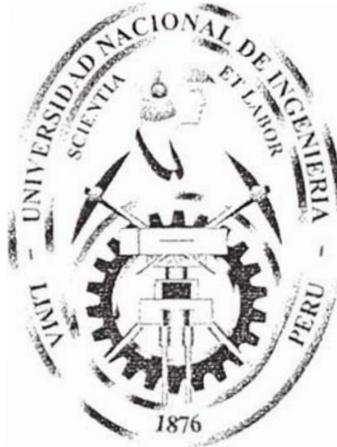


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRÓNICA



REDES TOTALMENTE OPTICAS

TESIS

Para optar el Grado de Maestro en Ciencias
Mención: Telemática

PRESENTADO POR

Jorge Amador Vargas Aquije

LIMA - PERU

2003

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRÓNICA

REDES TOTALMENTE OPTICAS

TESIS

Para optar el Grado de Maestro en Ciencias
Mención: Telemática

PRESENTADO POR

Jorge Amador Vargas Aquije

LIMA - PERU

Extracto

Las redes de comunicaciones modernas están sufriendo un constante incremento de la demanda de tráfico debido a la popularización de distintos servicios tradicionales tales como el acceso telefónico, los servicios de transmisión de datos, etc.; a los que hay que agregar la explosión de nuevas aplicaciones multimedia y de la Internet. Por otro lado, la arquitectura de comunicaciones existente presenta limitaciones, que se hacen más evidentes al incrementarse la demanda. Entre dichas limitaciones, se tienen las esporádicas fallas de componentes del sistema, los retardos, pérdida de la calidad de señal, poca seguridad; lo cual no permite escalar lo suficientemente rápido en respuesta a nuevas demandas. Asimismo, cuando se supera ciertos niveles de velocidad de transmisión se muestran algunos cuellos de botella, especialmente el del procesamiento electrónico en los nodos, entre otros. Todas éstas restricciones, en conjunto amenazan con saturar la capacidad de los futuros sistemas de comunicación.

Una de las alternativas para solucionar este problema se encuentra en la reducción del procesamiento electrónico en las redes al mínimo posible, estructurar sistemas que sean transparentes a la velocidad de transmisión, formato de modulación, protocolos, etc. Con lo cual una red estará capacitada para aprovechar al máximo el ancho de banda de la fibra óptica. La red totalmente óptica podría ser la solución que otorgue a las redes, la transparencia necesaria para soportar las actuales y futuras demandas de ancho de banda.

En este trabajo se revisan los distintos componentes del sistema de comunicaciones óptico, y se proyecta hacia las redes con procesamiento electrónico cero o prácticamente nulo. Es decir, a las redes totalmente ópticas. Se muestran las ventajas de dichas redes, su transparencia respecto a los distintos formatos de datos y modulaciones, asimismo, sus limitaciones. También se analizan sus características, los dispositivos empleados en ellas, la conmutación, técnicas de multiplexación, protocolos, tipos de enrutamiento, arquitecturas, topologías y los esquemas de protección y de restauración de este tipo de redes, lo cual otorga seguridad al sistema ante una eventual falla en cualquiera de sus elementos.

Se hace hincapié especialmente en las distintas topologías de red, la topología lógica o virtual y la física con la idea de minimizar los costos y maximizar la eficiencia de la red. Se trata del mismo modo los distintos tipos de servicios A, B y C que pueden ser proveídos por las redes totalmente ópticas. Para complementar adecuadamente el tratamiento de las redes totalmente ópticas se muestran los principios de operación y mantenimiento haciendo énfasis en la diferencia con el procesamiento y de señalización de control respecto de las redes electrónicas estándares. Asimismo, se presentan las fases del diseño de estas redes, incluyendo consideraciones de enrutamiento y de seguridad del sistema ante eventuales fallas.

Finalmente, se presenta algunos resultados de los distintos prototipos de implementaciones llevadas a cabo tales como Lambdanet, Starnet, Monet, entre otras; y se esboza el futuro de la tecnología de las redes totalmente ópticas, que depende fuertemente de las

investigaciones sobre dispositivos ópticos incluyendo distintos tipos de fibra óptica de performance mejorada, que permitan una alta tasa de transmisión con mínima distorsión.

El autor presenta en el Apéndice C como aporte un sistema experto desarrollado en EXSYS profesional que asesora en como elegir un tipo de red óptica apropiada. Asimismo se incluye conocimientos y resultados muy útiles en una serie de apéndices que complementan lo tratado en la Tesis. Por ejemplo, en el Apéndice A se presenta una revisión de los dispositivos empleados en los sistemas ópticos, en el Apéndice B se trata con detalle las técnicas de multiplexación WDM, OTDM y OCDM. Por otro lado, en el Apéndice C, adicionalmente a lo ya comentado se presenta un esbozo de un análisis de costos para sistemas WDM. Se incluye también ejemplos de enrutamiento de aplicación a las redes totalmente ópticas, y se ilustra el uso de un sistema experto para la selección de un tipo de red basado en sistemas prototipo de redes ópticas. Además, se anexa un glosario de términos importantes, los acrónimos empleados en este trabajo y las referencias bibliográficas.

Índice

	Página
Agradecimientos	ii
Abstract	iii
Extracto	vi
Índice	ix
Índice de figuras	xiv
Lista de tablas	xvi
Capítulo 1	
Introducción	1
1.1 Formulación del problema	3
1.2 Objetivos de la presente tesis	5
1.3 Organización de la tesis	6
Capítulo 2	
Redes totalmente ópticas	8
2.1 Clasificación de las redes ópticas	11
2.2 Modos de transferencia de datos	13
2.3 Topologías física y lógica (virtual)	14
2.3.1 Topología física	14
2.3.2 Topología lógica o virtual	15
2.3.3 Consideraciones de diseño de la topología lógica	16
2.4 Topologías para redes MAN o WAN	18
2.4.1 Redes de difusión y selección	18
2.4.2 Redes multiplexadas de inserción-supresión (OADM)	19
2.4.3 Redes nodales	20

2.4.3.1	Redes encaminadas por longitud de onda	21
2.4.3.2	Redes conmutadas por longitud de onda	21
2.4.3.3	Redes OTDM	22
2.4.3.4	Redes de conmutación de paquetes ópticos	22
2.5	Topologías para LANs	22
2.5.1	Topología de red	22
2.6	Tipos de topologías para redes ópticas	25
2.6.1	Topología de salto único y de salto múltiple... ..	26
2.6.2	Topologías regulares para redes ópticas de salto múltiple	28
2.6.2.1	ShuffleNet	29
2.6.2.2	Gráfico de Bruijn	32
2.6.2.3	GEMNet	35
2.6.2.4	Gráfico de Kautz	37
2.6.2.5	Hipercúbica	39
2.6.3	Comparación de algunas topologías lógicas regulares	39
2.7	La conmutación	41
2.8	Tipos de arquitecturas ópticas	43
2.8.1	Redes lineales de luz (LLN)	43
2.8.2	Arquitectura Lightnet	46
2.9	La arquitectura jerárquica AON	49
2.9.1	Principios de la arquitectura	49
2.9.2	Niveles de la arquitectura AON	50
2.9.3	Servicios AON	53

Capítulo 3

Elementos del diseño de redes totalmente ópticas	58	
3.1	Requerimientos generales de diseño para redes OTDM.	58
3.2	Requerimientos generales para el diseño de redes WDM	59

3.2.1	Número de canales	60
3.2.2	Consideraciones de potencia	61
3.2.3	Consideraciones de diafonía	62
3.3	Tipos de demanda de tráfico	63
3.3.1	La demanda de tráfico estática	63
3.3.2	La demanda de tráfico dinámica	65
3.4	Fases del diseño de una red de transporte...	65
3.5	Enrutamiento por longitud de onda	69
3.5.1	El problema de enrutamiento y de asignación por longitud de onda	71
3.6	El problema del árbol de mínima expansión	73
3.7	Conectividad	75
3.8	Arquitectura de nodos	77
3.9	Consideraciones adicionales	78
3.9.1	Productividad en redes WDM	79
3.9.2	Estrategias para mejorar la capacidad de transmisión de las redes AON...	80

Capítulo 4

	Protección y restauración de redes AON	83
4.1	Estrategias de protección..	86
4.2	Protección de redes tipo anillo	87
4.2.1	Protección dedicada de anillos	88
4.2.2	Protección compartida de anillos	88
4.3	Protección de redes tipo malla.	89
4.4	Restauración	90
4.4.1	Restauración de enlace ó de ruta	90
4.4.2	Restauración en tiempo real ó precalculada	92
4.4.3	Restauración distribuida ó centralizada	93
4.5	Comparación entre esquemas de restauración..	94

Capítulo 5	
Operación, administración y mantenimiento de redes AON	97
5.1 Operación de la red..	98
5.2 Arquitectura de capas para la operación, administración y mantenimiento de la red	99
5.3 Métodos de transferencia de señal...	102
Capítulo 6	
Limitaciones de una red totalmente óptica	104
6.1 Límites de capacidad	104
6.2 Límites físicos impuestos por dispositivos	106
6.3 Límites impuestos por las no linealidades	107
6.4 Limitaciones físicas de topologías	108
Capítulo 7	
Ensayos en Redes ópticas	110
7.1 Sistemas en redes LANs y MANs	110
7.2 Pruebas en WANs	112
7.3 Sistemas de transmisión de alta capacidad	114
Capítulo 8	
Futuro de las redes totalmente ópticas	120
Capítulo 9	
Conclusiones	125
9.1 Introducción	125
9.2 Conclusiones	125
Apéndice A	
Dispositivos usados en comunicaciones ópticas	129
A.1 La fibra óptica	130
A.2 Acopladores	139

A.3	Fuentes ópticas	139
A.4	Detectores ópticos	143
A.5	Rejillas y filtros	144
A.6	Amplificadores ópticos	151
A.7	Moduladores y conmutadores	157
A.8	Convertidores de longitud de onda	161
 Apéndice B		
	Técnicas de multiplexación	164
B.1	WDM	165
B.2	OTDM	168
B.3	Comparación entre WDM y OTDM	171
B.4	OCDM	173
 Apéndice C		
	Algunos temas de interés	177
C.1	Empleos de sistemas expertos para la elección de un tipo de prototipo de red	177
C.2	Encaminamiento de trayectoria mínima	191
C.3	Costos en el sistema WDM	199
 Apéndice D		
	Glosario de términos más importantes	202
 Apéndice E		
	Acrónimos	206
	Referencias	209

