fija y no se puede cambiar. Este tipo de conmutadores puede enrutar N^2 conexiones simultáneas, pero no es para multidifusión.

El conmutador activo también permite reutilización de frecuencias y puede soportar N^2 conexiones simultáneas, pero ofrece una mejora sobre el anterior, y es que su matriz de enrutamiento se puede configurar bajo control electrónico. Sin embargo, el conmutador activo necesita ser alimentado y por tanto no es tolerante a fallos como los elementos pasivos. Los conmutadores activos pueden incluso incorporar otra capacidad adicional: la λ se puede convertir a otra longitud de onda antes de entrar a la etapa de multiplexación, antes de la fibra de salida. Estos conmutadores se conocen como crossconectores convertidores de Longitud de onda (Wavelength Interchanging Crossconnect - WIXC). Las estrellas pasivas se utilizan en redes WDM locales, mientras que los conmutadores activos se usan para construir WANs enrutadas y el conmutador pasivo se usa como MUX/DEMUX.

3.4.2.9 Amplificadores ópticos (AO)

Debido a la atenuación, hay límites en cuanto a la longitud de un segmento de fibra. Si se sobrepasan es necesaria una regeneración de la señal. El amplificador óptico (AO) ha hecho posible la amplificación de todas las longitudes de onda a la vez y sin conversión OEO. Además de ser utilizados en enlaces ópticos, los AO también se puede utilizar para aumentar la potencia de la señal después de la multiplexación o antes de la demultiplexación, dado que ambos procesos introducen pérdidas en el sistema.

3.4.2.9.1 Amplificador de fibra dopada con erbio

Los amplificadores ópticos, generalmente amplificadores con fibra dopada de erbio (EDFA), son cruciales para la operación económica de las redes DWDM. Esto es debido a

que ellos proveen la amplificación transparente de todos los canales, sin la consideración de los esquemas de modulación o protocolos utilizados en cada uno.

Su uso implica que una señal óptica modulada puede ser transmitida sobre distancias muy largas sin la necesidad de recobrar o regenerar la información llevada. Sin embargo, la dependencia de la longitud de onda que tiene la ganancia de los EDFAs, debe ser determinada durante el diseño de la red, especialmente cuando canales individuales van a atravesar varios amplificadores. Adicionalmente, las figuras de ruido individuales de cada EDFA usado afectarán críticamente la integridad de la señal óptica, porque determinan el número de amplificadores que pueden ser usados en cascada, y con ello, la máxima distancia del enlace.

Desde que la ganancia es la función esencial de un amplificador, la amplificación óptica se convirtió en uno de los parámetros más importantes a medir.

La ganancia depende de muchos factores que, separadamente o juntos, pueden modificar el desempeño del dispositivo, tales como la longitud de onda de la señal, estado de entrada de la polarización, y la potencia. La conformación funcional de un amplificador EDFA se muestra en la figura 3.13.

La ganancia a través del espectro del canal de los EDFAs esta determinada por una curva la cual tiende a ser aproximadamente plana en la ventana de operación, donde su comportamiento obedece al cambio de la potencia relativa de entrada de cada canal. Así, el efecto de una redistribución temporal de la potencia de entrada, como cuando se esta adicionando o sustrayendo un canal, debe ser controlado en aplicaciones multicanal.

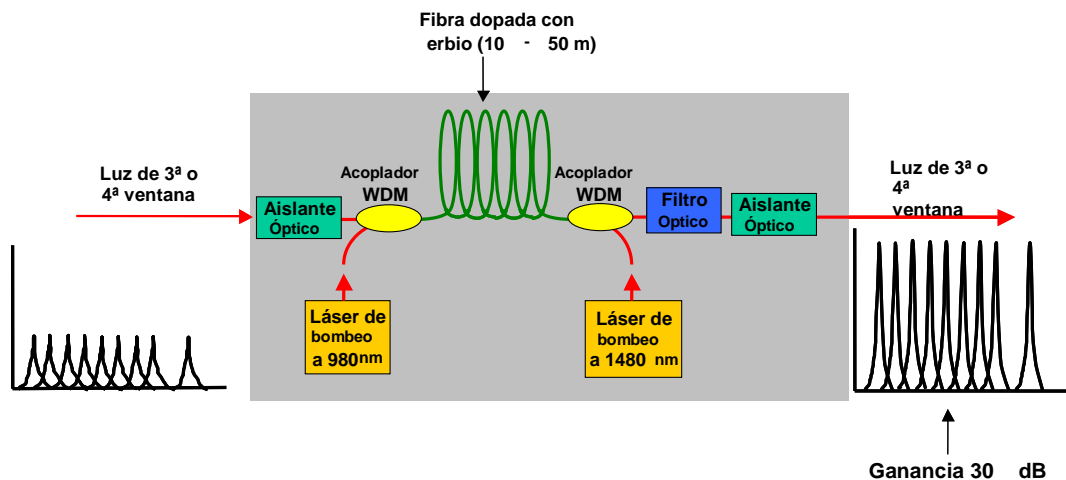


Figura 3.13. Diagrama funcional del EDFA

La medida de la ganancia corresponde al valor obtenido de la razón entre el promedio de potencia de salida y el de entrada, omitiendo la contribución de la emisión espontánea amplificada (ASE) del amplificador por sí mismo.

De esta manera, la ganancia se puede calcular haciendo uso de la siguiente expresión:

$$G(\text{dB}) = 10 \text{ Log } ((P_{\text{out}}(\lambda_c) - P_{\text{ASE}}(\lambda_c)) / P_{\text{in}}(\lambda_c))$$

Donde,

- G es la ganancia en dB;
- $P_{\text{out}}(\lambda_c)$, es el promedio de la potencia de salida en la longitud de onda del canal, en mW;
- $P_{\text{ASE}}(\lambda_c)$, es la potencia de la emisión espontánea amplificada ASE, en mW;
- $P_{\text{in}}(\lambda_c)$, promedio de la potencia de entrada en mW.

Lo que significa que la ganancia dada por un amplificador está afectada por el nivel de potencia de entrada de la señal.

Típicamente los EDFAs son capaces de alcanzar ganancias de hasta 30 dB o más y potencias de salida de +17 dB o más. Sin embargo los parámetros clave cuando se selecciona un EFDA son el bajo ruido y la igualdad de la ganancia. La ganancia es plana porque todas las señales deben ser amplificadas uniformemente. Mientras la ganancia de señal suministrada por la tecnología EFDA depende inherentemente de la longitud de onda, se puede corregir con filtros de ganancia plana. A menudo estos filtros se construyen en modernos EDFAs.

El bajo ruido es un requerimiento porque el ruido es amplificado con la señal. Dado que su efecto es acumulativo, y no se puede filtrar, la relación señal /ruido es un factor limitante en el número de amplificadores que se pueden concatenar y, por tanto, la longitud del enlace de una sola fibra. En la práctica, las señales pueden viajar hasta 120 km. entre amplificadores. A distancias superiores de 600 a 1000 Km. la señal se debe regenerar. Esto es porque el amplificador óptico solo amplifica las señales y no realiza las funciones 3R (Reshape, Retime, Retransmit). Los EDFAs se pueden emplear en las bandas C y L.

3.4.2.10 Interfaces a DWDM

La mayoría de los sistemas DWDM soportan las interfaces estándar ópticas de corto alcance de SDH/SONET a las cuales se puede conectar cualquier dispositivo cliente compatible. Además también se soportan otras interfaces importantes de redes metropolitanas y de acceso: Ethernet (incluido Fast Ethernet y Giga Ethernet). ESCON, Sysplex Timer y Sysplex Coupling Facility Links, y Fibre Channel. El nuevo estándar 10 Gigabit Ethernet es soportado mediante una interface OC-192 VSR (Very Short Reach) sobre fibra multimodo entre el equipo 10 Gigabit Ethernet y DWDM.

Dentro de un sistema DWDM, un transponder convierte la señal óptica cliente a una señal eléctrica y realiza las funciones 3R (Reshape, Retime, Retransmit). Esta señal eléctrica se usa entonces para controlar un Laser. Cada transponder dentro del sistema convierte su señal cliente a una longitud de onda ligeramente distinta. Las longitudes de onda de todos los transponders del sistema son entonces multiplexadas ópticamente. En la recepción del sistema DWDM, tiene lugar el proceso inverso. Las longitudes de onda individuales son filtradas desde las fibras multiplexadas y alimentan a los transponders individuales, que convierten la señal a eléctrica y la dirigen a través de una interfaz estándar al cliente.

3.4.3 Calidad en la transmisión de redes ópticas

Cada red de transporte debe disponer de sus propios mecanismos de medida de calidad durante la transmisión de sus señales. Pero en general, todos ellos se basan en enviar unas tramas de referencia con contenido digital predeterminado y detectar en recepción los errores que se han generado en ellas. Una red óptica, en cambio, no accede al contenido digital, y la calidad se debe medir con parámetros independientes de las tramas. Esta medida es necesaria para identificar fallos o degradaciones en elementos de la red, así como para proporcionar información a efectos de restauración o reencaminamiento.

El mecanismo principal de medida de calidad, o supervisión, es el análisis espectral óptico (OSA). Consiste en extraer una muestra de la señal que se propaga por la fibra, introducirla en el equipo analizador de espectros ópticos y comparar el resultado de la medida con una máscara predeterminada, esto con el fin de determinar si las portadoras se encuentran en su posición espectral correcta, si el nivel de potencia es adecuado, si existen señales espúreas, etc.

Con el análisis de espectro óptico OSA se determinan una serie de parámetros cuyos niveles garantizan la calidad de la señal que llegará al destino. En principio, los parámetros de calidad óptica son los siguientes:

3.4.3.1 Número de portadoras

Mediante el análisis del espectro el sistema de gestión puede determinar si en el punto de medida se encuentran las portadoras que deben estar, y que por lo tanto no ha habido corte en la planta entre el origen de la portadora y el punto de medida. Adicionalmente, la resolución del análisis debe ser lo suficientemente alta como para determinar que en la ventana espectral asignada a una longitud de onda hay únicamente una portadora.

3.4.3.2 Potencia óptica y rizado

Un análisis espectral correcto proporciona la potencia óptica de cada portadora. El sistema de gestión debe comprobar si se encuentran dentro del margen permitido.

3.4.3.3 Relación portadora-ruido

Para una recepción correcta se requiere que la potencia de cada portadora sea superior a un umbral determinado, y también que sea superior a un umbral mínimo la relación portadora a ruido (C/N). Por ruido se entiende el de emisión espontánea de los amplificadores del enlace óptico, que en una traza de un analizador de espectros se manifiesta como un fondo de ruido variable lentamente con la longitud de onda.

3.4.3.4 Identificación de portadora

En los trayectos que incluyen conmutadores, la señal presente en una longitud de onda puede proceder de un enlace entre varios posibles, y el operador debe poder identificar de cual de ellos procede. La identificación se lleva a cabo utilizando, como marcadores que diferencian unas portadoras de otras, parámetros tales como deriva en longitud de onda o desviación de la potencia con respecto a su valor nominal. En caso de ser necesario, el operador puede marcar las portadoras, actuando sobre los elementos de red que sean necesarios. Por ejemplo, los puertos de entrada de las matrices de conmutación van precedidos de amplificadores ópticos y el operador puede variar levemente su ganancia para marcar las portadoras de ese puerto.

A estos parámetros de calidad se les puede denominar primarios, porque su cumplimiento es condición necesaria para un correcto funcionamiento de la red. Existen otros, que se pueden considerar como secundarios, debido a que aportan información sobre el funcionamiento de la red, pero su incumplimiento no repercute en forma directa sobre los primarios, por lo que su medida podría en principio no ser estrictamente necesaria, aunque sí se recomienda hacerlo.

Dichos parámetros son los siguientes:

3.4.3.5 Deriva en longitud de onda

Es la diferencia entre la longitud de onda central de una portadora y su valor nominal. Este parámetro se considera secundario porque un valor de la deriva superior al ancho de banda de un canal se traduce en una atenuación de la portadora al pasar por un filtro óptico, o un multiplexor en longitud de onda.

3.4.3.6 Emisiones espúreas

Una emisión espúrea indica una degradación en el funcionamiento de un Laser, reflejada en una señal indeseada, que puede llegar a generar una alarma en su transpondedor asociado. En cualquier caso, dado que los transmisores van seguidos de un multiplexor, la señal indeseada queda muy atenuada antes de interferir sobre un canal adyacente.

3.4.3.7 Potencia óptica total

Por potencia óptica total se entiende la del conjunto de señales que están siendo transmitidas incluyendo el ruido. En algunos casos esta medida puede ser muy conveniente, sobre todo si el nivel de ruido es significativo, debido a que puede sacar de la zona de funcionamiento algún elemento de red, como un amplificador óptico.

Adicionalmente, la calidad en la transmisión de señales también incluye verificar el estado en el cual se recibió el cable de fibra óptica, si se instaló correctamente o si las conexiones se realizaron adecuadamente, ya que estos detalles afectan de manera directa el desempeño de la red y por tanto la calidad. Estas mediciones se deben hacer utilizando un reflectómetro óptico en el dominio tiempo (OTDR). En caso de que la fibra se encuentre dañada, el OTDR indicará dónde se encuentra la curva o la rotura y para resolver el problema en el menor tiempo posible, ya que la longitud de los tendidos de cable puede llegar hasta cientos de kilómetros en un solo tramo.

CAPITULO 4. DISEÑO DE UNA RED IPoDWDM

Cualquier conjunto de criterios para el diseño de redes debe ser validado mediante su utilización en el desarrollo de una red. Por lo tanto, se hará uso de los criterios de diseño para la creación de redes IPoDWDM (planteados en el capítulo anterior) en el desarrollo de una red óptica metropolitana basada en esta tecnología para la ciudad de Bogotá, con el fin de validar su utilidad para los diseñadores y desarrolladores de redes.

4.1 PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO (REQUERIMIENTOS)

El objetivo de diseño de esta red es interconectar con fibra óptica los principales nodos de la red metropolitana de una empresa de telecomunicaciones en la ciudad de Bogotá, utilizando la tecnología DWDM para el transporte de información basada en el protocolo IP, permitiendo de esta forma implementar diversos tipos de servicios de gran ancho de banda con QoS garantizado. La red debe ser capaz de dar soporte a las necesidades de servicio actuales y futuras, permitiendo su fácil expansión e incremento de capacidad sin incurrir en elevados costos de actualización o reconfiguraciones críticas para la prestación de servicios.