Índice de figuras

Figura	Título	Pag.
1.1	Crecimiento del tráfico de voz y datos	3
2.1	Ilustración de topologías lógica y física de una red	15
2.2	Red OADM	19
2.3	Topología estrella	23
2.4	Topología Anillo	24
2.5	Topología de una red óptica de difusión y selección	26
2.6	Red con enrutadores de longitud de onda	27
2.7	ShuffleNet ($p = 2, k = 2$)	30
2.8	Gráfico de Bruijn	33
2.9	GEMNet ($K=2, M = 2, p = 2$)	36
2.10	Gráfico Kautz	37
2.11	Concurrencia en la fibra	44
2.12a	Topología de una red genérica	48
2.12b	Cadena de caracteres correspondiente a la figura 2.12a..	48
2.13	Nodo hipercúbico	48
2.14	Red totalmente óptica (AON)	51
2.15	Servicio tipo B	55
2.16	El Servicio C y el control de la red	57
3.1	Gráfico de Petersen	64
3.2	Diagrama de bloques del proceso de planeamiento de la red	66
3.3	Red encaminada por longitud de onda	70
3.4	La dispersión PMD	81
4.1	Modelo de Topología sin adecuada protección...	84
4.2	Modelo de Topología con protección	85

4.3	Restauración de rutas	91
5.1	Estructura de capas para la OA&M de la red óptica	100
5.2	Terminación y retransferencia a NE	102
6.1	Topologías a) FUB y b) DUB	109
8.1	Tipos de fibras de transmisión	121
8.2	Ventanas de transmisión incluyendo las ventanas experimentales (4ta y 5ta)	122
A1	Sistema WAN WDM de primera generación	130
A2	Ventanas de Transmisión	132
A3	Comparación entre la respuesta lineal y la no lineal	134
A4	Efectos no lineales en la fibra óptica	136
A5	Una Estrella pasiva 4 x 4	139
A6	Enrutador pasivo 4 x 4 basado en WGR	148
A7	Tipos de amplificadores ópticos	156
A8	Conmutador básico 2 x 2	158
A9	Un conmutador activo 4 x 4 basado en WRS	160
A10	Conversión de longitud de onda	162
A11	Simbología de dispositivos usados en un sistema de comunicación óptico	163
B1	Principio de multiplexación WDM	165
B2	Forma simple de WDM	166
B3	Empleo de DWDM	167
B4	Comparación de esquemas TDM vs OTDM	169
B5	Empleo de OTDM en redes LAN y MAN	170
B6	Limitaciones de TDM	171
C1	Ejemplo de red	191
C2	Algoritmo de Dijkstra aplicado a la red de la figura C1	193
C3	Ejemplo de una red transcontinental	195
C4	Solución al problema de la trayectoria mínima de la figura C3	198

Lista de Tablas

No.	Título	Pag.
1	Propiedades de algunas redes regulares de salto múltiple	40
2	Tabla de control de capacidad de enlace (D-E)	92
3	Comparación entre esquemas para restauración de redes	94
4	Parámetros de detección y monitoreo	101
5	Comparación de tipos OA&M de redes de transporte ópticas	102
6	Comparación de métodos de transferencia de señal SV	103
7	Sistemas desarrollados con tecnología óptica	117
8	Generaciones de tecnologías ópticas terrestres	122
A1	Performance de la fibra óptica	131
A2	Características de transmisores ópticos sintonizables	143
A3	Características de los filtros ópticos sintonizables	150
B1	Comparación entre tipos de OCDM	173
C1	Algoritmo de Dijkstra aplicado a la red de la figura C1	193
C2	Presunción de costos para análisis económico	201

Capítulo 1

Introducción

El presente trabajo analiza las ventajas, viabilidad y limitaciones de las redes de comunicación totalmente ópticas. Una red totalmente óptica es aquella red en la que se establecen rutas totalmente ópticas y no hay regeneración electrónica de señal desde un extremo a otro de la misma. En cada una de estas rutas se podría tener amplificación óptica e incluso podría modificarse su longitud de onda de trabajo, pero manteniendo la condición de ser una ruta totalmente óptica.

Una de las ventajas más importantes de este tipo de red es que puede resultar significativamente menos costosa de instalar y operar que una red con dispositivos electrónicos debido a la ausencia de regeneración electrónica. Aunque estas redes parten de conceptos muy básicos, envuelven soluciones a problemas reales relativos a la construcción de redes robustas y de gran escala, y no presentan los problemas relacionados con el crecimiento de las redes [1].

Las redes del futuro deben caracterizarse por suministrar una velocidad de transmisión muy alta, bajo nivel de errores y un retardo mínimo, de modo que puedan satisfacer los servicios multimedia interactivos y las aplicaciones tecnológicas emergentes. Las redes totalmente ópticas constituyen una alternativa muy interesante para las redes de comunicaciones del futuro.

La transmisión por fibra óptica se ha convertido rápidamente en el medio estándar de transmisión para redes, y tiene todas las condiciones necesarias para soportar las redes de comunicaciones actuales y futuras. No obstante, la velocidad de transmisión de datos en las redes comerciales esta limitada por la necesidad de convertir las señales ópticas en la fibra a señales electrónicas

para su procesamiento en los nodos de la red. En principio, las técnicas electrónicas de procesamiento paralelo son capaces de cumplir los requerimientos de alta velocidad de transmisión pero la conversión electro-óptica limita la velocidad y es muy costosa.

Por otro lado, en la investigación para encontrar redes que soporten las demandas futuras de ancho de banda, se encuentra que considerable cantidad de trabajos sobre redes ópticas se ha dedicado a las redes de difusión. No obstante, la arquitectura de difusión no es muy adecuada para redes grandes debido a limitaciones de potencia y de ancho de banda. En una red de difusión, el ancho de banda de toda la red es el mismo que el ancho de banda de una fibra y por ello, la escalabilidad de tal red esta inherentemente limitada. Asimismo, la potencia de la señal transmitida esta dividida entre cada uno de los nodos receptores, incluso si solamente uno de tales nodos es el receptor deseado. De modo que si la red posee un gran número de nodos, solo una fracción muy pequeña de la potencia del transmisor llegará a su destino. Por ello es deseable emplear redes alternativas, como por ejemplo una red jerárquica, en las cuales la transmisión se produzca sin el dispendio de potencia realizado en la red de difusión.

La fibra óptica como medio de transmisión, posee dos propiedades claves, sus bajas pérdidas por atenuación y su gran ancho de banda. Existen principalmente tres tecnologías para utilizar el ancho de banda de la fibra (ver Apéndice B): La técnica de multiplexación óptica por división de código (OCDM), la técnica de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) y la técnica de multiplexación óptica por división de tiempo (OTDM). La primera todavía presenta muchas dificultades en su realización práctica. Entre las dos últimas, ambas tienen fortalezas y debilidades y no deberían considerarse como mutuamente excluyentes debido a que es posible utilizar una combinación de OTDM y WDM [2]. Una propiedad singular de una red óptica WDM es la facultad de soportar enrutamiento por longitud de onda. El enrutamiento por longitud de onda suministra una ruta óptica transparente entre los terminales de la red.

En la figura 1.1 se muestra el crecimiento relativo del tráfico de voz y datos en la última década, y se proyecta hacia valores estimados en los próximos años. Se puede apreciar que el tráfico de datos tiene un mayor incremento, y se espera que con el uso masivo de Internet, esta tendencia se mantenga.

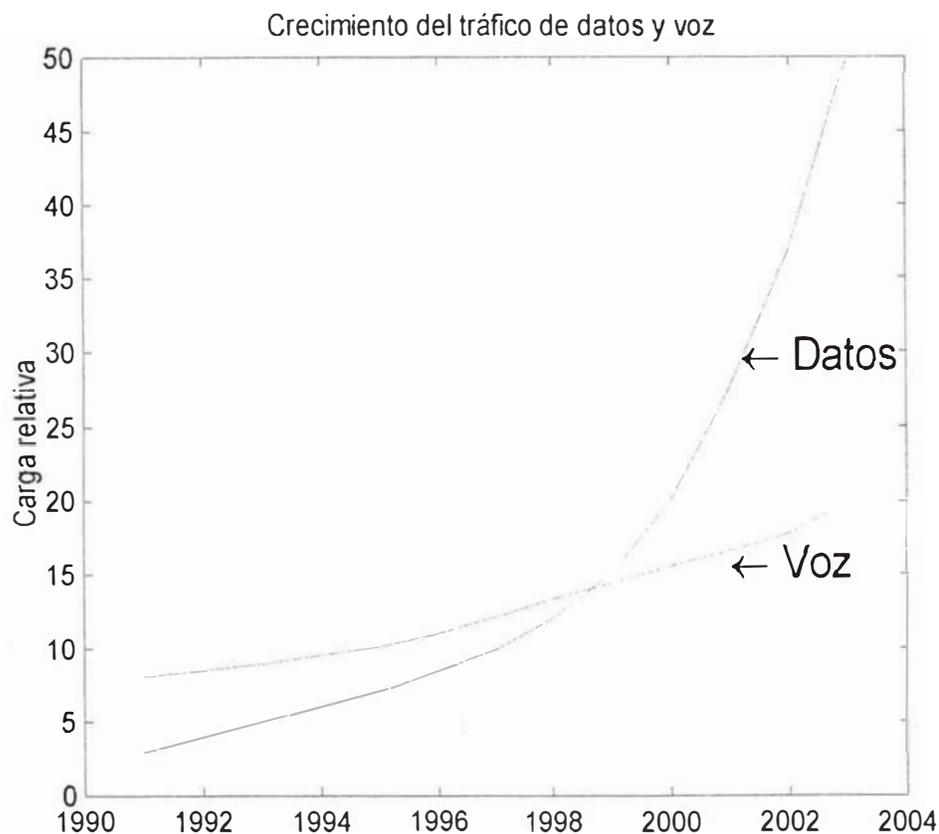


Figura 1.1 Crecimiento del tráfico de voz y datos [3]

1.1 Formulación del Problema

Las redes de computación y de telecomunicaciones han crecido desmesuradamente en los últimos años, y continúan creciendo debido a la popularización de Internet, la Web, el incremento de la velocidad de procesamiento y el enorme ancho de banda demandado por aplicaciones multimedia. Todo lo cual ha conducido a la necesidad de redes de muy alta velocidad.

En la presente década se consolidará la introducción de la televisión de alta definición, video correo y conexión total a Internet vía interfaces gráficas amigables para el usuario. Estos nuevos

servicios crearán una demanda apremiante de aplicaciones de redes con mayor ancho de banda. Las actuales redes de alta velocidad, tales como las redes ATM (Asynchronous Transfer Mode), no serán capaces de satisfacer plenamente las capacidades requeridas para movilizar los volúmenes de datos generados por los nuevos servicios.

La necesidad de incrementar el rendimiento de un sistema de comunicación constituye la mayor motivación para inducir al empleo de medios de cada vez mayor capacidad. La solución a estos requerimientos yace en el campo de las comunicaciones ópticas. Las fibras ópticas son flexibles, durables, eficientes y económicas de manufacturar, y ofrecen el ancho de banda necesario para las redes de comunicaciones presentes y futuras. Y consigue todas estas ventajas con mínimas pérdidas de potencia de transmisión, y a una fracción del costo y del espacio de los sistemas de comunicación convencionales.