Esta empresa cuenta con 12 nodos ubicados a lo largo y ancho de la ciudad (tal como se muestra en la figura 4.1), los cuales permitirán ofrecer servicios de comunicación óptica a sus redes IP clientes mediante la utilización de un plano de control basado en GMPLS. Estas redes clientes deben ser conectadas a la red DWDM mediante enrutadores IP con interfaces UNI, permitiendo de esta forma, automatizar los procesos de establecimiento de comunicaciones.

Entre los servicios que se ofrecerán con esta red tenemos:

- Transmisiones de video en tiempo real: videoconferencias, sistemas de televigilancia, difusión de video, etc.,
- Transmisiones de datos en tiempo real: aplicaciones críticas en el tiempo, redes privadas virtuales (VPN), información de gestión y rendimiento de red, sistemas de almacenamiento remoto de información, etc.
- Transmisiones de voz: interconexión entre centralitas y centrales de telefonía IP, conferencias múltiples de voz, call y contac centers, sistemas de administración de mensajería unificada, etc.
- Transmisiones de información no crítica en el tiempo.

Cada uno de los servicios tiene un ancho de banda definido por las necesidades de los clientes, tal y como se presentará más adelante con la matriz de tráfico del sistema.

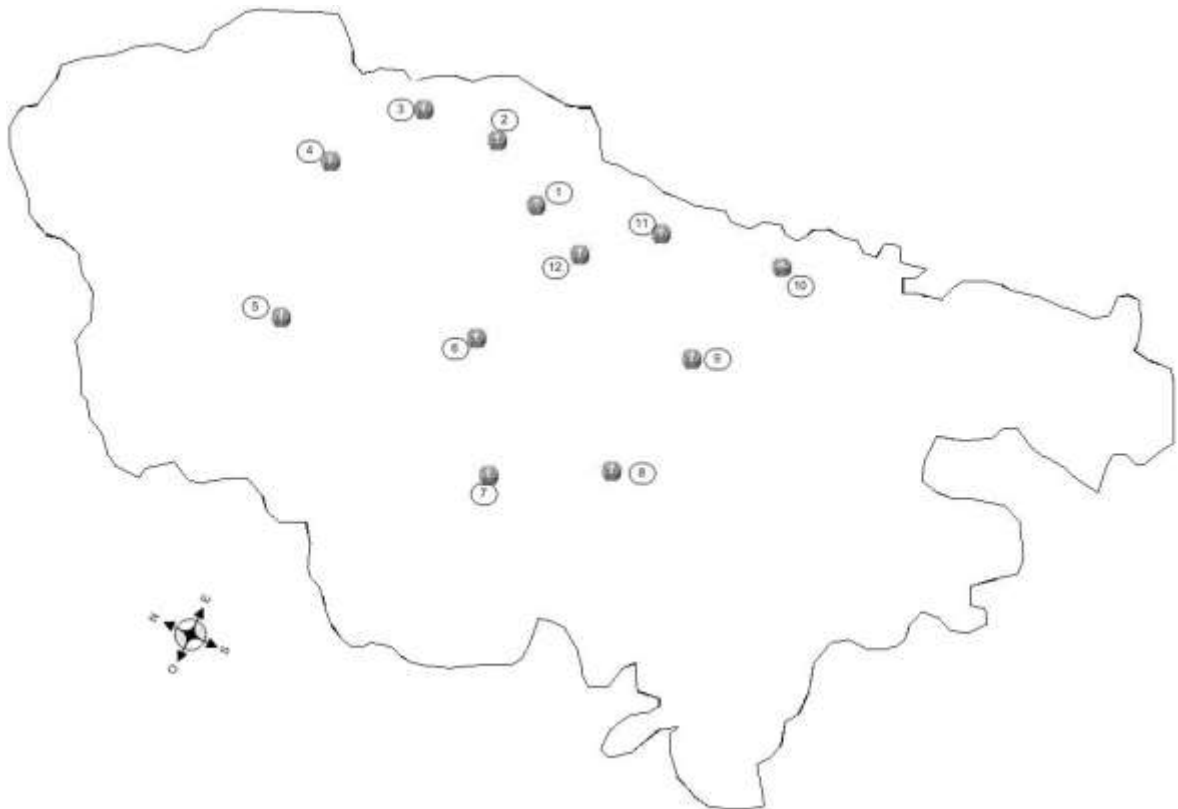


Figura 4.1. Ubicación de nodos de red en la ciudad de Bogotá

A nivel de cable de fibra, la interconexión de los nodos se hará con cables de fibra que cumplan con las características técnicas necesarias para dar soporte a la red planteada.

Los equipos utilizados al interior de la red deben permitir la migración de estos hacia velocidades más altas para cada tributario o canal óptico.

4.2 DESARROLLO DEL DISEÑO

A partir de la información presentada en el punto anterior, se inicia el análisis de los requerimientos de red planteados para encontrar la mejor solución. Cabe aclarar que el análisis de los costos relacionados con la implementación de esta tecnología no serán tratados profundamente en este documento debido a que los equipos necesarios para su implementación no se encuentran comercialmente disponibles aún.

4.2.1 Planeación de capacidad

Teniendo en cuenta los tipos de servicio que se pretenden implementar en la red, se realiza la asignación del ancho de banda promedio requerido por cada servicio para

garantizar su QoS y obtener, junto con el número de conexiones de cada servicio (definida en la matriz de tráfico), el ancho de banda total requerido en la red.

La asignación de los anchos de banda para cada servicio puede realizarse de muchas maneras. Es posible obtener esta clasificación dividiendo cada tipo de tráfico en categorías que van desde una asignación específica al servicio o al cliente de dicho servicio (generando muchos tipos de tráfico diferente) hasta una clasificación de velocidad baja, media o alta (mucho más genérica y simple que la anterior).

Para el desarrollo de esta red, se tendrá en cuenta la división general presentada en el planteamiento del diseño, obteniendo entonces la siguiente clasificación:

- Transmisiones de video en tiempo real: Las conexiones de este tipo requieren en promedio 1.5 Mbps. para cada una.
- Transmisiones de datos en tiempo real: Los enlaces utilizados para el transporte de este tipo de tráfico utilizan un promedio de 3 Mbps por conexión.
- Transmisiones de voz: Conexiones de tráfico de voz utilizan en promedio una velocidad de 2 Mbps.
- Transmisiones de información no crítica: Todas las conexiones de este tipo no superan 1 Mbps, pero se generan en gran cantidad. En promedio utilizan velocidades de 0.5 Mbps.

Se debe buscar con esto que las conexiones del mismo tipo de tráfico se agrupen para completar una capacidad de longitud de onda base escogida por el diseñador; para este caso se utilizará como capacidad base 2.5 Gbps. Además, esta agrupación permitirá reducir la cantidad de canales ópticos (longitudes de onda) necesarios para el sistema.

4.2.2 Matriz de tráfico

El desarrollo de la matriz de tráfico es un trabajo realizado por el personal encargado de administrar la red. En ella se deben tener en cuenta todos los factores que pueden afectar su definición, incluyendo costos y expectativas de crecimiento de red, para que las inversiones en infraestructura sean acordes a las necesidades existentes a corto y mediano plazo.

En el diseño de la red se debe utilizar una matriz de tráfico para las condiciones de servicio de la empresa, donde se indique el número de conexiones entre dos nodos de la red. Para esto, se plantea tantas matrices como categorías de tráfico fueron definidas, con el fin de obtener el número de longitudes de onda requerido para dar soporte a las conexiones de cada matriz. En algunas ocasiones el número de conexiones que se transportan sobre un canal óptico no alcanzan a completar su capacidad total, generando en principio, un desperdicio de ancho de banda sobre dicho canal. Sin embargo, esto no debe ser visto como un problema, pues esta capacidad extra debe ser considerada como capacidad redundante que permitirá reenrutar algunas conexiones que presenten problemas de establecimiento en sus trayectos originales.

El número de longitudes de onda se obtiene con el siguiente proceso: multiplicar el número de conexiones de cada enlace en la matriz por la velocidad promedio del tipo de tráfico, y dividiendo el resultado entre la capacidad máxima de cada canal óptico, que para este caso es 2.5 Gbps. En caso de obtener un número decimal, este debe ser aproximado al siguiente número entero.

Estas matrices se presentan a continuación:

▪ **Transmisiones de video en tiempo real**

Video	NODO DESTINO												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
NODO ORIGEN	1		2700		6000		5400					4500	5600
	2	2700		1500									
	3		1500		1500								
	4	6000		1500		2800							
	5				2800		2800						
	6	5400				2800		1100					5400
	7						1100		500				
	8							500		500			
	9								500		3600		5900
	10									3600		2700	
	11	4500									2700		1300
	12	5600					5400			5900		1300	

Tabla 4.1. Conexiones de video en tiempo real entre dos nodos de la red

Video	NODO DESTINO												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
NODO ORIGEN	1		2		4		4					3	4
	2	2		1									
	3		1		1								
	4	4		1		2							
	5				2		2						
	6	4				2		1					4
	7						1		1				
	8							1		1			
	9								1		3		4
	10									3		2	
	11	3									2		1
	12	4					4			4		1	

Tabla 4.2. Longitudes de onda necesarias para la transmisión de video en tiempo real entre dos nodos de la red

▪ Transmisiones de datos en tiempo real

Datos TR		NODO DESTINO											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NODO ORIGEN	1		3100		5900		4800					5100	6000
	2	3100		2500									
	3		2500		1600								
	4	5900		1600		3200							
	5				3200		2500						
	6	4800				2500		1300					4900
	7						1300		900				
	8							900		2000			
	9								2000		2900		5200
	10									2900		2200	
	11	5100									2200		1500
	12	6000					4900			5200		1500	

Tabla 4.3. Conexiones de datos en tiempo real entre dos nodos de la red

Datos TR		NODO DESTINO											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NODO ORIGEN	1		4		8		6					7	8
	2	4		3									
	3		3		2								
	4	8		2		4							
	5				4		3						
	6	6				3		2					6
	7						2		2				
	8							2		3			
	9								3		4		7
	10									4		3	
	11	7									3		2
	12	8					6			7		2	

Tabla 4.4. Longitudes de onda necesarias para la transmisión de datos en tiempo real entre dos nodos de la red

▪ Transmisiones de voz

Voz		NODO DESTINO											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NODO ORIGEN	1		1300		2500		3000					1900	3300
	2	1300		1400									
	3		1400		2800								
	4	2500		2800		1200							
	5				1200		1700						
	6	3000				1700		1500					3400
	7						1500		600				
	8							600		800			
	9								800		2600		2700
	10									2600		2200	
	11	1900									2200		1800
	12	3300					3400			2700		1800	

Tabla 4.5. Conexiones de voz entre dos nodos de la red

Voz		NODO DESTINO											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NODO ORIGEN	1		2		2		3					2	3
	2	2		2									
	3		2		3								
	4	2		3		1							
	5				1		2						
	6	3				2		2					3
	7						2		1				
	8							1		1			
	9								1		3		3
	10									3		2	
	11	2									2		2
	12	3					3			3		2	

Tabla 4.6. Longitudes de onda necesarias para la transmisión de voz entre dos nodos de la red

▪ **Transmisiones de información no crítica**

Info no crítica	NODO DESTINO												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
NODO ORIGEN	1		8000		12000		13500					10000	9800
	2	8000		8500									
	3		8500		7400								
	4	12000		7400		9100							
	5				9100		10200						
	6	13500				10200		9800					12800
	7						9800		6000				
	8							6000		8400			
	9								8400		10900		13100
	10									10900		9500	
	11	10000									9500		7300
	12	9800						12800			13100		7300

Tabla 4.7. Conexiones de información no crítica entre dos nodos de la red

info no crítica	NODO DESTINO												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
NODO ORIGEN	1		2		3		3					2	2
	2	2		2									
	3		2		2								
	4	3		2		2							
	5				2		3						
	6	3				3		2					3
	7						2		2				
	8							2		2			
	9								2		3		3
	10									3		2	
	11	2									2		2
	12	2						3			3		2

Tabla 4.8. Longitudes de onda necesarias para la transmisión de Información no crítica entre dos nodos de la red

Además, se deben tener en cuenta canales ópticos adicionales para propósitos de protección y reenrutamiento del tráfico más importante. En el caso de esta red se utilizará una longitud de onda de protección por cada 5 longitudes de onda activas, generando un esquema de protección 1:n.

Así, tal como se indicó en el capítulo anterior, al sumar el número de longitudes de onda para cada enlace se obtiene la capacidad total necesaria para este, permitiendo definir una única matriz de tráfico que contiene todas las condiciones de tráfico planteadas anteriormente (incluyendo el soporte del crecimiento de tráfico a mediano plazo). La matriz resultante para la red planteada se presenta a continuación, indicando en ella el número de longitudes de onda de trabajo y de respaldo necesarias entre dos nodos.

Total	NODO DESTINO												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
NODO ORIGEN	1		10 +2		17 +3		16 +3					14 +2	17 +3
	2	10 +2		8 +1									
	3		8 +1		8 +1								
	4	17 +3		8 +1		9 +1							
	5				9 +1		10 +2						
	6	16 +3				10 +2		7 +1					16 +3
	7						7 +1		6 +1				
	8							6 +1		7 +1			
	9								7 +1		13 +2		17 +3
	10									13 +2		9 +1	
	11	14 +2									9 +1		7 +1
	12	17 +3					16 +3			17 +3		7 +1	

Tabla 4.9. Longitudes de onda necesarias para el transporte de información entre dos nodos de la red

Para el soporte del crecimiento de tráfico a largo plazo, el diseñador de red debe tener en cuenta la posibilidad de crecimiento de la red (la cual esta basada en los equipos que la conforman y su capacidad de expansión de conexiones, canales o longitudes de onda) con el fin de determinar los límites de saturación de tráfico que le indiquen cuando debe realizarse un crecimiento de la capacidad instalada de la red.

4.2.3 Facilidades para la migración de redes

Para la red que se esta considerando en este desarrollo, no debe ser un factor preocupante el manejo de los criterios relacionados con la migración de la red que utiliza

como base, pues se da por hecho que se trabaja con la instalación de una red totalmente nueva para dar el soporte a los servicios que la empresa ofrecerá.

Sin embargo, el diseñador puede utilizar dichos criterios para generar otro tipo de servicio de red que inicialmente no ha sido planteado en los requerimientos: El arrendamiento de fibra oscura. Este servicio consiste en el arrendamiento, por parte del operador o administrador de red, de canales ópticos sobre la red DWDM para que el cliente los utilice como medio de conexión de las redes o equipos de otras tecnologías (tal como Ethernet, SDH ó ATM), permitiendo generar Redes Ópticas Privadas Virtuales (OPVN, Optical Private Network) sobre la red IPoDWDM.

4.2.4 Definición de la topología física de red

Se deben tener en cuenta diversos factores al definir la topología física de la red que se esta desarrollando, ya que afectan de una u otra forma su definición. Entre ellos se tienen: las distancias entre los nodos; los costos administrativos en que se incurre al solicitar una licencia para instalación de fibra óptica son altos; y la complejidad de la selección de la ruta sobre la cual estará instalada la fibra. Cabe aclarar que todos estos elementos no son presentados en este documento, pues ya han sido tratados en otros semejantes.

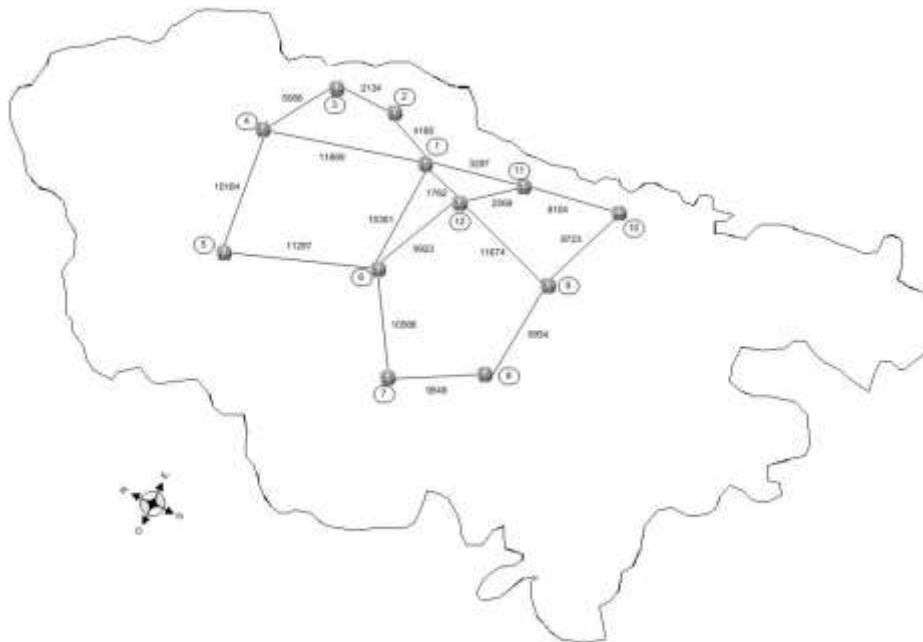


Figura 4.2. Topología física de red

En este caso se optó por una topología totalmente híbrida, donde se entremezclan anillos y conexiones en malla, permitiendo reducir en mayor cantidad los costos de implementación de red sin desmejorar la capacidad que esta debe ofrecer. Adicionalmente, esta topología dá respaldo a nivel de esquemas de protección porque

proporciona rutas alternativas en caso de falla en determinados trayectos. De este modo, la topología seleccionada se presenta en la figura 4.2, indicando además la distancia en metros lineales existente entre dos nodos.

4.2.5 Definición de la topología lógica de red

La topología lógica de una red IPoDWDM debe definir las subredes que la componen, los puntos de frontera de interconexión entre ellas, con redes semejantes de otros operadores y con los clientes, además de las interfaces que darán soporte a esos puntos de interconexión.

La red planteada se subdividirá entonces en dos subredes: la primera estará conformada por los nodos 1 a 6, y la segunda por los nodos 7 a 12. Cada una de estas subredes tendrá una configuración lógica de malla, permitiendo de esta forma una completa interconexión entre los nodos que la conforman.

Para la interconexión de las dos subredes se tomará como puntos de frontera las conexiones entre los nodos 1-11, 1-12, 6-7 y 6-12. la interconexión con redes de otras administraciones tendrá lugar en los puntos de interconexión ubicados en los nodos 3 y 7. Los clientes estarán interconectados en cada uno de los nodos de la red.

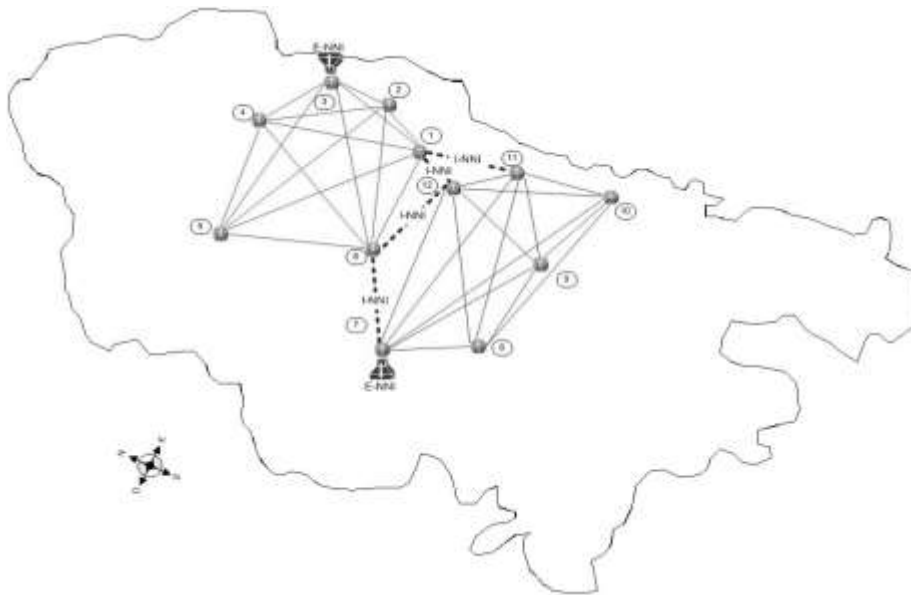


Figura 4.3. Topología lógica de red

Al tener definidos los puntos de interconexión, se procede a asignar las interfaces que soportarán cada uno de ellos.

- Entre los clientes y la red deben utilizarse interfaces UNI, que serán definidas más adelante según el modelo de control utilizado por la red.

- Las interfaces a utilizar entre las dos subredes deben ser del tipo I-NNI, y deben dar soporte a las necesidades planteadas al inicio del capítulo.
- La interconexión con redes de otras administraciones debe realizarse mediante interfaces E-NNI. Luego se tratarán los inconvenientes relacionados a esta interfaz.

La definición de la topología lógica de la red se presentan en la figura 4.3.

4.2.6 Determinación del modelo de control de red

El siguiente paso en el diseño de la red IPoDWDM, como se mencionó en el capítulo anterior, es definir el modelo utilizado sobre el plano de control de red, el cual puede ser implementado con cualquiera de los tres modelos presentados: modelo Peer, o de pares; modelo Overlay, o de Superposición; ó el modelo Ampliado.

Teniendo en cuenta que se considera una red desde su etapa inicial, puede plantearse la no existencia de limitantes en cuanto a integración del plano de control de las redes IP y óptica, ni en cuanto a la utilización de un esquema de direccionamiento común para ambos dominios. Por lo tanto, el modelo de control a implementar en la red será el Peer ó de pares, por todos los beneficios que este plantea para el funcionamiento de la red y los servicios que esta soporta.

De esta forma, los dominios IP y óptico de la red tendrán un plano de control integrado, que permitirán la utilización de un esquema de direccionamiento unificado y facilitarán las labores de establecimiento de conexiones a lo largo de la red.

4.2.7 Selección del esquema de direccionamiento

El esquema de direccionamiento propuesto para la red en diseño utiliza la identificación de los elementos de red (OXCs, OADMs, enrutadores, etc.) con direcciones IPv6, debido a las ventajas que esta versión del protocolo ofrece respecto al número de elementos direccionables. Esto quiere decir que es posible utilizar las mismas direcciones IPv6 tanto para identificar los elementos de red como para representar la información de menor granularidad que es de relevancia para un OXC o un OADM, tales como puertos, canales o subcanales.

4.2.8 Selección del Protocolo de Enrutamiento

La selección entre OSPF o ISIS (ambos con sus respectivas extensiones), como protocolo de enrutamiento para una red óptica es una decisión muy subjetiva que casi no depende de aspectos técnicos de los protocolos en sí, pues estos ofrecen casi las mismas funcionalidades y garantías de integración con los equipos que se encuentran actualmente en el mercado.

En el caso de la red tratada en este documento, y teniendo en cuenta la utilización de un esquema de direccionamiento basado en direcciones IPv6, resulta conveniente la utilización de OSPF para IPv6 con sus respectivas extensiones de Ingeniería de Tráfico como protocolo de enrutamiento. Adicionalmente, ofrece una mayor garantía a nivel de interoperabilidad con GMPLS, debido a que todo ha sido desarrollado por la IETF.

4.2.9 Selección del protocolo de señalización

Para facilitar la implementación del sistema de señalización de red se debe utilizar un mismo esquema en todas las subredes que la conforman, tal como se mencionó en el capítulo anterior. Por lo tanto, el protocolo de señalización a implementarse debe ser el mismo para las dos subredes que componen la red en desarrollo.

Uno de los aspectos fundamentales en cualquier red basada en IP es la reducción del número de mensajes de control que circulan sobre esta. Como se señaló en el capítulo anterior, CR-LDP utiliza un número menor de este tipo de mensajes comparado con RSVP-TE, aunque este último posee herramientas que pueden disminuir en gran medida el número de mensajes de control transportados en la red. Otro aspecto fundamental en la señalización de una red IPoDWDM es la no eliminación de las rutas ópticas que ya han sido establecidas debido a fallos en los sistemas involucrados en el transporte de la señalización (Ver tabla 3.1 Comparación entre CR-LDP y RSVP-TE)

El protocolo de señalización escogido para ser implementado en esta red es RSVP-TE, debido a su mejor respuesta ante posibles problemas generados por la interrupción del transporte de señalización (que pueden ser inherentes a la red o externos a ella), pues es de gran importancia para la red el mantener la integridad de las conexiones ópticas ya establecidas. El aumento en el número de mensaje de señalización por la utilización de este protocolo no es un gran inconveniente al hacer uso de los métodos de reducción de mensajes, tales como la agregación de renovaciones.

4.2.10 Interconexión de redes ópticas

Tal y como se mencionó en el capítulo anterior, el trabajo para completar la interconexión entre redes ópticas que pertenecen a diferentes operadores o administraciones aún no ha sido terminado, lo cual genera una serie de inconvenientes que no permiten realizar la interconexión de redes ópticas IPoDWDM. El desarrollo de la interfaz de red ENNI continúa al interior de entidades como la IETF, la ITU y la OIF, al igual que en grupos de trabajo interinstitucionales.

Es posible encontrar soluciones alternativas y temporales a este problema, tal como la utilización de uno o varios enrutadores de gran rendimiento entre las dos redes, haciendo que una de las redes ópticas se vea como una red IP cliente de la otra. Sin embargo, esta solución tiene una serie de inconvenientes que no permitirían realizar el intercambio de información de forma eficiente, como por ejemplo el gran cuello de botella creado debido

a la alta carga de tráfico que debe ser procesada, y la necesidad de generar un esquema de intercambio de información que cumpla con las características técnicas y políticas de las administraciones de red.

4.2.11 Selección de los esquemas de protección y seguridad de red

Los esquemas de protección para la red son los que permiten asegurar el nivel de confiabilidad de la red, además del rendimiento de esta ante posibles fallas en todos los aspectos.

Como parte de la protección física de la red se recomienda siempre la utilización de sistemas redundantes en equipos y fibra, que permitan una fácil y rápida recuperación de la red. La redundancia más eficiente en la fibra óptica se alcanza al utilizar redundancia de trayecto en el tendido, es decir, instalando el cable de fibra óptica entre dos puntos utilizando dos trayectos totalmente diferentes. Claro está que la utilización de este tipo de redundancia incurre en costos de instalación más elevados. En el caso de la red que se está diseñando, se hará uso de este tipo de redundancia para garantizar la máxima confiabilidad de red posible, pues la cantidad de tráfico que sobre ella se transporta amerita realizar la inversión.

En cuanto a la protección lógica de la red, y más exactamente lo que a mantenimiento de conexiones se refiere, ya se especificó la utilización del esquema de redundancia 1:n en las longitudes de onda entre cada par de nodos. Además, al tener una topología en malla y un protocolo de señalización eficiente, se puede asegurar que siempre existirá conectividad en todos los nodos de la red, a excepción del caso en que uno de estos salga totalmente de servicio, perdiendo el contacto con el resto de la red.

El esquema de seguridad lógico de la red debe ser capaz de realizar los procesos de autenticación y confidencialidad para los usuarios de esta, sobre todo en los puntos donde es necesario el intercambio de información con otras redes. La selección de este esquema de seguridad, y de los métodos utilizados para poder asegurarla deben estar de acuerdo con las políticas de seguridad del operador de red.

4.2.12 Selección del medio de transmisión de red

La fibra óptica seleccionada para esta red es aquella que cumple con la recomendación G.655 de la ITU-T, tal como se mencionó en el capítulo anterior, pues ha sido optimizada para las aplicaciones basadas en multiplexación de longitudes de onda.

Existen gran variedad de proveedores alrededor del mundo para este tipo de fibra, pues el auge generado por su capacidad de transporte la han convertido en un tipo de fibra casi tan económica como la G.652, ó fibra estándar. Las fibras más reconocidas actualmente son: Alcatel TeraLight Metro Fiber, OFS TrueWave fiber y Corning LEAF fiber.

Dada la naturaleza de la red que se está planteando en este trabajo, no es factible realizar un análisis de los efectos de la fibra que podrían afectar el funcionamiento de la red, pues no se cuenta con los recursos y equipos necesarios para tal fin. Por lo tanto, estos no van a ser tenidos en cuenta en esta etapa del documento, pero cualquier diseñador en una implementación real debe considerarlos.

4.2.13 Selección de equipos de red

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, en este momento la fabricación y comercialización de equipos para la implementación de soluciones basadas en tecnología GMPLS/DWDM es bastante limitada. Existen equipos prototipos o que se encuentran en etapas de prueba, pero no están comercialmente disponibles.