Las fibras ópticas poseen teóricamente un ancho de banda del orden de decenas de Terahertz, y continuamente se realizan esfuerzos para tratar de aprovechar al máximo dicha capacidad. Sin embargo, a pesar de la impresionante capacidad de las fibras ópticas, su potencial todavía no ha sido completamente utilizado. Y esto es debido a que los actuales enlaces de comunicaciones ópticas están todavía limitados, tanto en velocidad como en capacidad, por el uso de la tecnología electrónica para la regeneración de la señal, el enrutamiento de paquetes y para el almacenamiento temporal en los nodos intermedios de conmutación.

Para elevar el ancho de banda efectivo de un sistema de comunicaciones, es necesario que esta mejora se vea reflejada en cada uno de los elementos del sistema de comunicación. En efecto, un sistema no puede tener mejor rendimiento que el más ineficiente de sus componentes. Dado que si algún elemento del sistema presenta una capacidad restringida, la capacidad del sistema entero es afectada y se forma en ese elemento ineficiente, el llamado cuello de botella. Este cuello de botella podría hacer que en una red de comunicaciones por fibra óptica solo se llegara a utilizar un mínimo de la capacidad del sistema (10 % o menos).

La fibra óptica como medio de transmisión tiene un vastísimo ancho de banda, parte del cual esta restringido en dicho medio por el ancho de banda de los amplificadores ópticos. Este ya es un

cuello de botella, aunque no demasiado restrictivo (aprox. 5 Tb/s). No obstante, el subsistema conformado por los nodos de conmutación podrían ser el principal cuello de botella del sistema óptico, dado que si requiere efectuar la regeneración y el direccionamiento de las señales, en estos nodos se debe de convertir dichas señales ópticas a eléctricas, y finalmente volver a reconvertir a señal óptica para que las señales continúen el viaje hacia su destino. Este proceso no solo es costoso, sino que también introduce retardos y congestión en las redes.

Nuestro problema de investigación consistirá en la búsqueda de un sistema que limite en lo posible la conversión opto-electrónica. Esto implica el considerar, además de un hardware, el uso de arquitecturas y protocolos adecuados con el objetivo de aprovechar al máximo el ancho de banda disponible de la fibra óptica.

1.2 Objetivos de la presente tesis

En la mayoría de redes existentes, las fibras ópticas han sido utilizadas en enlaces punto a punto para reemplazar al cable convencional (Ej. troncales telefónicas, interfases de distribución de datos, etc.) o en estructuras multipunto fijas (ej. topologías estrella pasiva o buses). Sin embargo, ninguno de estos tipos de configuraciones explota completamente el potencial de la fibra óptica. Por lo tanto, es necesario considerar un tipo de red adecuado que integrando diferentes tecnologías y servicios soporte un gran ancho de banda con calidad de servicio.

Teniendo en cuenta que una red de transporte es una red grande y compleja que integra diferentes sistemas, se necesita un modelo de red, con entidades funcionales para su control y administración. Una red totalmente óptica puede ser la solución para superar las restricciones impuestas por la baja performance de los dispositivos electrónicos en las redes de comunicación actuales. Las redes de comunicación totalmente ópticas (AON's, All Optical Networks) son redes que permiten a las señales permanecer en el formato óptico, desde que son emitidas hasta que llegan a su destino [4]. Estas redes pueden lograr cambios radicales en las redes de transporte mediante el mejoramiento de la infraestructura de la red, a través de la introducción de transmisiones basadas en las técnicas de multiplexación como WDM y OTDM, y esquemas de

enrutamiento totalmente ópticos, que harán más eficiente la utilización de las comunicaciones ópticas. La disponibilidad de estas tecnologías ópticas promisorias permitirá la migración desde las redes actuales, especialmente cuando sean compatibles en costo.

Compendiando lo anotado anteriormente, en el presente trabajo se tiene los siguientes objetivos:

- 1) Presentar a las redes totalmente ópticas como una alternativa de solución al problema del crecimiento de la demanda de ancho de banda de las comunicaciones debido a las deseables características que pueden ser obtenidas por ellas:
 - a. La posibilidad de soportar tasas binarias de centenares de Gbps por fibra.
 - b. La flexibilidad para permitir realizar modificaciones en respuesta a cambios en patrones de demanda de tráfico.
 - c. Alta calidad de servicio.
 - d. Capacidad de mejoramiento progresivo en términos de arquitectura, performance, tecnología, estándares, administración, etc.
 - e. Señalización adaptada y capacidad de monitoreo de la performance.
 - f. Eficiente administración de la red, compatible con la administración de redes emergentes, permitiendo una sencilla interfase con otros operadores de redes.
- 2) Mostrar que las redes totalmente ópticas pueden ser tan eficientes como seguras debido a las consideraciones de protección de rutas, que permiten mantener el flujo del tráfico de datos entre fuente y destino. Lo cual es necesario especialmente para clientes de redes de alta velocidad, en términos de alta confiabilidad y rápida restauración en caso de falla de alguna parte del sistema.

1.3 Organización de la tesis

En el capítulo 2 se presentan las características de una red totalmente óptica, las topologías y arquitecturas de dichas redes. En el capítulo 3 se dan las pautas para el diseño de estas redes. En el capítulo 4 se muestran algunos métodos de protección y restauración de las redes totalmente ópticas. En el capítulo 5 se trata de los procedimientos de operación y mantenimiento; en el capítulo 6 se aborda las limitaciones de este tipo de redes. El capítulo 7 hace un compendio de algunos experimentos en redes ópticas y en el capítulo 8 se da un esbozo de las proyecciones de éstas redes. Finalmente en el capítulo 9 se muestran las conclusiones al presente trabajo.

En el Apéndice C1 el autor incluye como aporte una aplicación de un **Sistema Experto** para una red totalmente óptica, que permite elegir una configuración adecuada para una red óptica dados ciertos requerimientos de la misma. Para la elección de la red adecuada se toma como punto de referencia los principios tratados en este trabajo y los resultados de los ensayos efectuados en este tipo de redes. Se proporciona el programa que es ejecutado en Exsys.

Como el objetivo principal del trabajo esta orientado a redes ópticas, para facilitar su lectura se han incluido diversos Apéndices donde se dan algunos principios básicos relacionados con los dispositivos ópticos y los sistemas de comunicación por fibra óptica.

En el Apéndice A se da una revisión de los elementos y dispositivos empleados en las comunicaciones ópticas. Asimismo, en el Apéndice B se trata las principales técnicas de multiplexación propuestas para las redes totalmente ópticas. En el Apéndice C, se incluye en C1 la aplicación del Sistema Experto antes mencionada, y se presenta en C2 un modelo simple de encaminamiento para ilustrar un procedimiento para encontrar la red que satisface el requerimiento de menor distancia para enlazar un conjunto de nodos, desarrollado bajo Lingo. Del mismo modo en C3 se esboza un análisis para el costo de una implementación en WDM. Un Glosario de términos se muestra en el Apéndice D, y finalmente una guía de Acrónimos se da en el Apéndice E.

Capítulo 2

Redes totalmente ópticas

La motivación para pensar que las redes ópticas pueden solucionar los problemas de ancho de banda para la satisfacción de la demanda creciente de los usuarios esta basada en las siguientes capacidades potenciales de dicho tipo de redes:

a) Mayor ancho de banda por usuario

La tecnología de redes totalmente ópticas ofrece la oportunidad de emplear la enorme capacidad de las comunicaciones ópticas tanto para usuarios de redes locales (LAN), metropolitanas (MAN), como para redes de área ancha (WAN). Estas redes ópticas podrán administrar las comunicaciones de una gran cantidad de usuarios, con capacidad de ofrecer servicios en el orden de los Gbps. Esta nueva tecnología ofrece soluciones nuevas a los distintos problemas de las redes. Por ejemplo, asignar una parte del ancho de banda de la fibra para simplificar parte del software y hardware de la red, e incrementar la modularidad, escalabilidad y flexibilidad de la red.

b) Transparencia de protocolo en una ruta óptica

La transparencia de protocolo se refiere a la capacidad de suministrar los diversos servicios de la red sin necesidad de utilizar ningún almacenamiento ni lógica intermedia en ella. Dicha transparencia se logra cuando la ruta óptica ofrece gran flexibilidad ante los requerimientos de los usuarios finales. Por ejemplo, normalmente, los canales analógicos son solo transparentes cuando no utilizan ningún formato de modulación. Sin embargo, cuando se utiliza algún tipo de modulación, como la modulación de amplitud, generalmente este mismo canal ya no es

transparente a otros tipos de modulación (ej., modulación de fase) [5]. Hay dos razones principales por las cuales los canales no son transparentes a ciertos tipos de modulación. Primero, la performance de la fibra usualmente se degrada con la distancia, con el número de señales utilizadas en la misma, y las no linealidades de los amplificadores ópticos y de la fibra misma. Además, cierta clase de modulaciones empleadas en comunicaciones electrónicas no son soportadas en sistemas ópticos debido a la características de transmisión de la luz.

La segunda razón para que un canal no sea transparente a un determinado tipo de modulación, es debido a que algunos elementos empleados en la red no soportan dicha modulación. En efecto, algunos dispositivos manejan sólo información de amplitud, mientras que pierden la información de fase, y por lo tanto, sólo se transmite la información de amplitud.

Una ilustración práctica del concepto de transparencia es un pedazo muy corto de fibra óptica, el cual es el sistema óptico más transparente imaginable; tiene pérdidas de atenuación cero, pérdidas de dispersión cero, no tiene limitaciones de potencia, ni restricciones en el formato de modulación, y no introduce ruido adicional a la señal. No obstante, al incrementarse la longitud de la fibra uno ya encuentra pérdidas que disminuyen la relación señal a ruido en el detector, y dicha pérdida esta en función directa de la tasa binaria de una señal digital y del formato de modulación. De esta manera, después de recorrerse cierta distancia crítica, algunas tasas binarias no serían detectadas en tanto que otras sí, y por lo tanto, la estricta transparencia se habrá perdido. Lo mismo puede decirse de los efectos de la dispersión respecto a las señales de alta velocidad.