La definición de la clase de equipos que deben ser utilizados en cada uno de los nodos se realiza teniendo en cuenta los resultados de la matriz de tráfico planteada anteriormente, en donde se puede observar el número de nodos y la cantidad de longitudes de onda que utiliza cada uno de ellos. Se tiene entonces:

- Nodo 1: Crossconector óptico con capacidad mínima de conmutación de 90 * 90 longitudes de onda.
- Nodo 2: Multiplexor óptico OADM con capacidad mínima de inserción/extracción de 24 longitudes de onda.
- Nodo 3: Multiplexor óptico OADM con capacidad mínima de inserción/extracción de 20 longitudes de onda.
- Nodo 4: Crossconector óptico con capacidad mínima de conmutación de 40 * 40 longitudes de onda.
- Nodo 5: Multiplexor óptico OADM con capacidad mínima de inserción/extracción de 24 longitudes de onda.
- Nodo 6: Crossconector óptico con capacidad mínima de conmutación de 60 * 60 longitudes de onda.
- Nodo 7: Multiplexor óptico OADM con capacidad mínima de inserción/extracción de 16 longitudes de onda.
- Nodo 8: Multiplexor óptico OADM con capacidad mínima de inserción/extracción de 16 longitudes de onda.
- Nodo 9: Crossconector óptico con capacidad mínima de conmutación de 45 * 45 longitudes de onda.
- Nodo 10: Multiplexor óptico OADM con capacidad mínima de inserción/extracción de 28 longitudes de onda.
- Nodo 11: Crossconector óptico con capacidad mínima de conmutación de 36 * 36 longitudes de onda.
- Nodo 12: Crossconector óptico con capacidad mínima de conmutación de 72 * 72 longitudes de onda.

A continuación presentaremos algunos ejemplos de equipos y elementos que podrían ser utilizados en la implementación de la red.

4.2.13.1 Emisores ópticos

- Alcatel 1916 LMM – Láser DFB que contiene un modulador EA-ILM (modulador de electro-absorción monolíticamente integrado) de 1550 nm. para aplicaciones a 2.5 Gbps.
- Alcatel 1945 LMM – Láser DFB integrado con un modulador EA-LIM diseñado para trabajar a 10.7 Gbps y canales separados 50 GHz, aunque es compatible con el futuro espaciado de 25 GHz. Integra además un monitor de longitud de onda para asegurar su estabilidad en el tiempo.

4.2.13.2 Detectores de luz

- Alcatel 1951/54 DMC: Detectores PIN y APD respectivamente, que puede operar a longitudes de onda de 1310 y 1550 nm., extendiéndose hasta 1620 nm., en aplicaciones de 2.5 Gbps.
- Alcatel 1924 DMS: Receptor APD con preamplificación y función automático de ganancia. Ofrece además una salida diferencial que permite monitorear la señal o añadir ganancia. Para aplicaciones de 2.5 Gbps.
- Alcatel 1915 DMO: Receptor PIN con preamplificación que opera en las ventanas de 1310 y 1150 nm. Utilizado en aplicaciones hasta de 12.5 Gbps.

4.2.13.3 Multiplexores y Demultiplexores

- Alcatel 1686 WM: Multiplexor de 32 longitudes de onda por fibra que puede funcionar como multiplexor terminal o como OADM. Tiene incluido un amplificador EDFA de ganancia plana y soporte de FEC fuera de banda.
- Siemens SURPASS hiT 7540: Multiplexor óptico genérico que da soporte para extensión de distancias (como transponder y regenerador), de agrupamiento de tráfico (como multiplexor) y de protección para redes DWDM. Puede trabajar con velocidades de hasta 40 Gbps.
- Siemens TransXpress WaveLine EL2: Multiplexor DWDM para 32 longitudes de onda por canal (espaciado de 200 GHz), que puede funcionar como multiplexor terminal ó multiplexor óptico Add/Drop. Cisco ONS 15540 Extended Services Platform (Metro Edge)
- Cisco ONS 15540: Multiplexor óptico que soporta hasta 32 longitudes de onda para tráfico independiente de protocolo y velocidad. Funciona como multiplexor terminal o como multiplexor Add/Drop. Cada longitud de onda puede operar a velocidades desde 16 Mbps hasta 2.5 y 10 Gbps.
- Cisco ONS 15454: Multiplexor genérico que soporta la tecnología del plano de control óptico (OCP) mediante el Cisco UCP (Unified Control Plane), el cual es una implementación basada en el estándar OIF UNI 1.0 utilizando los protocolos RSVP-TE, GMPLS y LMP.

- Lucent WaveStar OLS 1.6T: Multiplexor óptico que ofrece una capacidad de transporte de 1.6 Tbps (160 * 10 Gbps) en una sola fibra. Tiene soporte de interfaces totalmente transparentes que van desde 100 Mbps. hasta 10 Gbps.

4.2.13.4 Multiplexores de Extracción e Inserción (OADM – Optical Add/Dropp Multiplexer)

- Huawei OptiX BWS 320G: Multiplexor OADM para 32 longitudes de onda, que permite una capacidad máxima de 320 Gbps. Soporta la inserción/extracción de hasta 12 longitudes de onda. Implementa también amplificación EDFA para la banda C.
- Siemens SURPASS hiT 7550: Multiplexor óptico DWDM con funcionalidad Add/Drop, de crecimiento modular, que permite manejar 1.6 Tbps (160 * 10 Gbps) y puede crecer hasta 3.2 Tbps (80 * 40 Gbps, para futuras actualizaciones). Transparente al formato de transmisión, velocidad y modulación, que además incluye compensación por dispersión.
- Cisco ONS 15216: Multiplexor OADM con filtrado óptico para combinar longitudes de onda de otros equipos. Implementa monitoreo de rendimiento óptico y amplificación para grandes distancias.
- Alcatel 1926 OFA: Amplificador de doble etapa, con acceso en la interetapa que permite las funciones de multiplexor Add/Drop, dispersión de compensación y monitoreo de señal de puerto. Funciona en el rango de 1529.1 a 1561.8 nm.
- Alcatel 1640: Multiplexor OADM de 80/160 canales DWDM, para inserción/extracción de 8 longitudes de onda, con sistema FEC fuera de banda y amplificación EDFA. Sus futuras actualizaciones permitirán capacidades de 1.6 y 2.4 Tbps.
- Lucent LambdaXtreme Transport: Multiplexor óptico OADM que puede transportar hasta 1.28 ó 2.56 Tbps (128 * 10 Gbps ó 64 * 40 Gbps) de forma transparente.
- Ciena CoreStream Flex OADM: Multiplexor para soporte de aplicaciones a 2.5 y 10 Gbps. Permite la inserción/ extracción de hasta 8 canales y hasta 3 grupos ópticos. Permite dar pleno cubrimiento a la banda C.
- Sycamore SN 16000: Conmutador óptico inteligente, con funcionalidad de agregación de tráfico, soporte a diversos esquemas de protección y cumplimiento de los nuevos estándares de interoperabilidad como GMPLS y OIF UNI/NNI.
- Corvis OADM: Tiene la capacidad de insertar/extraer hasta 2.8 Tbps. sin conversión OEO para el tráfico que no será insertado/extraído en cada nodo.

4.2.13.5 Crossconectores Ópticos (OXC)

- Alcatel 1660 Cross Light Photonic Cross-Connect: Crossconector óptico que elimina la conversión OEO mediante tecnología de matriz fotónica desde 64 a 4000 puertos. Realiza conmutación de longitud de onda, de banda de longitudes y de fibra. Implementa un plano de control GMPLS.
- Calient Network DiamondWave Photonic Switch: Crossconector con soporte desde 8 hasta 4096 puertos, capacidad de conmutación por longitud de onda de 40 Gbps., capacidad total de 164000 longitudes de onda, con soporte transparente de formato y

velocidad, que opera sobre una ventana que va de 1200 a 1620 nm. Incluye soporte para los protocolos de enrutamiento y señalización GMPLS.

- Tellium Aurora Optical Switch: Crossconector óptico con soporte de 1.28 Tbps, que puede aumentar hasta 20 Tbps. Da soporte a redes en malla o híbridas.
- Movaz Networks RAYstar: Plataforma de conmutación óptica con funcionalidades de OADM, que pueden ser totalmente ópticas o con conversión OEO. Tiene un plano de control GMPLS para configuración de longitudes de onda independientes. Incluye varios esquemas de protección configurables con definición de Clase de Servicio (Class of Service, CoS) por canal.
- Movaz Networks iWSS: Plataforma de conmutación totalmente óptica basada en una matriz de conmutación MEMS. Capacidad de conmutación de 400 * 400 longitudes de onda, escalables a 1000 * 1000. Permite el monitoreo de canal de fibra al ingreso y salida de este.
- Corvis Optical Switch (OS): Conmutador totalmente óptico y transparente con capacidad de conmutación de 11.2 Tbps. y equalización de longitudes de onda, que puede ser expandido a la banda L y para aplicaciones a 40 Gbps.

4.2.13.6 Amplificadores ópticos (AO)

- Cisco ONS 15501: Amplificador EDFA de bajo ruido y ganancia plana en la banda C.
- Alcatel 1901 OAE: Amplificador digital ultrarápido de dos etapas con ganancia muy plana en la ventana de 1529.1 a 1563 nm. Puede ser configurado y monitoreado mediante un PC utilizando un software para tal propósito.
- Movaz Networks RAYextender: Amplificador EDFA con soporte a sistemas de 2.5 y 10 Gbps., y con compensación de dispersión para estas últimas. Sus amplificadores tienen ganancia equalizada.
- Corvis Optical Amplifier (OA): Sistema de amplificación óptica que soporta hasta 2.8 Tbps. y permite alcanzar 3200 km. en múltiples saltos sin regeneración eléctrica. Funciona sobre fibras NZDSF y NDSF.

4.3 ANÁLISIS DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Como ya ha sido recalcado en varias oportunidades a lo largo de este capítulo, no puede generarse en la actualidad un análisis de los costos en que se incurrirían al realizar una implementación de red como la tratada aquí debido a la no existencia comercial de la mayoría de los equipamientos necesarios para tal fin.

Sin embargo, es posible realizar un análisis estimativo de estos costos al utilizar como base los precios de sistemas semejantes basados en la tecnología DWDM. Los resultados de este análisis se presenta a continuación.

4.3.1 Costo de fibra óptica

El costo aproximado de instalación de 1 metro lineal de fibra óptica G.655 en un tubo de 12 hilos es de USD\$ 2,8. Con este valor se puede encontrar el costo aproximado de instalación de fibra para toda la red, como se indica en la tabla 4.10, teniendo en cuenta las distancias entre nodos indicadas en la figura 4.2.

DESDE	HASTA	DISTANCIA (Metros Lineales)	COSTO INSTALACIÓN FIBRA (USD\$)
1	2	4.185	11.718
1	4	11.869	33.233,2
1	6	10.361	29.010,8
1	11	3.287	9.203,6
1	12	1.762	4.933,6
2	3	2.134	5.975,2
3	4	5.066	14.184,8
4	5	10.184	28.515,2
5	6	11.287	31.603,6
6	7	10.566	29.584,8
6	12	9.923	27.784,4
7	8	9.548	26.734,4
8	9	9.954	27.871,2
9	10	8.723	24.424,4
9	12	11.674	32.687,2
10	11	8.104	22.691,2
11	12	2.568	7.190,4
TOTAL			367.346

Tabla 4.10. Costo aproximado de instalación de fibra óptica para la red propuesta

El costo de instalación de fibra óptica para la red planteada es de aproximadamente USD\$ 367.346.

Los valores del precio de fibra y de las distancias entre nodos consignados en la tabla anterior, se obtuvieron gracias a la colaboración de expertos de varias empresas de telecomunicaciones en la ciudad de Bogotá.

4.3.2 Costo de equipos de red

El valor estimado de equipo para cada nodo incluye los costos de instalación y puesta en funcionamiento de cada uno de ellos. Estos se obtuvieron gracias a la colaboración de expertos de varias empresas de telecomunicaciones en la ciudad de Bogotá.

NODO	TIPO EQUIPO	CAPACIDAD	VALOR APROXIMADO (USD\$)
1	OXC	96 * 96 λ	488.820,52
2	OADM	24 λ	123.198,57
3	OADM	24 λ	123.198,57
4	OXC	48 * 48 λ	202.926,26
5	OADM	24 λ	123.198,57
6	OXC	60 * 60 λ	243.168,14
7	OADM	16 λ	109.171,85
8	OADM	16 λ	109.171,85
9	OXC	48 * 48 λ	202.926,26
10	OADM	36 λ	141.983,97
11	OXC	36 * 36 λ	182.684,38
12	OXC	72 * 72 λ	325.052,27
TOTAL			2.375.501,21

Tabla 4.11. Costo aproximado de equipos para la red propuesta

El costo aproximado de los equipos necesarios para la red planteada es de USD\$ 2.375.501,21.

4.3.3 Costo total aproximado de realización del proyecto

El costo total del proyecto será la suma del valor de la fibra óptica y el valor de los equipos de red. Se presenta este valor a continuación en la tabla 4.12.

ITEM	VALOR (USD\$)
Fibra óptica	367.346
Equipos de red	2.375.501,21
Total	2.742.847,21

Tabla 4.12. Costo aproximado total de realización del proyecto

El costo total aproximado del proyecto será entonces de USD\$ 2742847,21.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La rápida demanda de acceso a la información y en especial el aumento del tráfico de Internet, centró la atención en el desarrollo de las redes de comunicaciones que buscan alcanzar anchos de banda de gran capacidad. Adicionalmente, éstas nuevas redes buscan proporcionar un acceso rápido y fiable a diversos tipos de tráfico, con características bien diferenciadas: voz, vídeo y tráfico de datos, lo que implica capacidad de respuesta en tiempo real y niveles diferenciados de calidad de servicio.

La tendencia a mantener una arquitectura multinivel entre las capas IP y óptica, planteada tiene más problemas que ventajas, como lo es la superposición funcional y su compleja gestión de red. Es muy difícil integrar sistemas de gestión para diferentes tecnologías de red, además las redes son manejadas por diferentes operadores. Esto hace que la red no pueda adaptarse fácilmente a cambios de corto plazo, tales como los generados por las variaciones de demanda planteadas por los usuarios de una red. Estas limitaciones promovieron la creación de una nueva arquitectura donde se eliminan estas capas intermedias para darle paso a un nuevo modelo donde la capa IP es superpuesta directamente sobre la capa óptica. Así, los dos niveles trabajan conjuntamente para lograr la implementación de todos los servicios con los parámetros de disponibilidad y QoS que demandan las Redes de Nueva Generación (NGN).