Finalmente, si para alcanzar eficiencia en un sistema es necesario especificar las longitudes de onda de dicho sistema, la transparencia se pierde otra vez. Además, cuando hablamos de una red óptica transparente, uno no sólo debe tomar en cuenta las limitaciones del medio físico sino también las limitaciones de los diferentes elementos adicionales que integran la red. Aunque la transparencia es deseable, esta impone ciertos costos. Obviamente, siempre existe un compromiso entre el nivel de transparencia adecuado y los costos que uno esta dispuesto a asumir.

c) Alta confiabilidad

Dado que la información que viaja a través de las redes ópticas lo hace en forma de fotones, dicha información no interactúa con el medio de transmisión como si lo hace su contraparte electrónica. Por este motivo, los efectos de la diafonía eléctrica y del ruido impulsivo son bastante reducidos, lo cual da como resultado una tasa de error mínima en el sistema óptico. Además, debido a que la red óptica está compuesta mayoritariamente de elementos pasivos, esto determina una estructura de gran simplicidad, lo cual redundará en una gran confiabilidad del sistema.

d) Operación y control simplificado

En la evolución de las redes de telecomunicaciones, se han dado pasos muy importantes. El primero fue el avance desde la red de transporte digital plesiócrona (PDH, Plesyocronous Digital Hierarchy) a la red digital síncrona (SDH, Synchronous Digital Hierarchy), basada en una interfase de nodo de red única (NNI, Network Node Interface). Seguidamente aparece el sistema SDH/SONET, en el cual se utiliza el contenedor virtual (VC, Virtual Container) que exhibe una estructura jerárquica.

Posteriormente, el sistema ATM comenzó a utilizar el concepto de ruta virtual (VP, Virtual Path) para servicios B-ISDN (Broadband Integrated Services Digital Networks). La estrategia VP basada en celdas ATM permite la realización no jerárquica de una función de enrutamiento para introducir nuevos servicios en la red. Actualmente, las redes de transporte basadas en WDM y la tecnología de enrutamiento óptico están siendo profusamente investigadas, porque ellas prometen un incremento significativo de las capacidades de transporte y de procesamiento en las redes ópticas.

En una red óptica, el procesamiento óptico de señales debe realizarse en los nodos y en los amplificadores ópticos, y para ello es necesario manejar la señalización WDM para la administración, operación y mantenimiento de la red. Las funciones OA&M (Operating, Administration and Maintenance, Operación, Administración y Mantenimiento) soportan señales

digitales, que tienen ciertas restricciones debido a que las señales WDM no son digitalmente decodificadas en los nodos ópticos y amplificadores. De este modo, la OA&M de la red óptica debe ser cuidadosamente diseñada para armonizar e integrar las técnicas de procesamiento de señales analógicas y digitales [6].

La mayoría de los elementos de la red óptica son pasivos y por lo tanto no necesitan monitoreo en absoluto, y de esta manera el proceso de control de esta red es menos complejo con respecto al control de una red estándar. No obstante, se presentan algunos problemas en el uso de redes transparentes. El primero, es que normalmente la información digital acerca de la red generalmente no está disponible, y esto dificulta el control. El segundo problema es que, para los actuales sistemas de transporte tales como SONET y SDH, se tienen mecanismos internos bien definidos para proporcionar el monitoreo de performance del sistema. Por lo tanto, todo lo realizado en la capa óptica debe trabajar simultáneamente con la capa de transporte. Si hubiere una falla, y si tanto la capa SONET como la capa óptica la reconocen, significa que deben de realizar una respuesta coordinada. Este es un tema actual de investigación e incluye el modo de como transportar la información de control de la red.

2.1 Clasificación de las redes ópticas

En general, el concepto de redes implica fundamentalmente la distribución adecuada de recursos en un sistema. Las redes pueden ser de diferentes clases, por lo que la manera en que se diseña y construye una red en particular depende en gran medida del trabajo que va a realizar y del ambiente en que vaya a operar la misma. Específicamente en el caso de las redes totalmente ópticas existe una variada gama de ambientes diversos que implican el desarrollo de distintos tipos de diseño. En función a esto es posible clasificar las redes ópticas de la siguiente manera:

1) Para comunicaciones locales

Esta es la interconexión de computadoras y dispositivos de computadoras que están muy próximos unas de otros. Esto también incluye la interconexión interna de la computadora misma.

2) Redes de área local (LAN) y de área metropolitana (MAN)

Las redes de área local, más conocidas como LAN (Local Area Network), tienen por lo general tres características particulares:

- a) Un campo de acción cuyo tamaño no es mayor que unos cuantos kilómetros.
- b) Una velocidad total de datos, de cuando menos varios cientos de Mbps.
- c) La pertenencia a una sola organización.

Las redes de área metropolitana, o MAN (Metropolitan Area Network) son básicamente una versión ampliada de una red LAN y normalmente se basa en una tecnología similar. Puede abarcar un conjunto de oficinas corporativas cercanas o una ciudad y ser pública o privada. Una red de tipo MAN puede llegar a cubrir una ciudad completa, aproximadamente un radio de 15 Km, utilizando una tecnología desarrollada para LAN.

3) Redes de área ancha (WAN)

Una red de área ancha, o WAN (Wide Area Network), se extiende sobre un área geográfica extensa, la cual puede abarcar a veces un país o un continente; contiene un grupo de máquinas dedicadas a ejecutar programas de usuario. Estas máquinas son conocidas como “hosts” y están conectadas por una subred de comunicación, o simplemente subred. El trabajo de la subred es conducir mensajes de una “host” a otra.

En muchas redes de área ancha, la subred tiene dos elementos distintos: las líneas de transmisión y los elementos de conmutación

4) Sistemas submarinos

En los sistemas de transmisión submarinos se han hecho grandes progresos tanto en capacidad como en arquitectura de red desde que se introdujeron a mediados de los 1980s. Las capacidades han crecido desde 280 Mbps en los primeros sistemas hasta 40 Gbps en los sistemas de cuarta generación que emplean WDM. Las arquitecturas de redes han progresado desde los enlaces punto a punto hasta los anillos completamente redundantes y arquitecturas troncales complejas.

En la primera generación (1988) se empleaba una longitud de onda de $1.3 \mu\text{m}$; la segunda generación (1994) utilizaba una longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$ con el objetivo de reducir las pérdidas ópticas y ya se operaba a 560 Mbps por par de fibra. En la tercera generación (1996) se empezó a utilizar los amplificadores ópticos del tipo EDFA y en la cuarta generación (1998) se desarrolló una capacidad de transmisión de hasta 40 Gbps con anillos redundantes para la protección de la red [7].

5) Redes locales distribuidas

Este es el ambiente “fibra en el hogar”. El objetivo es reemplazar los sistemas de cable para televisión (cable coaxial) y telefonía (par de hilos de cobre) con un sistema capaz de proporcionar un gran ancho de banda como para que soporte estos y otros servicios de alta velocidad, tales como Internet.

2.2 Modos de transferencia de datos

Las redes pueden clasificarse por la manera de transferencia de datos en:

- a) Redes de conmutación de circuitos
- b) Redes de conmutación de paquetes

Una red de conmutación de circuitos provee una conexión transparente entre dos usuarios finales. Puede ser empleada para un flujo de datos digital o analógico. Cualquiera sea la información que se envíe al usuario final esta es transmitida a través de un flujo continuo como si se tratara de canal dedicado. Como ejemplo de tal sistema tenemos la red telefónica.

En las redes de conmutación de paquetes los usuarios finales envían datos a la red en pequeñas unidades llamadas bloques, tramas, celdas o paquetes. Estos paquetes de datos comparten

recursos intermedios con otros dentro de la red, basándose en una demanda o prioridad. Las redes de conmutación de paquetes están clasificadas en:

- Redes orientadas a conexión
- Redes no orientadas a conexión

En una red orientada a conexión, para cada enlace existe una ruta asignada a través de la red. Esta ruta debe ser fijada antes de que tome lugar cada transferencia. La presencia de una conexión no significa que necesariamente los recursos de la red a lo largo de la ruta estén reservados a la misma. Las conexiones se fijan dinámicamente en respuesta a una demanda. Las redes donde las conexiones son fijadas solamente por la administración de la red son llamadas redes de conexión transversal.

En las redes no orientadas a conexión, los nodos de conmutación hacen una decisión donde enviar cada paquete, basado en un direccionamiento localizado en la cabecera de los datos. En cada nodo se hace un procesamiento a cada paquete para determinar la ruta siguiente. Esto implica que el control de flujo y congestión no es sencillo de realizar. Las redes electrónicas, ATM y X.25 son ejemplos de redes orientadas a conexión. Mientras que IP y las redes LAN conmutadas son ejemplos de redes no orientadas a conexión.

2.3 Topologías física y lógica (virtual)

2.3.1 Topología física

La topología física de la red es el conjunto físico de nodos de enrutamiento y los enlaces de fibra óptica conectados sobre ella, que fijan las rutas ópticas entre terminales de nodos.

Una ruta de longitud de onda (Wavelength Path, WP) consiste de un trayecto a través de la red y una longitud de onda sobre él mismo.

Las rutas de longitud de onda se establecen en la configuración de los nodos de enrutamiento de la red.

Dos WP's que participan en un enlace en la red deben usar diferentes longitudes de onda. Una ruta óptica (Light Path) puede incluir algunos WP's con diferentes longitudes de onda.

2.3.2 Topología lógica o virtual

El conjunto de las rutas ópticas y de los nodos atravesados por las mismas, constituye la topología lógica o virtual de la red. Sobre una topología física dada se puede establecer distintas rutas ópticas entre pares de nodos. Dada una topología física, se pueden emplear sobre ella diferentes topologías lógicas. En la figura 2.1 se puede apreciar un ejemplo de topologías virtual y física de una red.

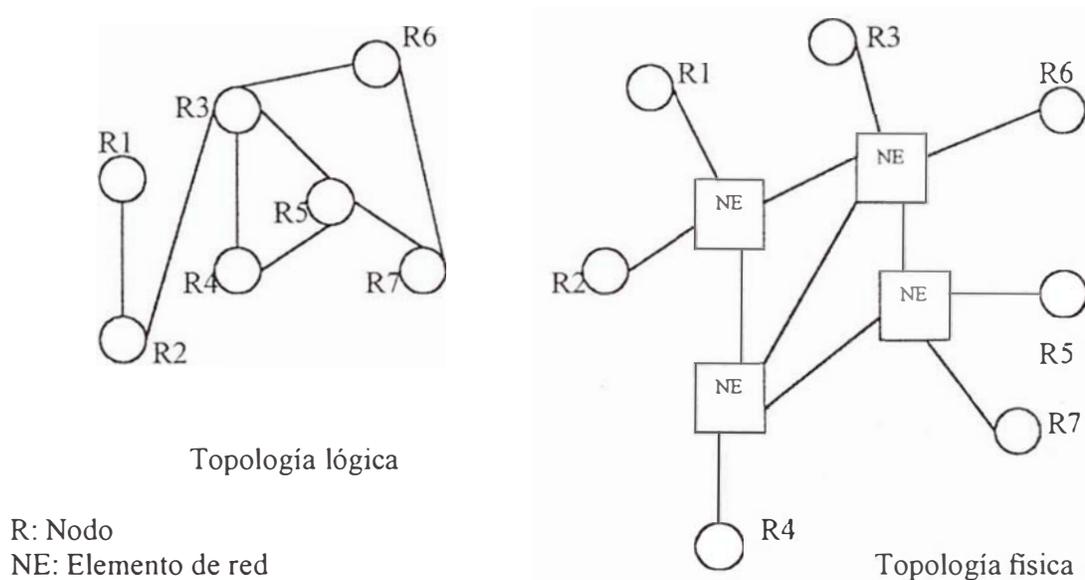


Figura 2.1: Ilustración de topologías lógica y física de una red

El grado físico de un nodo (enrutamiento) es el número de otros nodos (rutas) que están directamente conectados a los enlaces de fibra óptica.

El grado lógico de salida de un nodo terminal es el número de rutas ópticas que se originan desde ese nodo terminal, y el grado lógico de entrada en un nodo terminal es el número de rutas ópticas que terminan en ese nodo.

Si en el proceso de enrutamiento cada nodo estuviera asociado con un único nodo y viceversa, entonces ésta red topológicamente simple con N nodos debería tener un total de $N(N-1)$ pares de rutas. Esto generalmente no es factible por dos razones:

Primero, el número de longitudes de onda disponibles impone un límite a la cantidad de caminos ópticos posibles;

Segundo, cada nodo puede ser la fuente y destino de sólo un número limitado de rutas ópticas Δ_1 . Esto es determinado por la cantidad de hardware óptico y la cantidad total de información que el nodo pueda manejar.

Cuando no es posible establecer rutas ópticas entre todos los pares de nodos, los pares de nodos no directamente conectados deben seguir una secuencia de rutas ópticas a través de nodos intermedios de comunicación. En cada nodo intermedio, los paquetes deben realizar saltos de ruta para llegar a su destino. Adicionalmente a esta limitación, cada nodo puede conmutar sólo una cantidad limitada de información, determinada por el número de puertos que puede conmutar, Δ_2 . Estas limitantes imponen una restricción al máximo grado de la topología lógica. Este debe ser a lo más, $\Delta = \min(\Delta_1, \Delta_2)$.

Debe de observarse que, aun en el caso de que el número de longitudes de onda disponibles fuera muy grande, lo suficiente como para que puedan establecerse todos los $N(N-1)$ posibles pares de caminos ópticos, se tendría que resolver el problema de coordinación de la utilización de las rutas ópticas para evitar colisiones, lo cual no es sencillo realizar en una red WAN-WDM.

2.3.3 Consideraciones en el diseño de la topología lógica

El diseño de una topología lógica a partir de una topología física y un patrón de tráfico dado, tiene el objetivo de minimizar la congestión en la red, a la vez de disminuir los retardos, o bien, reducir la cantidad de procesamiento requerido en los nodos, para lo cual se debe hacer uso de un algoritmo de enrutamiento adecuado para realizar estos objetivos.

Asumiendo que están dados tanto la topología lógica así como la matriz de tráfico se debe de minimizar tanto la congestión en la red como el retardo promedio de los paquetes. El retardo promedio es función de los retardos de cola en los nodos intermedios y los retardos de propagación en los enlaces.

En una red WAN de alta velocidad, el retardo de propagación es el factor dominante frente a los retardos de cola. Por lo que si incrementamos el grado del nodo o el número de longitudes de onda en la red, la congestión y el retardo decrecerán.

En una primera aproximación, el diseño de la topología lógica no toma en cuenta la disponibilidad de longitudes de onda, y posteriormente se afina el diseño con la inclusión de esta premisa.

El problema de la optimización de la topología lógica ha sido ya estudiado para el caso donde la topología física es una estrella de difusión y el número de longitudes de onda no está limitado [8]. Es decir, cuando la única restricción es el grado lógico en los nodos. Para este caso, los trabajos sobre diseño topológico presentan algoritmos heurísticos para minimizar la congestión, o minimizar el retardo promedio de propagación del tráfico. Para solucionar el problema del diseño de la topología lógica se propuso el uso de algoritmos para superponer una topología regular lógica hipercúbica enfocado más a la asignación de longitudes de onda a las rutas ópticas que a la optimización de la performance total de la topología lógica.

Mukhejee [9] propuso un algoritmo heurístico para superponer una topología lógica hipercúbica con el objeto de minimizar el retardo ponderado promedio de propagación y tomar en cuenta restricciones de capacidad en las rutas ópticas valiéndose de la técnica heurística de temple simulado.

Zhang y Acampora [10] proponen un algoritmo heurístico basado en la asignación secuencial de una longitud de onda a todas las rutas posibles con la idea de disminuir el tráfico antes de proceder con la siguiente longitud de onda. El objetivo fue maximizar la cantidad de tráfico acarreado en un salto desde el origen al destino, pero las restricciones de grado y retardo fueron obviadas. No obstante, el problema se vuelve muy difícil de resolver cuando el número de nodos y de longitudes de onda es grande.

Otros trabajos relacionados especifican el problema de direccionamiento o enrutamiento dinámico de las rutas ópticas. En vista de que un sistema con una gran cantidad de nodos se

vuelve complejo de tratar cuando el número de nodos crece, es que todos los investigadores coinciden en proponer soluciones heurísticas antes que en soluciones óptimas.

S. Banejee [11] propone un esquema de implementación por enrutamiento de longitud de onda en redes totalmente ópticas que mejora las propuestas de sus antecesores: En dicho trabajo se presenta métodos analíticos para la estimación de la performance de la red y los dispositivos requeridos en ella.

- **Algoritmos para diseño de topologías lógicas**

Existen algunos algoritmos utilizados en el diseño de topologías lógicas, tales como:

HDLA (algoritmo de diseño de topología heurística), que intenta la distribución de enlaces lógicos entre nodos con la idea de disminuir el tráfico.

MLDA (algoritmo de diseño de topología lógica de mínimo retardo), es un algoritmo de tipo heurístico que es capaz de encaminar todos los paquetes en rutas físicas cortas entre todos los pares de nodos, con un mínimo retardo.

TILDA (algoritmo de diseño de topología lógica independiente del tráfico), TILDA intenta minimizar el número de longitudes de onda requeridas y es una apropiada elección cuando el tráfico es desconocido o es uniforme.

2.4 Topologías para redes MAN o WAN

2.4.1 Redes de selección y difusión

Las redes de difusión y selección son quizás la más elemental forma de redes ópticas. El sistema trabaja asignando una sola frecuencia óptica para transmisión a cada puerto de la red, combinando todas las señales transmitidas en un acoplador estrella óptico, y entonces se envía la señal mezclada a todos los puertos.

Las redes de difusión son económicas porque ellas comparten el medio de transmisión, son modulares hasta cierto límite, y son un tipo de red natural para equipos terminales normalizados, debido a que la señal es común. Son adecuadas para distribuir servicios de difusión. Además, las

unidades de interfase de red pueden acceder a la misma con rendimiento compartido, lo cual puede ser provechoso en servicios a ráfagas. Un ejemplo común es la red de cable de TV (CATV). Otro ejemplo de red de difusión, es la “telefonía sobre redes ópticas pasivas” o TPON. En las redes de difusión y selección para asegurar la privacidad se debe de encriptar la señal. No obstante, este modo de difusión tiene algunas desventajas, en razón a las complicaciones debidas a accesos múltiples, seguridad de la red, y respecto de mediciones de diagnóstico. El punto crítico para la seguridad de la red es que las transmisiones de un usuario no autorizado pueden alterar un nodo entero. Además, la potencia de un transmisor en el modo de difusión debe radiarse a todos los receptores, potencia que es desperdiciada en los receptores que no la usan. También, el número máximo de nodos que la red puede tener esta limitado por el número de longitudes de onda que pueden resolverse. Las redes de difusión y selección pueden ser usadas para construir redes estáticas. Los retardos de propagación impiden que esta clase de topología de red sea adecuada en aplicaciones WAN.

2.4.2 Redes multiplexadas de inserción-supresión (OADM)

La red multiplexada de inserción-supresión (OADM; Optical Add-Dropp Multiplexed Network) es probablemente la más simple estructura de red totalmente óptica. Se emplea en redes WDM. En la figura 2.2 se muestra esquemáticamente este tipo de red.

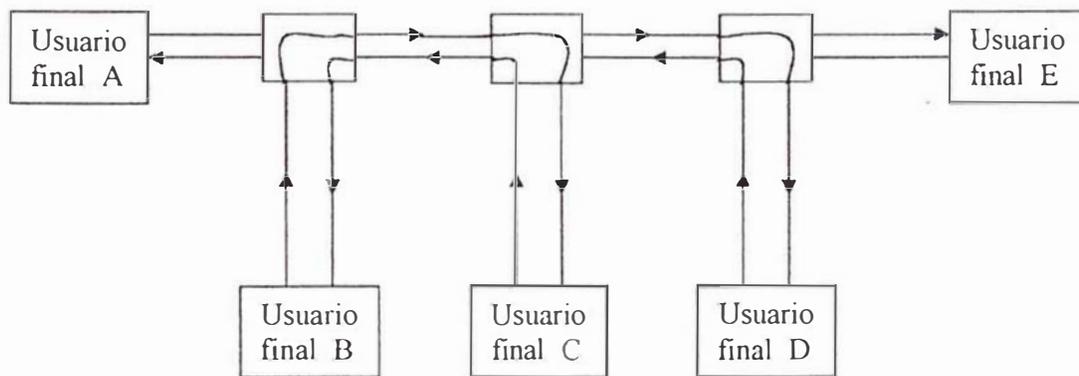


Figura 2.2 Red OADM

Aquí la red atraviesa varios puertos. En cada punto intermedio uno o más canales individuales son removidos (o adicionados) desde el flujo principal y derivados a un dispositivo local utilizando OADMs.

En la figura 2.2:

Existe un enlace óptico WDM entre las localidades A y E; y este enlace consiste de dos fibras (una en cada dirección).

Puede haber varios canales ópticos independientes transitando desde A a E.

Las localidades B y C tienen conexión bidireccional.

En esta ilustración la longitud de onda utilizada entre B y C no es usada por el resto del enlace.

Hay una conexión entre A y D usando una longitud de onda dedicada.

Debido a que las conexiones son completamente independientes respecto a las de otro canal se pueden usar diferentes velocidades, códigos, etc.

En los puntos intermedios los canales individuales pueden ser removidos o añadidos. Notar que esto es direccional, de modo que por ejemplo la longitud de onda usada para el canal desde B a C podría ser reutilizada por un canal desde A hacia B y otro desde C a D o E.

2.4.3 Redes Nodales

En este tipo de red, un grupo de nodos forma el armazón del sistema. Dichos nodos están interconectados entre sí, y algunos tienen conexiones directas a usuarios finales y otros solo están conectados entre sí mismos.