- IP sobre Óptico, es sin duda, la solución técnica y comercial que soporta las demandas de los proveedores para satisfacer las necesidades no solo de hoy sino de un futuro lejano. Para los proveedores de servicios de Internet (ISP) es menos costoso mover una gran cantidad de agregados de paquetes IP en un formato puramente óptico entre los puntos de transito en lugar de utilizar las alternativas tradicionales para obtener el mismo resultado. Adicionalmente, estos proveedores buscan apalancar los mecanismos de ingeniería de tráfico IP para configurar rápidamente recursos al nivel óptico y poder soportar las crecientes demandas de tráfico y servicio
- Los requerimientos exigidos a la capa óptica han creado en los proveedores una necesidad por tener en su backbone conexiones que ofrezcan grandes anchos de banda. Dichas necesidades están siendo cubiertas por las conexiones ópticas utilizando diferentes tecnologías de multiplexación, y para este caso la tecnología que mayor capacidad ofrece en el momento es DWDM.
- Desde la perspectiva técnica y económica, la posibilidad de suministrar potencialmente una capacidad de transmisión ilimitada es la ventaja más obvia de la tecnología DWDM.
- Los continuos avances alcanzados por diferentes cuerpos de estandarización son ejemplos definitivos de esta tendencia. Estos esfuerzos están ayudando a definir un conjunto de protocolos común para gestión del enlace, descubrimiento de topología y enrutamiento, señalización, y supervivencia a través de redes IP y ópticas. Más aún,

muchos de los conceptos avanzados de ingeniería de recursos desarrollados para redes IP, tales como enrutamiento basado en restricciones e ingeniería de tráfico, están buscando su aplicación en el espacio óptico. En este sentido, el desarrollo que ofrece mayores ventajas es MPLS y su conjunto de extensiones para alcanzar el MPLS Generalizado (GMPLS).

- Los estándares del plano de control óptico permitirán la construcción de redes ópticas automatizadas con equipos de múltiples vendedores, al especificar un conjunto mínimo de características que necesitan soportar todos los dispositivos que se utilizarán en estas redes. Además, permitirán reducir los costos de instalación y operación de este tipo de redes para los principales usuarios de conmutadores ópticos: los operadores y proveedores de servicio.
- Bajo la perspectiva de GMPLS, los modelos de Interconexión para el transporte de IP sobre redes ópticas son: el modelo Peer (de pares o iguales), donde el plano de control IP actúa como un par del control en la red de transporte óptico, lo cual implica que una sola instancia del plano de control es implementada sobre los dominios IP y óptico; el modelo Overlay (de superposición), en el cual el enrutamiento, distribución de topología, y protocolos de señalización de la red IP son independientes del enrutamiento, distribución de topología, y protocolos de señalización dentro del dominio óptico; y finalmente el modelo Ampliado, en el que hay instancias de enrutamiento separadas en los dominios IP y óptico, pero cierto tipo de información de una instancia de enrutamiento puede ser pasada a la otra. La escogencia de los modelos dependerá de los requerimientos y funcionalidad establecidos para la red que se desea implementar.
- Teniendo en cuenta los requerimientos de los usuarios y las necesidades del transporte de información que se plantean hoy en día, podemos concluir que las redes ópticas deben ser de larga duración, muy flexibles y ampliamente controlables. Además, se hace necesaria la introducción de inteligencia al plano de control de las redes ópticas para hacerlas más versátiles, permitiendo a algunos proveedores de servicios ofrecer servicios genéricos de capa óptica que podrían no ser específicos al cliente.
- El ancho de banda es un factor muy importante y decisivo en la implementación de servicios sobre una nueva red, pues asegura la adecuada prestación de servicios, con alta calidad, posibilitando además la implementación de nuevas soluciones en un futuro. Por esta razón se debe realizar una planeación de la red óptica, con el fin de definir si los requerimientos y necesidades son lo suficientemente fuertes para tomar la decisión de implementar DWDM, que es una tecnología de elevada capacidad para el transporte de información. Este análisis debe realizarse basándose en aspectos como las aplicaciones requeridas, los servicios que se van a prestar y la calidad de estos, la velocidad de transmisión y el ancho de banda necesario para satisfacer las necesidades planteadas.
- Hoy en día, la fibra óptica está catalogada como el medio de transmisión de información más eficiente para satisfacer la demanda de ancho de banda, debido a sus

principales características, como: baja atenuación, alta capacidad de transmisión, inmunidad a la interferencia electromagnética, entre muchas otras.

Existen actualmente diferentes tipos de fibra, de los cuales no todos son aptos para la implementación de la tecnología DWDM y el tipo de fibra NZ-DSF (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber – G.655), es el más óptimo. Aunque la fibra estándar NDSF (Non-Dispersion-Shifted Fiber - G.652) es la que se encuentra en la mayoría de instalaciones de fibra y puede soportar WDM en el área metropolitana, sus características no permiten obtener el mayor rendimiento en sistemas de alta capacidad como DWDM. La escogencia de los equipos, así como de la fibra óptica durante el proceso de planeación de un sistema DWDM, son fundamentales para garantizar el cumplimiento de los requerimientos en cuanto a desempeño, flexibilidad, calidad, funcionalidad y escalabilidad de la red.

- Actualmente la fabricación y comercialización de equipos para la implementación de soluciones basadas en tecnología GMPLS/DWDM es bastante limitada, ya que apenas está entrando en el mercado para perfilarse como una solución integral a la necesidad de capacidad de transporte y funcionalidad tanto para las redes MAN como WAN. Esta fue una gran limitante en la construcción del diseño, ya que las empresas fabricantes publican muy poca información al respecto.
- A nivel general, se puede concluir que para definición de criterios de una red IP sobre DWDM, la información fue un limitante debido a que el tema está siendo explorado a nivel mundial, y a pesar de que se cuenta con grandes avances en el campo, es bastante evidente que falta mucho camino por recorrer.

Para finalizar, se recomienda continuar el estudio de todos los aspectos técnicos relacionados con el desarrollo de las redes IP ópticas, y en especial de las redes IPoDWDM, pues la mayoría de estos generan gran cantidad de información aplicable en otras áreas relacionadas con las telecomunicaciones, como por ejemplo: enrutamiento basado en restricciones, señalización en trayectos ópticos, gestión de QoS, ingeniería de tráfico, conmutación fotónica y MEMS, amplificadores ópticos, protocolos GMPLS, etc.

También es recomendable incluir entre los equipos de laboratorio del departamento de Telecomunicaciones, un buen conjunto de elementos relacionados con fibra óptica, tales como fibra que cumpla con estándares G.652A, G.652C, G.653 y G.655, OTDRs, conectores, fuentes y detectores WDM/DWDM, etc., para establecer diferentes tipos de prácticas con el fin de poder analizar y entender más a fondo todos los fenómenos físicos y mecánicos que pueden afectar a la fibra óptica.

Del mismo modo se recomienda el establecimiento de vínculos más estrechos por parte del departamento y la facultad misma, con el sector empresarial de telecomunicaciones y electrónica en el país, y con los fabricantes de equipos de telecomunicaciones, para establecer acuerdos que permitan la adquisición de equipos para la realización de prácticas tanto académicas como investigativas, sobre sistemas de comunicaciones reales, tal y como se hace en otros centros universitarios del país y de todo el mundo.

BIBLIOGRAFÍA

ABAD, Silvia; LÓPEZ-AMO, Manuel. Redes ópticas transparentes. Características y futuro. Universidad Pública de Navarra.

A comparison of Multiprotocol Label Switching (MPLS) Traffic-Engineering initiatives. Web ProForum Tutorial. The International Engineering Consortium.

ARTEAGA OROZCO, Maria Isabel; ZAMORANO Amilkar Efraín. Metodología de planeación e instalación de sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica. 2000. Universidad del Cauca.

BELDA, Angela. Arquitectura GMPLS, Generalized Multiprotocol Label Switching. 2002.

BENITO, David. Jornadas Red-Iris: Redes ópticas. Universidad de Navarra. Pamplona, España. 2001.

Deployment and Design Issues of IP Over Optical Networks. Presentación Cisco Systems.

BONENFANT, Paul;, RODRIGUEZ-MORAL, Antonio; MANCHESTER, James. "IP OVER WDM": The missing link. White paper - Optical networking group. Lucent Technologies.

CABALLERO ARTIGAS, José M. Acceso y Transporte a alta velocidad: Tendencias y estrategias. Presentación ICT Electronics.

CHOKESATEAN, Parasak; YAEMNOI, Titintorn; SUKCHAROENKANA, Wonganan; ZHANG, Yun. Will GMPLS replace ATM and SONET/SDH in the next few years?

Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM). Web ProForum Tutorial. The International Engineering Consortium.

Draft-ietf-mpls-generalized-signaling-07.txt, Generalized MPLS - Signaling Functional Description

Draft-ietf-mpls-generalized-rsvp-te-06.txt, Generalized MPLS Signaling - RSVP-TE Extensions

Draft-ietf-mpls-generalized-cr-ldp-05.txt, Generalized MPLS Signaling - CR-LDP Extensions

Draft-ietf-mpls-lmp-02.txt, Link Management Protocol (LMP)

Draft-ietf-ccamp-lmp-wdm-00.txt, LMP for WDM Optical Line Systems (LMP-WDM)

- Draft-ietf-ccamp-gmpls-routing-02.txt, Routing Extensions in Support of Generalized MPLS
- Draft-ietf-ccamp-ospf-gmpls-extensions-04.txt, OSPF Extensions in Support of Generalized MPLS
- Draft-ietf-isis-gmpls-extensions-08.txt, IS-IS Extensions in Support of Generalized MPLS
- Draft-ietf-ipo-ason-02.txt. Automatic Switched Optical Network (ASON) Architecture and Its Related .Protocols.
- Draft-ietf-ipo-carrier-requirements-03.txt. Carrier Optical Services Requirements.
- Draft-ietf-ipo-framework-02.txt. IP over Optical Networks: A Framework.
- Draft-ietf-ipo-impairments-02.txt. Impairments And Other Constraints On Optical Layer Routing.
- Draft-ietf-ipo-optical-inter-domain-01.txt. Optical Inter Domain Routing Considerations.
- Fibra TrueWave RS. Fibra Optica con Dispersión Cromática No Cero NZDF. Descripción del producto. OFS.
- FIBRA ÓPTICA - Multiplexación densa en longitud de onda (DWDM). FERNÁNDEZ ROJO, Roberto. Conectónica. Madrid, España.
- Generalized Multiprotocol Label Switching (GMPLS). Web ProForum Tutorial. The International Engineering Consortium.
- Generalized Multiprotocol Label Switching: An Overview of Routing and Management Enhancements. IEEE Communications Magazine. Enero 2001.
- Generalized Multiprotocol Label Switching:: An Overview of Signalling Enhancements and Recovery Techniques. IEEE Communications Magazine, Julio 2001
- GIRARD, André. Guide to WDM Technology & Testing. Quebec City, Canada: EXFO Electr-
- GMPLS: A new way of optical networking. White Rock Networks. 2002. Optical Engineering Inc. 2000.
- GROTE, Walter; HENRY, Cristian; OLIVARES, Ricardo; SAAVEDRA, Fideromo. Desarrollo de una red experimental IP/WDM. Red Óptica Reuna. Santiago de Chile. 2002.
- GUTIÉRREZ H., Patricia; RAMÍREZ J., Carlos Julio. Estudio y proyección de la técnica WDM en el desarrollo de redes de comunicaciones ópticas. 2000. Universidad del Cauca.

HENRY, Cristian E. Documento de Diseño de la Red Óptica IP del Proyecto Fondef D00I1026 "Redes ópticas para la Internet del Futuro" Revisión 1.0. Santiago de Chile. 2002.

HERNÁNDEZ GARIBAY, Juan Roberto. Fundamentos de Transmisión de Datos con Fibra Óptica. Presentación de clase. 2003.

HILL, A; Neri, F. Optical Switching networks: from circuits to packets, IEEE Communications Magazine, Marzo 2001.

Internet Protocol (IP) Internetworking Transport, Web Proforum Tutorials, The International Engineering Consortium.

Introduction to DWDM for Metropolitan Networks. Tutorial de Cisco Systems.

ITU-T G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre cable. Unión Internacional de Telecomunicaciones. 2000.

ITU-T G.653. Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable. Unión Internacional de Telecomunicaciones. 2000.

ITU-T G.655. Characteristics of a non-zero dispersion shifted single-mode optical fibre cable. Unión Internacional de Telecomunicaciones. 2000.

ITU-T G.709. Interfaces for the optical transport network (OTN). Unión Internacional de Telecomunicaciones. 2001.

ITU-T G.872. Architecture of optical transport networks. Unión Internacional de Telecomunicaciones. 2001.

ITU-T G.807. Requirements for the Automatic Switched Transport Network (ASTN). Unión Internacional de Telecomunicaciones. 2001.

ITU-T G.8080. Architecture for the automatically switched optical network (ASON). Unión Internacional de Telecomunicaciones. 2001.

JERRAM, Neil; FARREL, Adrian. MPLS in optical networks. Enfield, UK. Data Connection Limited. 2001.

KALYANARAMAN, Shivkumar. Reference: IS-IS vs OSPF. Presentación de clase. Rensselaer Polytechnic Institute.

KATZ, Dave. IS-IS and OSPF. A Comparative Anatomy. Presentación Juniper Networks. 2000.

KAUFMANN, Andreas. G.709 The Optical Transport Network (OTN). Acterna. 2001.

LARKIN, Nic. ASON and GMPLS - The battle of the optical control plane. Enfield, UK. Data Connection Limited. 2002.

LOBO POYO, Jesús Felipe; WARZANSKYJ GARCÍA, Wsewolod. Redes de transmisión todo ópticas: independencia frente a las redes de transporte. Telefónica Investigación y Desarrollo. 2001.

MASIP BRUIN, Xavier; MUÑOZ, Raul; SÁNCHEZ LÓPEZ, Sergio; PARETA, Josep Solé, PASCUAL, Jordi Domingo; JUNYENT, Gabriel. Mecanismo de Encaminamiento Dinámico en Redes ASON. Universitat Politècnica de Catalunya, Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, CTTC. Barcelona. 2002.

Mediciones en fibras ópticas. Universidad Nacional de Quilmas.

MONTAÑANA, Rogelio. Redes Ópticas. Presentación Máster de Telemática. Universidad de Valencia. 2002.

Multiprotocol Lambda Switching Combining MPLS Traffic Engineering Control with Optical Crossconnects. IEEE Communications Magazine,, Marzo 2001.

OJEDA, Luis Gerardo. Fibra Óptica. Universidad de las Américas – Puebla.

OSORIO Juan Felipe, SANCHEZ, Friman, OROZCO, Gustavo Adolfo. Fibra óptica. Laboratorio de sistemas de comunicación. Universidad de Antioquia. Medellín.

Optical Communications Group – FIAT LUX. Tema 1: Introducción a las redes ópticas. 2002.

Optical Communications Group – FIAT LUX. Tema 3: Dispositivos y componentes avanzados para redes ópticas. 2002.

Optical Communications Group – FIAT LUX. Tema 5: Control y gestión de redes ópticas. 2002.