Existe una variedad de tipos de nodos que tienen una misma estructura básica pero que usan principios operacionales completamente diferentes. En general se pueden clasificar en los siguientes tipos: Redes encaminadas por longitud de onda, Redes conmutadas por longitud de onda, redes OTDM y Redes de conmutación de paquetes ópticos.

2.4.3.1 Redes encaminadas por longitud de onda

Una red encaminada por longitud de onda realiza la función de asignación de longitud de onda canalizando la energía transmitida a cada nodo a lo largo de una ruta determinada hasta el receptor, en lugar de difundirla sobre toda la red, como en el caso de la arquitectura de difusión y selección con lo cual evita desperdiciar la potencia de la señal.

El enrutador de longitud de onda (ver Apéndice A) encamina los datos de un puerto a otro a través de rutas totalmente ópticas. Se emplean enrutadores fijos en el caso de redes encaminadas por longitud de onda, y variables para el caso de redes conmutadas por longitud de onda. Aunque los enrutadores fijos no proveen flexibilidad suficiente para los inevitables cambios de patrón de tráfico; no obstante son más sencillos de construir y menos costosos que los variables.

Para la asignación de una ruta óptica entre usuarios finales, se fijan todos los enrutadores a lo largo de la ruta, y desde una central se controla la acción de coordinación del conjunto de controladores. Es posible emplear reutilización de longitud de onda. Esta es una importante consideración. Un diseño práctico de una red encaminada por longitud de onda debe de permitir la reconfiguración de la red desde el sistema de administración de la red.

2.4.3.2 Redes conmutadas por longitud de onda

Un avance respecto al caso de red encaminada por longitud de onda es la red conmutada totalmente por longitud de onda. La diferencia entre ambas redes es que la red conmutada es capaz de establecer dinámicamente nuevas conexiones, en respuesta a la demanda de los usuarios finales. Los principios de conmutación encerrados aquí son triviales desde el punto de vista electrónico, aunque esto presenta grandes dificultades en la conmutación óptica.

No es sencillo modificar la longitud de onda de un canal dentro de la red. En las redes tradicionales (ejm, ATM) el subcanal (en ATM los canales virtuales) se modifican en cada nodo de conmutación. Sin esta función, el problema de asignación de longitudes de onda puede llegar a

ser una gran dificultad en algunos tipos complejos de redes. Esto significa que una red totalmente óptica necesita tener la función de modificación de las longitudes de onda en cada conmutador.

2.4.3.3 Redes OTDM

Las redes OTDM están siendo profusamente investigadas y están muy cerca de ser una realidad comercialmente. En el futuro este concepto será particularmente útil en las redes basadas en solitones. Se espera que este tipo de redes sean el próximo gran paso en el desarrollo de sistemas de muy alta capacidad. Actualmente, ya se está empleando un tipo de red mixta que utiliza la modulación OTDM sobre canales WDM.

2.4.3.4 Redes de conmutación de paquetes ópticos

Las redes completamente ópticas de conmutación de paquetes tienen por característica principal, la conmutación totalmente óptica en los nodos. Este tipo de red son el punto más alto en la cadena hacia las redes totalmente ópticas. Uno de los problemas que debe de solucionarse para hacer viable este tipo de redes son el control de flujo y congestión en tales redes debido a la dificultad del almacenamiento óptico en los nodos para efectuar el procesamiento de las cabeceras.

2.5 Topologías para LANs

2.5.1 Topología de red

El objetivo del diseño de una topología de red es proveer una ruta desde el transmisor de cualquier estación hacia el receptor de cualquier estación. En las redes totalmente ópticas para LANs se pueden definir tres clases de topologías:

- a) Topología estrella
- b) Topología bus
- c) Topología anillo

Estas topologías físicas serán descritas asumiendo un número de nodos de acceso N , y con transmisión unidireccional.

a) Topología estrella. En una topología física estrella, hay solo un nodo de transito en el medio óptico. El grado físico de entrada y el grado físico de salida del nodo de transito estrella, es igual a n ; mientras que para los nodos de acceso son uno.

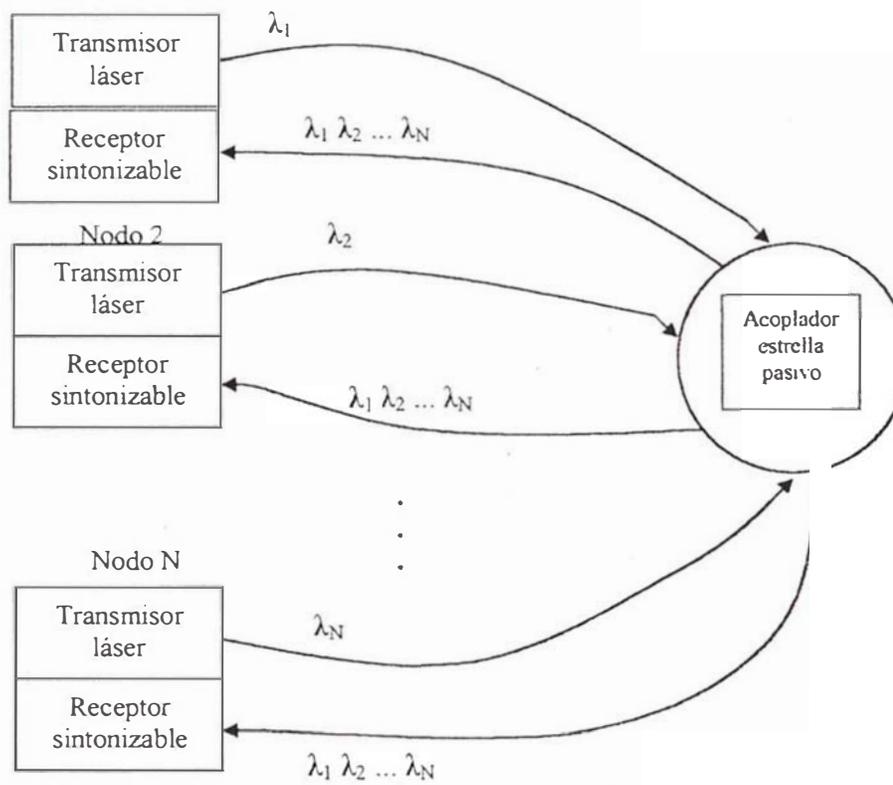


Figura 2.3 Topología estrella

En la figura 2.3, se ilustra una topología estrella. En una red de difusión y selección, la estrella será una estrella de difusión. En el caso de una red encaminada por longitud de onda, la estrella será un dispositivo de enrutamiento por longitud de onda, y un conmutador espacial en caso de una red con enrutamiento espacial.

b) Topología bus. A diferencia de las topología bus tradicional, por ejemplo, Ethernet, una topología física bus totalmente óptica requiere una fibra doble: una en el lado de transmisión y otra en el lado de recepción. En esta topología física hay $2N$ nodos de transito. En transmisión se tiene un grado físico de entrada dos y un grado físico de salida uno: para la recepción es el caso opuesto. Similarmente a la topología estrella, el grado físico de entrada-salida de los nodos de acceso es uno.

En la topología física bus, los nodos de tránsito son dispositivos de inserción/supresión. En una red encaminada por longitud de onda, se usa adición de longitud de onda en el lado de transmisión y supresión en el lado de recepción. En el caso de una red de difusión y selección, los nodos de transito emplean acopladores de potencia. Para lograr que cada nodo reciba igual cantidad de potencia, las razones de acoplamiento de los acopladores depende de la localización de los nodos en el bus. Por lo que la topología bus es inflexible respecto de la adición de nodos de acceso a la red.

c) Topología anillo. En una topología física anillo, los nodo de transito están configurados como se muestra en la figura 2.4. Cada nodo de acceso esta conectado con solo un nodo de transito. El grado físico de entrada-salida de los nodos de acceso es uno. Para cada uno de los n nodos de tránsito, el grado físico de entrada-salida es dos. Como en la topología bus, los nodos de tránsito deben ser dispositivos de inserción/supresión. A diferencia de la topología bus, la topología anillo no puede ser usada para la red de selección y difusión, debido a que la potencia óptica debe de mantenerse circulando en el anillo.

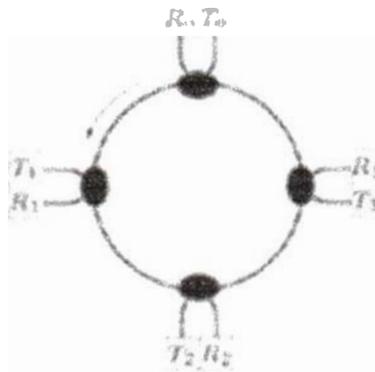


Figura 2.4 Topología Anillo

2.6 Tipos de topología para redes ópticas

Los cuatro tipos de topología más empleados en redes ópticas son: la topología plana, particionada, jerárquica y modular.

En el caso de topología plana todos los nodos tienen al menos dos nodos de interconexión, y algunos nodos que por su condición de tráfico o posición geográfica sean más importantes, tienen tres nodos de interconexión. Esto resulta en una malla grande y compleja.

En la propuesta de topología particionada, los nodos de red están agrupados en racimos, formándose una subred transparente en cada racimo. El tráfico dentro de la misma subred o partición es encaminado solo mediante nodos que pertenecen a la misma partición. La conexión entre particiones es encaminada vía otra partición intermediaria y accesada a través de puertos, por lo que la transparencia de tales conexiones es limitada.

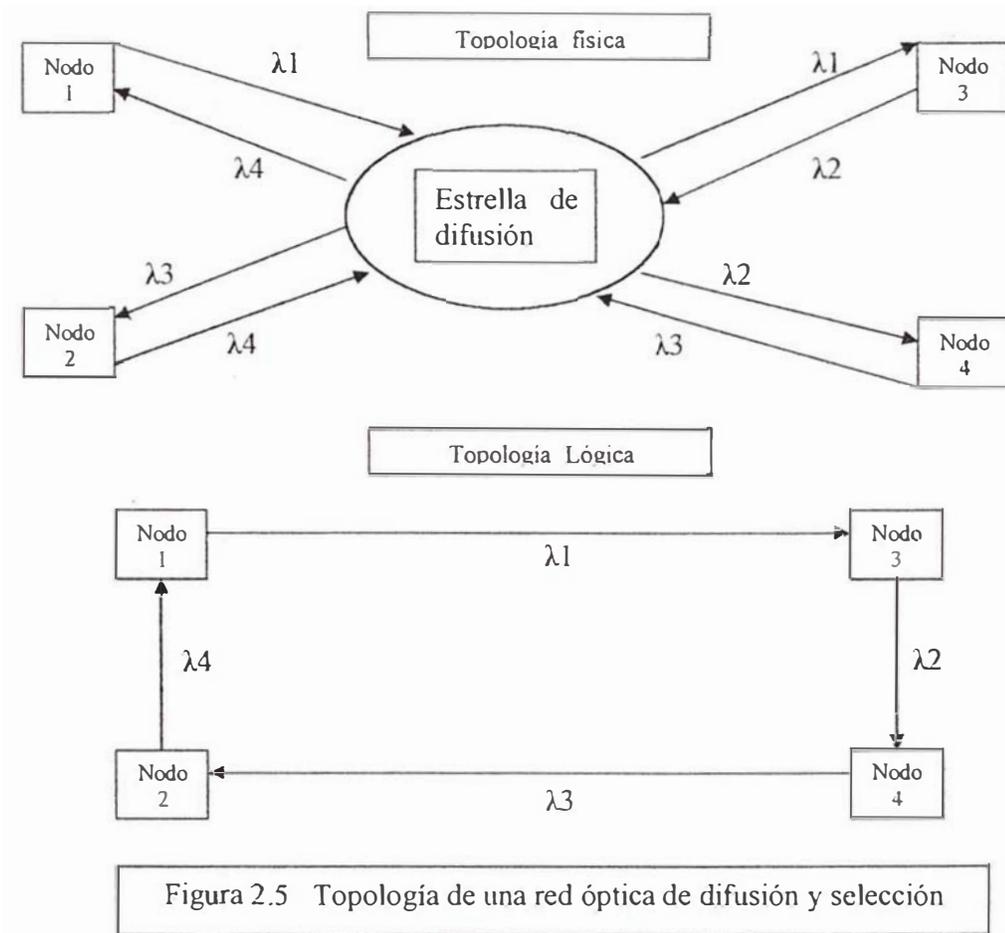
En la propuesta jerárquica, los nodos se agrupan en racimos y cada racimo está asociado con un nivel en una jerarquía, se asume que todos los nodos pertenecen a un grupo en el nivel más bajo. El siguiente nivel se forma seleccionando algunos nodos, y a su vez, agrupándolos en otros racimos. El proceso continúa hasta que se obtenga un sólo racimo en el nivel más alto. El tráfico dentro de la subred es encaminado sólo mediante nodos en esa subred. Este tipo de topología será considerado más a fondo en la arquitectura AON.

La alternativa topológica modular está basada en el concepto simple de que una red de transporte puede ser construida por combinación de subredes definidas, cada cual satisface la condición de tener la capacidad de recuperar el enlace en caso de falla en el cable. El manejo de la restauración ocurre localmente dentro de las subredes. Se debe tener en cuenta que estos tipos de categorías no son mutuamente exclusivos, dado que pueden traslaparse.

2.6.1 Topologías de salto único y de salto múltiple

Se define un salto como una conexión lógica entre dos nodos sin ningún procesamiento electrónico ni modificación de su longitud de onda en los dispositivos intermedios. Según el número de saltos una topología puede ser clasificada como de salto único o de salto múltiple.

En una topología de salto único, las señales ópticas llevan información desde el nodo fuente a un nodo destino sin realizar ninguna conversión optoelectrónica ni de longitud de onda.



En una topología de salto múltiple, el tráfico desde un nodo fuente al nodo destino puede viajar vía algunos nodos intermedios donde se realizan conversiones electro-ópticas, ser procesada y ser reenviada a otro enlace, posiblemente en otra longitud de onda.

Por ejemplo, en la figura 2.5, el nodo 1 puede alcanzar el nodo 3 en un salto. Así, cualquier transmisión del nodo 1 en la longitud de onda λ_1 puede alcanzar al nodo 3 a la velocidad de la luz (en la fibra). Similarmente, en la figura 2.6, el nodo 3 alcanza el nodo 6 en un salto aunque la ruta transcurre sobre dos enrutadores de longitud de onda. Asimismo, el nodo 2 puede alcanzar el nodo 3 vía tres saltos.

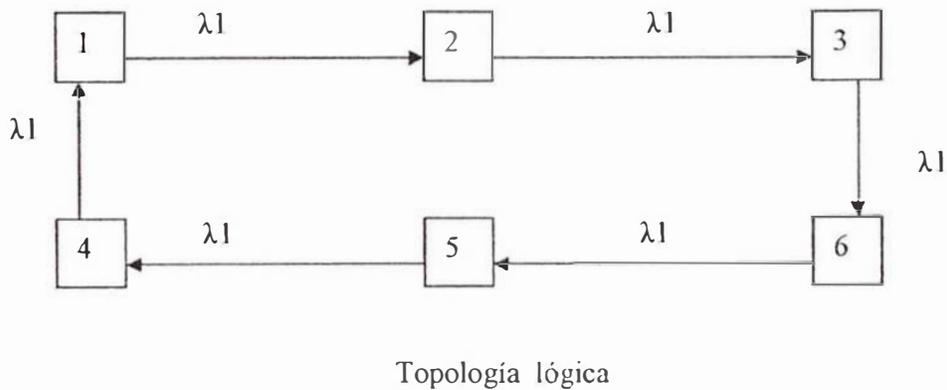
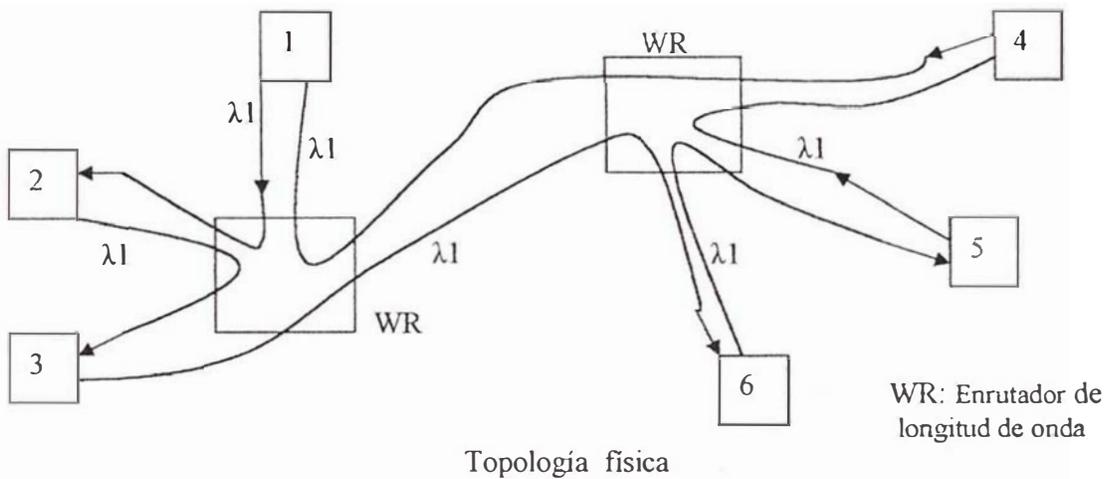


Figura 2.6 Red con enrutadores de longitud de onda

El modo de salto único sufre de dos desventajas:

La necesidad de ágiles transceptores de longitud de onda costosos.

La necesidad de coordinación de pre-transmisión entre los respectivos destinos.

Una red de salto múltiple no presenta estas desventajas. Las topologías de salto múltiple pueden ser regulares o arbitrarias.

2.6.2 Topologías regulares para redes ópticas de salto múltiple

Las topologías regulares tienen un patrón de conectividad global que es sistemático y bien definido. Ejemplos de topologías regulares de salto múltiple son: ShuffleNet, 2-Dimensional Torus, gráfico de Bruijn, Gemnet, Hipercúbica y TreeNet.

En el diseño de una arquitectura de red óptica lógica de salto múltiple se deben de tener en cuenta las siguientes consideraciones [12]:

la distancia internodal promedio deberá ser lo más pequeña posible, asimismo que esta debe de ser inversamente proporcional a la utilización de la red.

Cada nodo en la red deberá emplear sólo un pequeño número de transceptores de modo que el costo de la red no se eleve. El número de transceptores requeridos en un nodo debería ser independiente de la población de la red.

El conjunto de longitudes de onda requeridas en la topología lógica de red debe ser mínimo.

Debería de ser posible adicionar o suprimir nodos de la red, uno a la vez, con mínimo impacto en la configuración y el rendimiento de la red.

El procedimiento de enrutamiento debería ser simple. Las redes regulares son frecuentemente preferidas arbitrarias, por proveer esquemas simples de enrutamiento debido a su bien definido patrón de conectividad. En las redes arbitrarias las decisiones de enrutamiento estas basadas en tablas de enrutamiento que deben de ser periódicamente actualizadas.

La topología lógica debería de ser capaz de tolerar el mayor número de fallas de nodos y enlaces. En general, una topología lógica será más tolerante a fallas si existen mas rutas alternativas entre sus pares de nodos. En el caso de falla de un nodo o un enlace, los nodos afectados deberán derivar su tráfico a través de rutas alternas con suficiente capacidad de reserva.

2.6.2.1 ShuffleNet

La topología ShuffleNet fue propuesta en 1971 para el procesamiento en paralelo. Acampora fue el primero que propuso la arquitectura ShuffleNet para topologías virtuales de red óptica en 1987 [13]. Se debe anotar que la topología ShuffleNet (al igual que muchas topologías regulares) tratándose de una topología matemática que puede emplearse en cualquier sistema, no está restringida a una determinada aplicación, y es utilizada como una herramienta aceptada en la simulación de arquitecturas de redes ópticas.

Descripción: Una red ShuffleNet (p, k) consiste de $N = k p^k$ ($k = 1, 2, 3, \dots$, $p = 1, 2, 3, \dots$) nodos que están agrupados en “ k ” columnas de p^k nodos cada una, con la “ k ésima” columna conectada a la primera (en forma similar a un cilindro). La conectividad dentro de las columnas sucesivas es “ p ”. En la figura 2.7 se muestra una ShuffleNet perfecta ($p = 2$, $k = 2$).

Propiedades estructurales: La ShuffleNet es una topología simétrica y homogénea. Es decir, la red parece tener la misma forma desde cualquier nodo. En una ShuffleNet, debido a su patrón de conectividad cilíndrico, el enrutamiento es confiable y tolerante a fallas.

Diámetro y distancia promedio de salto: La distancia promedio de salto, \bar{h} , entre dos nodos arbitrarios en una ShuffleNet está dado por:

$$\bar{h} = \frac{k p^k (p - 1) (3k - 1) - 2k (p^k - 1)}{2 (p - 1) (k p^k - 1)}$$

y su diámetro es $2k - 1$.

Utilización de enlace: Debido al salto múltiple, sólo una fracción de la capacidad de enlace es utilizada por portadoras de tráfico entre dos nodos específicos conectados por un enlace.