Optical Communications Group – FIAT LUX. Tema 6: Protección en redes ópticas. 2002.

SAHA, Debanjan. Converging Optical and IP: Can GMPLS Take Control? Communication SYSTEMS design. 2002.

SALAVERT, Antonio. Introducción al DWDM (Dense Introducción al DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Traducción del documento de Cisco "Introduction to DWDM for Metropolitan Networks".

SIENRA, Luis Gabriel. WDM. Una tecnología con fibra. Artículos Aniret. Asociación Nacional de Industriales de Redes de Telecomunicaciones A.C. 2001.

The evolution towards photonics networking:: from SDH/ATM/IP to MPLS/GMPLS". NETTEST Technical Documentation,, Alcatel Seminary.
Traffic Engineering with MPLS. Presentación Juniper Networks. 2003.

User Network Interface (UNI) 1.0 Signaling Specification. Optical Internetworking Forum (OIF). 2000.

The Cisco IP+Optical Unified Control Plane: Accelerating Service Velocity with IP-Enabled Provisioning. White Paper, Cisco Systems.

Yun, Ana. GMPLS MPLS. Temas Avanzados de Redes de Ordenadores. Notas de clase. 2001.

Enlaces Web:

www.gmpls.org
www.acterna.com.
www.juniper.net
www.calient.net
www.tellium.com
www.movaz.com
www.nayna.com
www.networkphotonics.com
www.dataconnection.com
www.princetonoptical.com
www.inaranetworks.com
www.oni.com
www.luxcore.com
www.accelight.com
www.ciena.com
www.sycamorenet.com
www.corvis.com
www.lucent.com
www.nortel.com
www.marconi.com
www.cisco.com
www.alcatel.com
www.sorrentonet.com
www.infinera.com
www.iec.org
www.ofsoptics.com
www.oiforum.com/
www.ietf.org

www.iec.org/online/tutorials/
www.aniret.org.mx
www.lucent-optical.com
www.csdmag.com
www.calient.net/files/GMPLS.pdf
www.calient.net/files/IEEEGMPLSpublished.pdf
www.labn.net/docs/gmpls.pdf
www.ripe.net/ripe/meetings/archive/ripe-39/presentations/mpls-overview/
www.cir-optical.com/wrn.pdf
www.tellium.com/documents/ip_centric.pdf
www.tellium.com/documents/WDMcon_May_2000.pdf
www.dataconnection.com/mpls/mplsidx.htm#WhitePapers
www.cid.alcatel.com/doctypes/techpaper/7770/index.jhtml
www.polarisnetworks.com/gmpls/
www.nigeriancomputersociety.com/contentimages/Generalized%20Multiprotocol.pdf
www.sorrentonet.com/whitepapers.asp
www.eurescom.de/~pub/seminars/past/2001/Networking
www.eurescom.de/~pub/seminars/past/2001/Networking/09Papadimitriou/sld001.htm
www.labn.net/gmpls-survey/draft-03-preview-b.txt
www.oiforum.com/public/documents/UNIWhitePaper.pdf
www.oiforum.com/public/documents/UNI_1.0.pdf
www.research.att.com/areas/opticalnetworking/papers/JohnS/ofc2001.ZIP
www.oiforum.com/public/documents/Bouffard_UNI.pdf
www.juniper.net/techcenter/techpapers/200001.pdf
www.avici.com/technology/whitepapers/mpls_wp.pdf
www.iec.org/tutorials/mpls/
www.ripe.net/ripe/meetings/archive/ripe-39/presentations/mpls-vpn/
www.nortelnetworks.com/corporate/technology/mpls/collateral/55053.25-04-01.pdf
www.nortelnetworks.com/corporate/technology/mpls/collateral/finalmplsprimer.pdf
www.riverstonenet.com/pdf/MPLS-IIR-Presentation.pdf
www.juniper.net/techcenter/techpapers/
www.altera.com/literature/an/an132.pdf
www.cs.berkeley.edu/~randy/Courses/cs294.s02/MPLS.ppt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-gmpls-architecture-03.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-generalized-signaling-09.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-lsp-hierarchy-08.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-generalized-rsvp-te-09.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-rsvp-unnum-07.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-generalized-cr-ldp-07.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-bundle-04.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-te-mib-08.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-ospf-gmpls-extensions-08.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-srisuresh-ospf-te-03.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-katz-yeung-ospf-traffic-08.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-isis-gmpls-extensions-14.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-lmp-test-sonet-sdh-00.txt

www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-lmp-wdm-01.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-lmp-mib-03.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-gmpls-te-mib-00.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-gmpls-sonet-sdh-06.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-gmpls-sonet-sdh-extensions-03.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-gmpls-g709-01.txt
www.iam.unibe.ch/~rvs/events/speedup/presentations/Dey.pdf
www.tellium.com/documents/aon.pdf
www.cse.msu.edu/~xiaoxipe/papers/thesis/thesis.pdf
www.ee.vt.edu/~ldasilva/6504/The%20Future%20of%20QoS.pdf
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-isis-gmpls-extensions-14.txt
www.eee.metu.edu.tr/~bilgen/AltanK.htm
www.cis.ohio-state.edu/~jain/cis788-99/dwdm/
www.bell-atl.atd.net/wdmpaper/wdm.html
www.bell-atl.atd.net/s-wpaper/s-w.html
www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/mels/dwdm/dwdm_fns.htm
www.research.att.com/areas/opticalnetworking/papers/JohnS/ofc2001.ZIP
www.krnet.or.kr/Pdf/A1-2.pdf
www.cs.buffalo.edu/~qiao/cse620/onw2000.pdf
www.iec.org/tutorials/acrobat/raman.pdf
www.iec.org/tutorials/acrobat/opt_trans.pdf
www.mplssrc.com/
www.ail.gmu.edu/
www.awduche.com
www.urec.cnrs.fr/hd/
www.labn.net/docs/
www.cse.msu.edu/~xiaoxipe/
www.research.ibm.com/wdm/route/route.html
www.research.att.com/areas/opticalnetworking/IPoverWDMpublications.html
www.ll.mit.edu/aon/index.html
www.bell-labs.com/project/MONET/
www.bell-labs.com/org/physicalsciences/projects/mems/mems1.html
www.people.cornell.edu/pages/mp51/MEMS.htm
www.dbanks.demon.co.uk/ueng/
<http://redesopticas.reuna.cl>
http://mailweb.udlap.mx/~lgojeda/telecom3/fibra_optica/portada.html
<http://basicas.ujat.mx/eventos/sicom2002>
<http://mems.isi.edu/>

GLOSARIO

ABR: Area Border Router. Enrutador de borde de área.

Absorción: Cantidad de atenuación óptica en la fibra generada por la transformación de potencia óptica en calor.

ADM: Add/drop multiplexer. Equipo digital que provee una interfaz entre señales de alta y baja velocidad, permitiendo insertar o extraer las segundas de una señal multiplexada sin demultiplexar la señal completa.

Adyacencia: Contigüidad, proximidad.

Ancho de banda óptico: En redes ópticas, es el rango de frecuencias dentro del cual una fibra óptica o un dispositivo terminal pueden transmitir datos o información.

APS: Automatic Protection Switching. Mecanismo de conmutación que enrutar el tráfico de las líneas principales a las líneas de protección para protegerlo de fallos o cortes de fibra.

AS: Autonomous System. Sistema autónomo.

ASBR: Autonomous System Boundary Router. Enrutador de frontera de un sistema autónomo.

Atenuación: Decremento en la potencia de la señal a lo largo de una fibra óptica. Es causada por una combinación de absorción y dispersión y es expresada usualmente en decibeles por kilómetro (dB/km).

Backbone: Conexión física o grupo de conexiones que forman un gran camino de transporte ó ruta primaria utilizada en una red para el transporte de tráfico entre segmentos de red.

Banda Ancha: Método de transmisión de datos en el cual múltiples señales comparten el ancho de banda de una portadora de alta frecuencia.

BER: Bit Error Rate. Cantidad de bits transmitidos que son recibidos incorrectamente.

BGP: Border Gateway Protocol. Protocolo de Borde de Pasarela.

BLSR: Bidirectional Line Switched Ring. Esquema usado en redes ópticas en el cual el tráfico es enviado por un par de anillos en direcciones opuestas. Si ocurre una falla, todo el tráfico es conmutado para utilizar el otro anillo BLSR formando un solo anillo de protección. Puede ser implementado también con cuatro fibras, dando redundancia total.

Bragg grating: Técnica para la construcción de funciones de filtrado óptico directamente en una pieza de fibra óptica basada en técnicas interferométricas. Las regiones con índices de refractividad alto y bajo en el núcleo de la fibra son formados al exponer fibra fotosensitiva a luz UV muy intensa a través de una máscara.

Cable: Cuando se trata de fibra óptica, un cable representa uno o más hilos de fibra óptica dentro de cubiertas protectoras.

Cable de fibra óptica: Medio de transmisión de datos que utiliza fibras de vidrio o plástico en vez de metales para transportar pulsos modulados de luz.

Canal: Ruta de comunicación o la señal enviada sobre la ruta. En WDM/DWDM, un canal es asignado para especificar una longitud de onda.

Capacidad: Medida de la cantidad de información que un elemento de telecomunicaciones puede transportar o procesar. Puede ser expresada en bits por segundo, o como el número de conexiones establecidas.

CBR. Constant Bit Rate: Tasa de Bits Constante.

CR-LDP: Constraint-based Routing LDP. Protocolo de Distribución de Etiquetas con Enrutamiento Basado en Restricciones.

CSPF: Constraint-based Shortest Path First. Heurística de enrutamiento basada en el cálculo de la ruta más corta entre dos nodos, teniendo en cuenta las posibles restricciones de trayecto.

Demultiplexor: Módulo que separa dos o más señales que fueron combinadas por un equipo multiplexor compatible.

DFB: Distributed feedback laser. Diodo láser de inyección construido con un enrejado de reflexión Bragg fuera de la región activa para suprimir los múltiples modos longitudinales y mejorar un solo modo longitudinal.

Diodo láser: Dispositivo semiconductor que emite luz coherente cuando es estimulado.

Dispersión: Ensanchamiento en el dominio del tiempo de una señal de luz causada por señales de luz viajando a diferentes velocidades a través de una fibra óptica. Puede ser causada por efectos modales o cromáticos.

Dispersión cromática: Propiedad de la fibra óptica por la cual las longitudes de onda en una fibra óptica viajan a diferentes velocidades y llegan a diferentes tiempos, resultando en una degradación de la señal recibida.

Dispersión material: Dispersión resultante de las diferentes velocidades de cada longitud de onda en una fibra.

Dispersión modal: Dispersión causada por las diferentes distancias de tránsito de los diferentes modos de propagación, que resultan en tiempos de llegada diferentes.

Dispersión Rayleigh: Dispersión de luz que resulta de pequeñas heterogeneidades en la densidad o composición del material.

DSF: Dispersión-shifted fiber. Tipo de fibra monomodo diseñada para tener dispersión cero en la región de 1550 nm. Trabaja pobremente para aplicaciones DWDM debido a sus altas no linealidades en el punto de dispersión cero.

DWDM: Dense Wavelength division multiplexing. Transmisión de múltiples señales sobre longitudes de onda cerradamente espaciadas en la región de 1550 nm. de una fibra.

EDFA: Erbium-doped fiber amplifier. Dispositivo utilizado para amplificar señales ópticas. Estos, a diferencia de los regeneradores, no convierten la señal a formato eléctrico antes de amplificarla. En un EDFA las fibras son dopadas con erbio, el cual puede amplificar la luz en la región de 1550 nm. cuando es bombeado un láser externo.

ESCON: Enterprise System Connection. Arquitectura de Conexión de Sistemas Empresariales. Desarrollada por IBM.

Espaciamiento de canal óptico: Separación, usualmente expresada como una frecuencia, entre longitudes de onda de canales adyacentes WDM/DWDM.

FA: Forwarding Adjacency. Adyacencia de Envío

Fiber Channel: Estándar que define canales de comunicación de computadores sobre fibra óptica a velocidades entre 132 y 1062.5 Mbps., sobre distancias de hasta 10 km.

Fibra de índice escalón: Fibra que tiene un índice de refracción uniforme en su núcleo.

Fibra de índice gradual: Fibra óptica en la cual el índice de refracción del núcleo decrece hacia el revestimiento.

Fibra monomodo: Fibra óptica de núcleo pequeño a través del cual solamente puede propagarse un modo.

Fibra oscura: Fibra óptica inactiva. Típicamente cuando la fibra es instalada parte de esta no es utilizada y permanece en reserva para uso futuro.

Fotodetector: Transductor optoelectrónico tal como un fotodiodo PIN o un fotodiodo de avalancha.

Fotodiodo: Dispositivo semiconductor que convierte luz en corriente eléctrica.

Fotón: Quantum de energía electromagnética; partícula de luz.

Fotónico: Término utilizado para describir comunicaciones usando fotones, análogo a electrónico para comunicaciones electrónicas.

FSC: Fiber Switch Capable: Interfaz con capacidad de conmutación de fibra.

FWM: Four-Wave mixing. Efecto no lineal que ocurre en los sistemas DWDM cuando múltiples longitudes de onda se mezclan para formar nuevas longitudes de onda. Este efecto es más predominante cerca al punto de dispersión cero y a espaciamentos pequeños de longitudes de onda.

GMPLS: Generalized Multi-Protocol Label Switching. Multiprotocolo de Conmutación de Etiquetas Generalizado.

IETF: Internet Engineering Task Force. Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet.

IGP: Interior Gateway Protocol. Protocolo Interno de Pasarela

Índice de refracción: Relación de la velocidad de la luz en el espacio libre con la velocidad de la luz en un material.

IP: Protocolo Internet.

IS-IS: Intermediate System to Intermediate System. Protocolo de enrutamiento IGP.

ITU: International Telecommunication Union. Unión Internacional de Telecomunicaciones.

Jitter: Variaciones en el tiempo, pequeñas y rápidas, de una señal o forma de onda debido a ruido, cambios en las características de los componentes, voltajes, sincronización, etc.

L2SC. Layer-2 Switch Capable: Interfaz con capacidad de conmutación a Nivel 2.

Lambda: Canal de datos en sistemas WDM/DWDM asignados a una longitud de onda específica. Lambda y longitud de onda son términos intercambiables.

Láser: Originalmente era un acrónimo para Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, láser es una fuente que produce luz coherente casi monocromática.

Latencia: Lapso necesario para que un paquete de información viaje desde la fuente hasta su destino.

LDP: Label Distribution Protocol. Protocolo de Distribución de Etiquetas.

LED: Light Emitting Diode. Dispositivo semiconductor que acepta una entrada eléctrica y la convierte en una señal en forma de luz incoherente.

LMP: Link Management Protocol. Protocolo de Gestión de Enlace.

LOL. Loss of Light: Medición que permite establecer si hay ausencia o presencia de luz con potencia suficiente en una fibra óptica.

Longitud de onda: Distancia entre puntos de fase correspondiente de dos ciclos consecutivos de una onda. En los sistemas DWDM, longitud de onda es un termino intercambiable con lambda.

Longitud de onda central: Longitud de onda medida en el punto central de la potencia óptica efectiva de un láser.

LSA: Link State Advertisement. Mensaje de advertencia de estado de enlace.

LSC: Lambda Switch Capable: Interfaz con capacidad de conmutación de longitudes de onda.

LSR: Label Switched Router. Enrutador de conmutación de etiquetas.

LSP: Label Switched Path. Trayecto de etiquetas conmutadas.

MPLS. Multiprotocol Label Switching: Conjunto de estándares de la IETF diseñados para permitir a los flujos de paquetes ser conmutados con base en etiquetas en vez de la dirección de destino. MPLS está basado en el concepto de enrutamiento al extremo y conmutación en el núcleo.

MTBF. Mean Time Between Failures: Tiempo medio entre fallas.

Multiplexor: Módulo que combina dos o más señales en una sola para ser transportada sobre una línea o fibra.

MUX: Ver Multiplexor.

NDSF. Non-dispersion-shifted fiber: Tipo de fibra monomodo diseñada para tener dispersión cero en la región de 1310 nm.

NGN. Next Generation Networks: Redes de Nueva Generación.

NMS: Network Management System. Sistema de gestión de red.

No linealidad: Desviación de la linealidad en un circuito electrónico, dispositivo electro-óptico, o fibra, que genera componentes no deseados en una señal.

Núcleo: Porción central conductora de luz de una fibra óptica. Tiene un índice de refracción más alto que el revestimiento.

NZ-DSF. Non-zero dispersion-shifted fiber. Tipo de fibra monomodo con dispersión modificada que tiene el punto de dispersión cero cerca de la ventana de 1550 nm. pero fuera de la actual ventana usada para la transmisión de señales. Está diseñada para maximizar el ancho de banda óptico mientras disminuyen las no linealidades de la fibra.

OA. Amplificador óptico: Dispositivo que amplifica una señal óptica sin convertirla a formato eléctrico, como por ejemplo un amplificador EDFA.

OADM. Optical Add/Drop Multiplexer: Multiplexor utilizado en redes ópticas que puede insertar o extraer longitudes de onda de una señal óptica sin necesidad de convertirla a formato electrónico.

OSPF: Open Shortest Path First. Protocolo de enrutamiento basado en el cálculo de la ruta más corta entre dos nodos.

OTDR. Optical Time-Domain Reflectometer: Instrumento usado en diseño y diagnóstico que localiza fallas o infiere atenuaciones en las redes ópticas.

OXC: Optical Cross-Connect. Crossconector óptico.

Perdidas de Inserción: Pérdida de potencia que resulta de la inserción de un componente, tal como un conector o emplame en un trayecto anteriormente continuo.

PMD. Polarization Mode Dispersion. Propiedad inherente del medio óptico, causado por la diferencia en las velocidades de propagación de la luz en los estados ortogonales principales de polarización del medio de transmisión.

Presupuesto de pérdidas: Cantidad de atenuación total permitida en un sistema.

Presupuesto de pérdidas en enlace óptico. Rango de pérdidas ópticas sobre el cual una fibra óptica operará y cumplirá todas las especificaciones, expresado en forma relativa a la potencia de salida del transmisor.

PSC. Packet Switch Capable. Interfaz con capacidad de conmutación de paquetes.

PSTN. Public switched telephone network: Término genérico para la colección de redes que proveen servicio público de conmutación telefónica.

PVC. Permanent Virtual Circuit: Circuito Virtual Permanente.

PXC: Photonic Cross-Connect. Crossconector fotónico.

QoS. Quality of Service: Calidad de Servicio.

Refracción: Cambio de dirección de un frente de onda cuando este pasa a través de un límite entre dos medios diferentes.

Regenerador: Dispositivo que regenera las señales ópticas al convertir pulsos ópticos en eléctricos, limpiando la señal eléctrica para eliminar el ruido, y convirtiéndola nuevamente a pulsos eléctricos a la salida; también es llamado repetidor regenerativo.

Rejilla ITU: Designación estándar de longitudes de onda hecha por la ITU para los láser. Está basada en un espaciado de 100 GHz. de frecuencia óptica con una frecuencia central de 193.1 THz. (1552.52 nm.).

RSVP: ReSource reserVation Protocol. Protocolo de Reservación de Recursos.

SDH. Synchronous Digital Hierarchy: Estándar europeo que define unas velocidades y formatos para la transmisión de señales ópticas sobre fibra.

SONET. Synchronous Optical Network. Interfaz estándar desarrollada por Bellcore y ampliamente utilizada por la industria de telecomunicaciones para transporte sincrónico de alta velocidad sobre fibra óptica.

STM(-N): Synchronous Transport Module (-N). Módulo de transporte sincrónico.

TDM: Time-Division Multiplexing. Multiplexación por división de tiempo.

TE: Traffic Engineering. Ingeniería de tráfico.

Transparencia de protocolo: Habilidad de un sistema para transportar información sin estar conciente de protocolos de nivel más alto.

Transponedor: En un sistema DWDM, módulo que recibe una señal de entrada y la convierte en una longitud de onda para ser ópticamente multiplexada con otras.

UBR. Unspecified Bit Rate: Tasa de Bits Desconocida o no especificada.

UPSR. Unidirectional Path Switched Ring: Esquema utilizado en anillos ópticos en el cual el tráfico es enviado en uno de los dos anillos y en una dirección. El segundo anillo es reservado para redundancia.

VBR. Variable Bit Rate: Tasa de Bits Variable.

VBR-RT. Variable Bit Rate – Real Time: Tasa de Bits Variable para datos en Tiempo Real.

WDM. Wavelength division multiplexing: Transmisión de dos o más señales sobre (en forma relativa) longitudes de onda ampliamente espaciadas, típicamente 850 y 1310 nm. o 1533 y 1577 nm., en una sola fibra.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La rápida demanda de acceso a la información y en especial el aumento del tráfico de Internet, creó una especial atención en el desarrollo de las redes de comunicaciones que buscan alcanzar anchos de banda de gran capacidad. Adicionalmente, estas nuevas redes buscan proporcionar un acceso rápido y fiable a diversos tipos de tráfico, con características bien diferenciadas: voz, vídeo y tráfico de datos, lo que implica capacidad de respuesta en tiempo real y niveles diferenciados de calidad de servicio.
- La tendencia a mantener una arquitectura multinivel entre las capas IP y óptica, planteada tiene más problemas que ventajas, como lo es la superposición funcional y su compleja gestión de red. Es muy difícil integrar sistemas de gestión para diferentes tecnologías de red, y a veces las redes son manejadas por diferentes operadores. Esto hace que la red no pueda adaptarse fácilmente a cambios de corto plazo, tales como los generados por las variaciones de demanda planteadas por los usuarios de una red.
- Estas limitaciones promovieron la creación de una nueva arquitectura donde se eliminan estas capas intermedias para darle paso a un nuevo modelo donde la capa IP es superpuesta directamente sobre la capa óptica. Así, los dos niveles trabajan conjuntamente para lograr la implementación de todos los servicios con los parámetros de disponibilidad y QoS que demandan las Redes de Nueva Generación (NGN).
- IP sobre Óptico, es sin duda, la solución técnica y comercial que soporta las demandas de los proveedores para satisfacer las necesidades no solo de hoy sino de un futuro lejano. Para los proveedores de servicios de Internet (ISP) es menos costoso mover una gran cantidad de agregados de paquetes IP en un formato puramente óptico entre los puntos de tránsito en lugar de utilizar las alternativas tradicionales mencionadas anteriormente para obtener el mismo resultado. Además, estos proveedores buscan apalancar los mecanismos de ingeniería de tráfico IP para configurar rápidamente recursos al nivel óptico y poder soportar las crecientes demandas de tráfico y servicio.
- Los requerimientos exigidos a la capa óptica han creado en los proveedores una necesidad por tener en su backbone conexiones que ofrezcan grandes anchos de banda. Dichas necesidades están siendo cubiertas por las conexiones ópticas utilizando diferentes tecnologías de multiplexación, y para este caso la tecnología que mayor capacidad ofrece en el momento es DWDM.
- Desde la perspectiva técnica y económica, la posibilidad de suministrar potencialmente una capacidad de transmisión ilimitada es la ventaja más obvia de la tecnología DWDM.
- Los continuos avances alcanzados por diferentes cuerpos de estandarización son ejemplos definitivos de esta tendencia. Estos esfuerzos están ayudando a definir un

conjunto de protocolos común para gestión del enlace, descubrimiento de topología y enrutamiento, señalización, y supervivencia a través de redes IP y ópticas. Más aún, muchos de los conceptos avanzados de ingeniería de recursos desarrollados para redes IP, tales como enrutamiento basado en restricciones e ingeniería de tráfico, están buscando su aplicación en el espacio óptico. En este sentido, el desarrollo que ofrece mayores ventajas es MPLS y su conjunto de extensiones para alcanzar el MPLS Generalizado (GMPLS).

- Los estándares del plano de control óptico permitirán la construcción de redes ópticas automatizadas con equipos de múltiples vendedores, al especificar un conjunto mínimo de características que necesitan soportar todos los dispositivos que se utilizarán en estas redes. Además, permitirán reducir los costos de instalación y operación de este tipo de redes para los principales usuarios de conmutadores ópticos: los operadores y proveedores de servicio.
- Bajo la perspectiva de GMPLS, los modelos de Interconexión para el transporte de IP sobre redes ópticas son: el modelo Peer (de pares o iguales), donde el plano de control IP actúa como un par del control en la red de transporte óptico, lo cual implica que una sola instancia del plano de control es implementada sobre los dominios IP y óptico; el modelo Overlay (de superposición), en el cual el enrutamiento, distribución de topología, y protocolos de señalización de la red IP son independientes del enrutamiento, distribución de topología, y protocolos de señalización dentro del dominio óptico; y finalmente el modelo Ampliado, en el que hay instancias de enrutamiento separadas en los dominios IP y óptico, pero cierto tipo de información de una instancia de enrutamiento puede ser pasada a la otra. La escogencia de los modelos dependerá de los requerimientos y funcionalidad establecidos para la red que se desea implementar.
- Teniendo en cuenta los requerimientos de los usuarios y las necesidades del transporte de información que se plantean hoy en día, podemos concluir que las redes ópticas deben ser de larga duración, muy flexibles y ampliamente controlables. Además, se hace necesaria la introducción de inteligencia al plano de control de las redes ópticas para hacerlas más versátiles, permitiendo a algunos proveedores de servicios ofrecer servicios genéricos de capa óptica que podrían no ser específicos al cliente.
- El ancho de banda es un factor muy importante y decisivo en la implementación de servicios sobre una nueva red, pues asegura la adecuada prestación de servicios, con alta calidad, posibilitando además la implementación de nuevas soluciones en un futuro. Por esta razón se debe realizar una planeación de la red óptica, con el fin de definir si los requerimientos y necesidades son lo suficientemente fuertes para tomar la decisión de implementar DWDM, que es una tecnología de elevada capacidad para el transporte de información. Este análisis debe realizarse basándose en aspectos como las aplicaciones requeridas, los servicios que se van a prestar y la calidad de estos, la velocidad de transmisión y el ancho de banda necesario para satisfacer las necesidades planteadas.

- Hoy en día, la fibra óptica está catalogada como el medio de transmisión de información más eficiente para satisfacer la demanda de ancho de banda, debido a sus principales características, como: baja atenuación, alta capacidad de transmisión, inmunidad a la interferencia electromagnética, entre muchas otras.
- Existen actualmente diferentes tipos de fibra, de los cuales no todos son aptos para la implementación de la tecnología DWDM y el tipo de fibra NZ-DSF (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber – G.655), es el más óptimo. Aunque la fibra estándar NDSF (Non-Dispersion-Shifted Fiber - G.652) es la que se encuentra en la mayoría de instalaciones de fibra y puede soportar WDM en el área metropolitana, sus características no permiten obtener el mayor rendimiento en sistemas de alta capacidad como DWDM.
- La escogencia de los equipos, así como de la fibra óptica durante el proceso de planeación de un sistema DWDM, son fundamentales para garantizar el cumplimiento de los requerimientos en cuanto a desempeño, flexibilidad, calidad, funcionalidad y escalabilidad de la red.
- Actualmente la fabricación y comercialización de equipos para la implementación de soluciones basadas en tecnología GMPLS/DWDM es bastante limitada, ya que apenas está entrando en el mercado para perfilarse como una solución integral a la necesidad de capacidad de transporte y funcionalidad tanto para las redes MAN como WAN. Esta fue una gran limitante en la construcción del diseño, ya que las empresas fabricantes publican muy poca información al respecto.
- A nivel general, se puede concluir que para definición de criterios de una red IP sobre DWDM, la información fue un limitante debido a que el tema está siendo explorado a nivel mundial, y a pesar de que se cuenta con grandes avances en el campo, es bastante evidente que falta mucho camino por recorrer.

Para finalizar, se recomienda continuar el estudio de todos los aspectos técnicos relacionados con el desarrollo de las redes IP ópticas, y en especial de las redes IPoDWDM, pues la mayoría de estos generan gran cantidad de información aplicable en otras áreas relacionadas con las telecomunicaciones, como por ejemplo: enrutamiento basado en restricciones, señalización en trayectos ópticos, gestión de QoS, ingeniería de tráfico, conmutación fotónica y MEMS, amplificadores ópticos, protocolos GMPLS, etc.

También es recomendable incluir entre los equipos de laboratorio del departamento de Telecomunicaciones, un buen conjunto de elementos relacionados con fibra óptica, tales como fibra que cumpla con estándares G.652A, G.652C, G.653 y G.655, OTDRs, conectores, fuentes y detectores WDM/DWDM, etc., para establecer diferentes tipos de prácticas con el fin de poder analizar y entender más a fondo todos los fenómenos físicos y mecánicos que pueden afectar a la fibra óptica.

Del mismo modo se recomienda el establecimiento de vínculos más estrechos por parte del departamento y la facultad misma, con el sector empresarial de telecomunicaciones y electrónica en el país, y con los fabricantes de equipos de telecomunicaciones, para establecer acuerdos que permitan la adquisición de equipos de para la realización de prácticas tanto académicas como investigativas, sobre sistemas de comunicaciones reales, tal y como se hace en otros centros universitarios del país y de todo el mundo.

BIBLIOGRAFÍA

GIRARD, André. Guide to WDM Technology & Testing. Quebec City, Canada: EXFO Electromagnetic Engineering Inc. 2000.

ARTEAGA OROZCO, Maria Isabel; ZAMORANO Amilkar Efraín. Metodología de planeación e instalación de sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica. 2000. Universidad del Cauca.

GUTIÉRREZ H., Patricia; RAMÍREZ J., Carlos Julio. Estudio y proyección de la técnica WDM en el desarrollo de redes de comunicaciones ópticas. 2000. Universidad del Cauca.

LARKIN, Nic. ASON and GMPLS - The battle of the optical control plane. Enfield, UK. Data Connection Limited. 2002.

JERRAM, Neil; FARREL, Adrian. MPLS in optical networks. Enfield, UK. Data Connection Limited. 2001.

MASIP BRUIN, Xavier; MUÑOZ, Raul; SÁNCHEZ LÓPEZ, Sergio; PARETA, Josep Solé, PASCUAL, Jordi Domingo; JUNYENT, Gabriel. Mecanismo de Encaminamiento Dinámico en Redes ASON. Universitat Politècnica de Catalunya, Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, CTTC. Barcelona. 2002.

Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM). Web ProForum Tutorial. The International Engineering Consortium.

A comparison of Multiprotocol Label Switching (MPLS) Traffic-Engineering initiatives. Web ProForum Tutorial. The International Engineering Consortium.

SIENRA, Luis Gabriel. WDM. Una tecnología con fibra. Artículos Aniret. Asociación Nacional de Industriales de Redes de Telecomunicaciones A.C. 2001.

GMPLS: A new way of optical networking. White Rock Networks. 2002.

Generalized Multiprotocol Label Switching (GMPLS). Web ProForum Tutorial. The International Engineering Consortium.

ITU-T G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre cable. Unión Internacional de Telecomunicaciones. 2000.

ITU-T G.653. Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable. Unión Internacional de Telecomunicaciones. 2000.

ITU-T G.655. Characteristics of a non-zero dispersion shifted single-mode optical fibre cable. Unión Internacional de Telecomunicaciones. 2000.

ITU-T G.709. Interfaces for the optical transport network (OTN). Unión Internacional de Telecomunicaciones. 2001.

ITU-T G.872. Architecture of optical transport networks. Unión Internacional de Telecomunicaciones. 2001.

ITU-T G.807. Requirements for the Automatic Switched Transport Network (ASTN). Unión Internacional de Telecomunicaciones. 2001.

ITU-T G.8080. Architecture for the automatically switched optical network (ASON). Unión Internacional de Telecomunicaciones. 2001.

KALYANARAMAN, Shivkumar. Reference: IS-IS vs OSPF. Presentación de clase. Rensselaer Polytechnic Institute.

KAUFMANN, Andreas. G.709 The Optical Transport Network (OTN). Acterna. 2001.

HENRY, Cristian E. Documento de Diseño de la Red Óptica IP del Proyecto Fondef D00I1026 "Redes ópticas para la Internet del Futuro" Revisión 1.0. Santiago de Chile. 2002.

GROTE, Walter; HENRY, Cristian; OLIVARES, Ricardo; SAAVEDRA, Fideromo. Desarrollo de una red experimental IP/WDM. Red Óptica Reuna. Santiago de Chile. 2002.

KATZ, Dave. IS-IS and OSPF. A Comparative Anatomy. Presentación Juniper Networks. 2000.

Traffic Engineering with MPLS. Presentación Juniper Networks. 2003.

Yun, Ana. GMPLS MPLS. Temas Avanzados de Redes de Ordenadores. Notas de clase. 2001.

The evolution towards photonics networking:: from SDH/ATM/IP to MPLS/GMPLS". NETTEST Technical Documentation,, Alcatel Seminary.

Internet Protocol (IP) Internetworking Transport, Web Proforum Tutorials, The International Engineering Consortium.

HILL, A; Neri, F. Optical Switching networks: from circuits to packets, IEEE Communications Magazine, Marzo 2001.

Multiprotocol Lambda Switching Combining MPLS Traffic Engineering Control with Optical Crossconnects. IEEE Communications Magazine,, Marzo 2001.

Generalized Multiprotocol Label Switching: An Overview of Routing and Management Enhancements. IEEE Communications Magazine. Enero 2001.

Generalized Multiprotocol Label Switching:: An Overview of Signalling Enhancements and Recovery Techniques. IEEE Communications Magazine, Julio 2001

BENITO, David. Jornadas Red-Iris: Redes ópticas. Universidad de Navarra. Pamplona, España. 2001.

Deployment and Design Issues of IP Over Optical Networks. Presentación Cisco Systems.

OSORIO Juan Felipe, SANCHEZ, Friman, OROZCO, Gustavo Adolfo. Fibra óptica. Laboratorio de sistemas de comunicación. Universidad de Antioquia. Medellín.

Mediciones en fibras ópticas. Universidad Nacional de Quilmas.

CABALLERO ARTIGAS, José M. Acceso y Transporte a alta velocidad: Tendencias y estrategias. Presentación ICT Electronics.

BONENFANT, Paul;, RODRIGUEZ-MORAL, Antonio; MANCHESTER, James. "IP OVER WDM": The missing link. White paper - Optical networking group. Lucent Technologies.

LOBO POYO, Jesús Felipe; WARZANSKYJ GARCÍA, Wsewolod. Redes de transmisión todo ópticas: independencia frente a las redes de transporte. Telefónica Investigación y Desarrollo. 2001.

ABAD, Silvia; LÓPEZ-AMO, Manuel. Redes ópticas transparentes. Características y futuro. Universidad Pública de Navarra.

Optical Communications Group – FIAT LUX. Tema 1: Introducción a las redes ópticas. 2002.

Optical Communications Group – FIAT LUX. Tema 3: Dispositivos y componentes avanzados para redes ópticas. 2002.

Optical Communications Group – FIAT LUX. Tema 5: Control y gestión de redes ópticas. 2002.

Optical Communications Group – FIAT LUX. Tema 6: Protección en redes ópticas. 2002.

Fibra TrueWave RS. Fibra Optica con Dispersión Cromática No Cero NZDF. Descripción del producto. OFS.

OJEDA, Luis Gerardo. Fibra Óptica. Universidad de las Américas – Puebla.

FIBRA ÓPTICA - Multiplexación densa en longitud de onda (DWDM). FERNÁNDEZ ROJO, Roberto. Conectronica. Madrid, España.

HERNÁNDEZ GARIBAY, Juan Roberto. Fundamentos de Transmisión de Datos con Fibra Óptica. Presentación de clase. 2003.

MONTAÑANA, Rogelio. Redes Ópticas. Presentación Máster de Telemática. Universidad de Valencia. 2002.

SAHA, Debanjan. Converging Optical and IP: Can GMPLS Take Control? Communication SYSTEMS design. 2002.

Introduction to DWDM for Metropolitan Networks. Tutorial de Cisco Systems.

SALAVERT, Antonio. Introducción al DWDM (Dense Introducción al DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Traducción del documento de Cisco "Introduction to DWDM for Metropolitan Networks".

CHOKESATEAN, Parasak; YAEMNOI, Titintorn; SUKCHAROENKANA, Wonganan; ZHANG, Yun. Will GMPLS replace ATM and SONET/SDH in the next few years?

BELDA, Angela. Arquitectura GMPLS, Generalized Multiprotocol Label Switching. 2002.

Draft-ietf-mpls-generalized-signaling-07.txt, Generalized MPLS - Signaling Functional Description

Draft-ietf-mpls-generalized-rsvp-te-06.txt, Generalized MPLS Signaling - RSVP-TE Extensions

Draft-ietf-mpls-generalized-cr-ldp-05.txt, Generalized MPLS Signaling - CR-LDP Extensions

Draft-ietf-mpls-lmp-02.txt, Link Management Protocol (LMP)

Draft-ietf-ccamp-lmp-wdm-00.txt, LMP for WDM Optical Line Systems (LMP-WDM)

Draft-ietf-ccamp-gmpls-routing-02.txt, Routing Extensions in Support of Generalized MPLS

Draft-ietf-ccamp-ospf-gmpls-extensions-04.txt, OSPF Extensions in Support of Generalized MPLS

Draft-ietf-isis-gmpls-extensions-08.txt, IS-IS Extensions in Support of Generalized MPLS

Draft-ietf-ipo-ason-02.txt. Automatic Switched Optical Network (ASON) Architecture and Its Related .Protocols.

Draft-ietf-ipo-carrier-requirements-03.txt. Carrier Optical Services Requirements.

Draft-ietf-ipo-framework-02.txt. IP over Optical Networks: A Framework.

Draft-ietf-ipo-impairments-02.txt. Impairments And Other Constraints On Optical Layer Routing.

Draft-ietf-ipo-optical-inter-domain-01.txt. Optical Inter Domain Routing Considerations.

User Network Interface (UNI) 1.0 Signaling Specification. Optical Internetworking Forum (OIF). 2000.

The Cisco IP+Optical Unified Control Plane: Accelerating Service Velocity with IP-Enabled Provisioning. White Paper, Cisco Systems.

Enlaces Web:

www.gmpls.org
www.acterna.com
www.juniper.net
www.calient.net
www.tellium.com
www.movaz.com
www.nayna.com
www.networkphotonics.com
www.dataconnection.com
www.princetonoptical.com
www.inaranetworks.com
www.oni.com
www.luxcore.com
www.accelight.com
www.ciena.com
www.sycamorenet.com
www.corvis.com
www.lucent.com
www.nortel.com
www.marconi.com
www.cisco.com
www.alcatel.com
www.sorrentonet.com
www.infinera.com
www.iec.org
www.ofsoptics.com
www.oiforum.com/
www.ietf.org

www.iec.org/online/tutorials/
www.aniret.org.mx
www.lucent-optical.com

<http://redesopticas.reuna.cl>
http://mailweb.udlap.mx/~lgojeda/telecom3/fibra_optica/portada.html
<http://basicas.ujat.mx/eventos/sicom2002>
www.csdmag.com
www.calient.net/files/GMPLS.pdf
www.calient.net/files/IEEEGMPLSpublished.pdf
www.labn.net/docs/gmpls.pdf
www.ripe.net/ripe/meetings/archive/ripe-39/presentations/mpls-overview/
www.cir-optical.com/wrn.pdf
www.tellium.com/documents/ip_centric.pdf
www.tellium.com/documents/WDMcon_May_2000.pdf
www.dataconnection.com/mpls/mplsidx.htm#WhitePapers
www.cid.alcatel.com/doctypes/techpaper/7770/index.jhtml
www.polarisnetworks.com/gmpls/
www.nigeriancomputersociety.com/contentimages/Generalized%20Multiprotocol.pdf
www.sorrentonet.com/whitepapers.asp
www.eurescom.de/~pub/seminars/past/2001/Networking
www.eurescom.de/~pub/seminars/past/2001/Networking/09Papadimitriou/sld001.htm
www.labn.net/gmpls-survey/draft-03-preview-b.txt
www.oiforum.com/public/documents/UNIWhitePaper.pdf
www.oiforum.com/public/documents/UNI_1.0.pdf
www.research.att.com/areas/opticalnetworking/papers/JohnS/ofc2001.ZIP
www.oiforum.com/public/documents/Bouffard_UNI.pdf
www.juniper.net/techcenter/techpapers/200001.pdf
www.avici.com/technology/whitepapers/mpls_wp.pdf
www.iec.org/tutorials/mpls/
www.ripe.net/ripe/meetings/archive/ripe-39/presentations/mpls-vpn/
www.nortelnetworks.com/corporate/technology/mpls/collateral/55053.25-04-01.pdf
www.nortelnetworks.com/corporate/technology/mpls/collateral/finalmplsprimer.pdf
www.riverstonenet.com/pdf/MPLS-IIR-Presentation.pdf
www.juniper.net/techcenter/techpapers/
www.altera.com/literature/an/an132.pdf
www.cs.berkeley.edu/~randy/Courses/cs294.s02/MPLS.ppt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-gmpls-architecture-03.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-generalized-signaling-09.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-lsp-hierarchy-08.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-generalized-rsvp-te-09.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-rsvp-unnum-07.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-generalized-cr-ldp-07.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-bundle-04.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-te-mib-08.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-ospf-gmpls-extensions-08.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-srisuresh-ospf-te-03.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-katz-yeung-ospf-traffic-08.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-isis-gmpls-extensions-14.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-imp-test-sonet-sdh-00.txt

www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-lmp-wdm-01.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-lmp-mib-03.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-gmpls-te-mib-00.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-gmpls-sonet-sdh-06.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-gmpls-sonet-sdh-extensions-03.txt
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ccamp-gmpls-g709-01.txt
www.iam.unibe.ch/~rvs/events/speedup/presentations/Dey.pdf
www.tellium.com/documents/aon.pdf
www.cse.msu.edu/~xiaoxipe/papers/thesis/thesis.pdf
www.ee.vt.edu/~ldasilva/6504/The%20Future%20of%20QoS.pdf
www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-isis-gmpls-extensions-14.txt
www.eee.metu.edu.tr/~bilgen/AltanK.htm
www.cis.ohio-state.edu/~jain/cis788-99/dwdm/
www.bell-atl.atd.net/wdmpaper/wdm.html
www.bell-atl.atd.net/s-wpaper/s-w.html
www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/mels/dwdm/dwdm_fns.htm
www.research.att.com/areas/opticalnetworking/papers/JohnS/ofc2001.ZIP
www.krnet.or.kr/Pdf/A1-2.pdf
www.cs.buffalo.edu/~qiao/cse620/onw2000.pdf
www.iec.org/tutorials/acrobat/raman.pdf
www.iec.org/tutorials/acrobat/opt_trans.pdf
www.mplssrc.com/
www.ail.gmu.edu/
www.awduche.com
www.urec.cnrs.fr/hd/
www.labn.net/docs/
www.cse.msu.edu/~xiaoxipe/
www.research.ibm.com/wdm/route/route.html
www.research.att.com/areas/opticalnetworking/IPoverWDMpublications.html
www.ll.mit.edu/aon/index.html
www.bell-labs.com/project/MONET/
www.bell-labs.com/org/physicalsciences/projects/mems/mems1.html
www.people.cornell.edu/pages/mp51/MEMS.htm
http://mems.isi.edu/
www.dbanks.demon.co.uk/ueng/