Dada que una red tiene $N p = k p^{k+1}$. La capacidad total de la red está dada por

$$C = (k p^{k+1}) / \bar{h}$$

Que es aproximadamente 40 por ciento para redes grandes.

La productividad por usuario esta dada por:

$$C / N = p / h$$

Que puede ser incrementada seleccionando “k” pequeño y “p” grande.

Congestión de enlace: Cuando en algunas rutas existe una alta demanda relativa de tráfico surge la congestión en el tráfico, lo cual merma el rendimiento de la red. Para reducir la congestión se sugieren emplear algunas estrategias de enrutamiento.

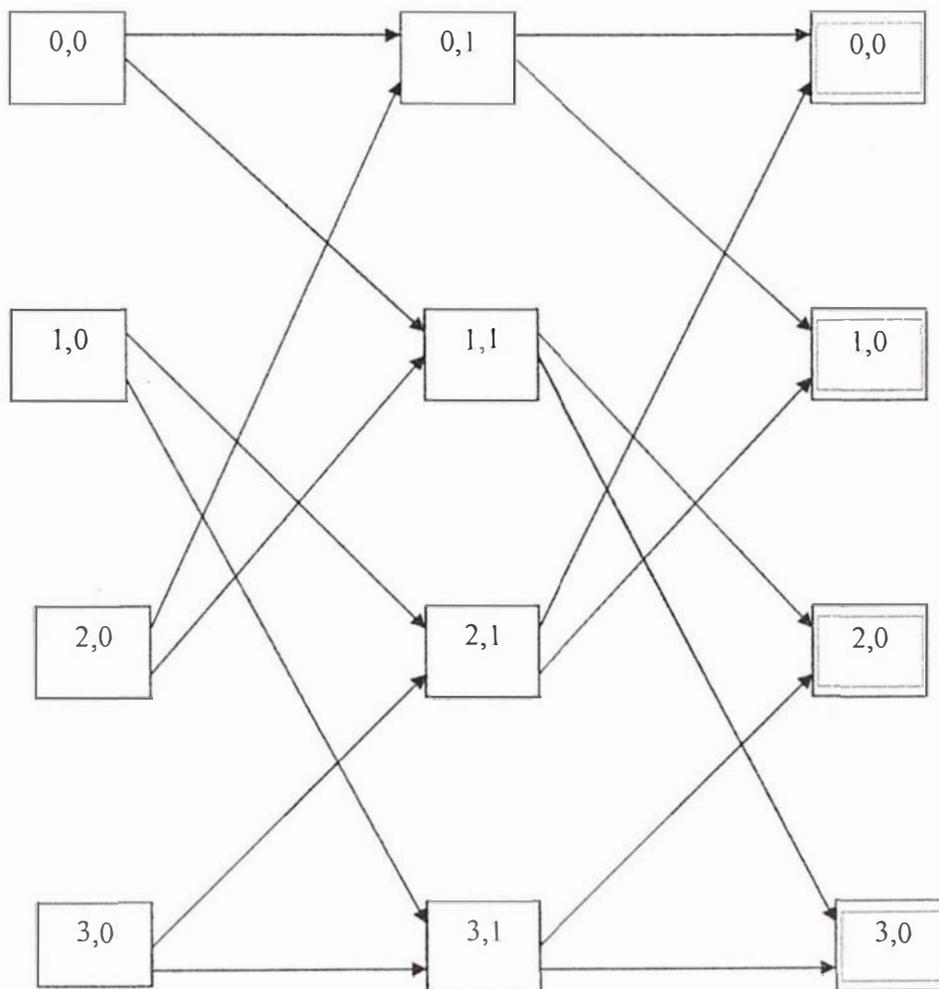


Figura 2.7 ShuffleNet (p = 2, k = 2)

Enrutamiento: Sea un nodo de “r” filas y “c” columnas en una topología ShuffleNet (p, k), y $c \in (0,1,2,\dots,k - 1)$ podría existir mas de una ruta más corta. En este caso el algoritmo de enrutamiento deberá ser distribuido, es decir, la decisión de enrutamiento deberá ser hecha independientemente en cada nodo.

Existen algunas variaciones de la técnica de ruta más corta. Entre ellas, si se tiene más de “k” saltos desde la fuente al destino, entonces existen múltiples rutas mas cortas, y el paquete será encaminado hacia el nodo con menor número de paquetes en espera. En otro esquema si existen múltiples rutas mas cortas se selecciona aleatoriamente una de ellas. En algunos casos los paquetes pueden llegar a tomar rutas más largas pero alcanzar su destino más rápidamente.

En el enrutamiento de deflexión, una variante del esquema de enrutamiento de ruta mas corta, algunos paquetes pueden ser intencionalmente desviados para evitar la congestión. En este caso, si en un nodo dos o más paquetes rivalizan por el mismo enlace de salida, entonces uno de los paquetes será encaminado a través de ese enlace, mientras que los otros paquetes serán deflexionados a posibles rutas más largas vía los enlaces disponibles de salida en ese nodo. Esto reduce la congestión especialmente en redes grandes. Debido a que este esquema es probabilístico, la capacidad agregada es menor que la capacidad proveída por el esquema de ruta más corta.

Tolerancia a fallas: En el caso de múltiples fallas de nodos se puede perder la conectividad de la red. Por ejemplo en una ShuffleNet de grado 2, remover dos nodos o enlaces puede desconectar la red. No obstante, si falla un solo nodo es posible mantener la conectividad debido a su patrón de conectividad cilindrico.

Escalabilidad: La escalabilidad de la ShuffleNet es pobre debido a que el número de nodos debe de estar en la forma de k^p . Así, con dos transceptores en cada nodo, en una ShuffleNet de ocho nodos (es decir, $p = 2, k = 2$) la ShuffleNet solo puede escalar a 24 nodos ($p = 2, k = 3$).

2.6.2.2 Gráfico de Bruijn

Este modo de interconexión fue propuesto por Bruijn en 1949 como una topología combinatoria genérica. En el año 1991, el gráfico de Bruijn fue propuesto como topología lógica para redes ópticas por Sivarajan y Ramaswami [13].

Descripción de la topología: El gráfico de Bruijn $G(\Delta, D)$ es un gráfico directamente relacionado con el conjunto de nodos $(0, 1, 2, \dots, \Delta)^D$ (es decir, cada nodo está representado con D dígitos, cada uno de los cuales puede tomar los valores desde $0, 1, 2, \dots, \Delta$). Cada nodo tiene un grado de entrada y de salida Δ , y los Δ nodos tienen enlaces propios. El número total de nodos está dado por

$$N = \Delta^D$$

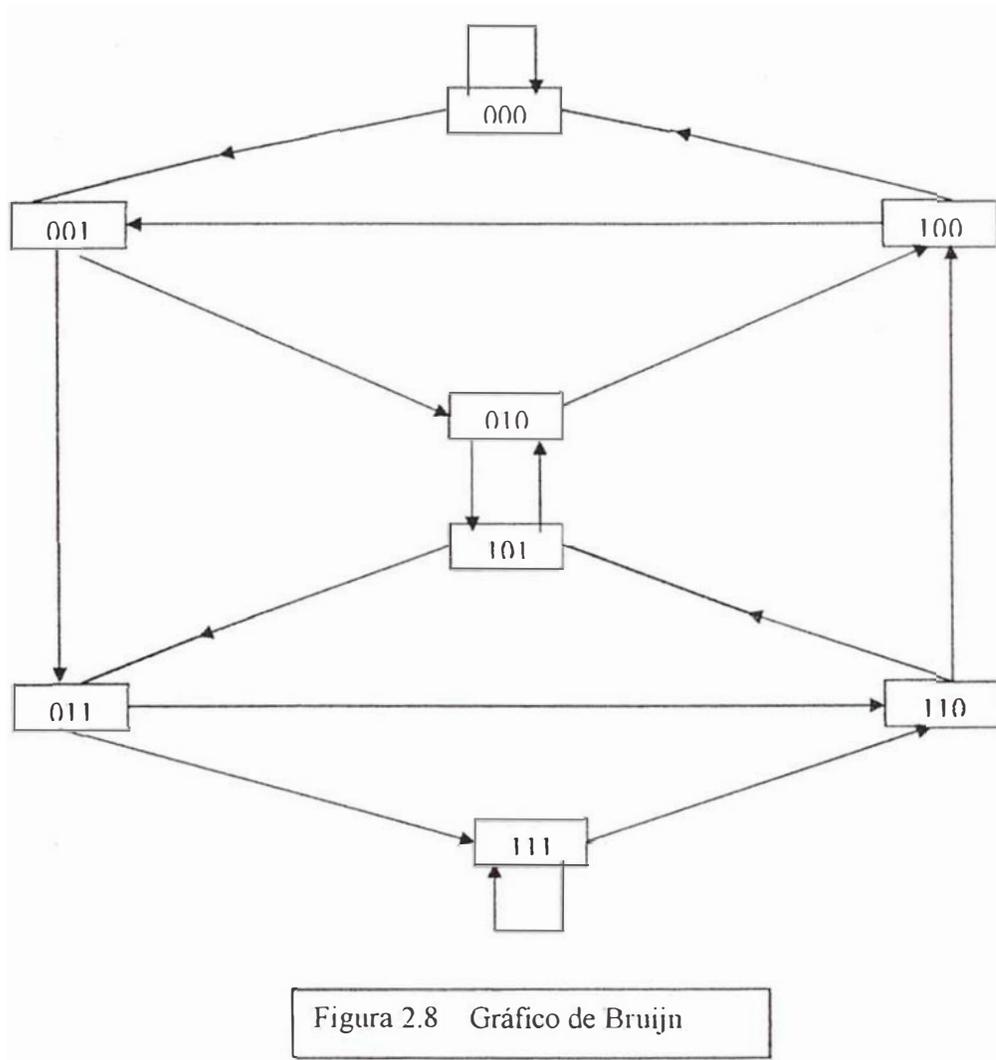
Hay correspondencia uno a uno entre todos los estados posibles de un registro Δ de longitud D y la conectividad de los nodos en el gráfico de Bruijn $G(\Delta, D)$. El patrón de conectividad de un gráfico de Bruijn es el diagrama de estados de transición de un registro de desplazamiento. En la figura 2.8 se muestra un gráfico de Bruijn $(2, 3)$.

Propiedades estructurales: El gráfico de Bruijn $G(\Delta, D)$ puede ser visto como un gráfico de dos columnas, cada columna contiene a su vez Δ^D nodos. Las dos columnas están conectadas en un patrón Δ -Shuffle perfecto. La estructura gráfica de De Bruijn es inherentemente asimétrica debido a los nodos con lazos propios.

Diámetro y distancia promedio de salto: El diámetro de un gráfico de Bruijn $G(\Delta, D)$ es D . No hay una forma exacta para expresar su distancia promedio de salto, h , aunque se encuentra restringida entre:

$$D \left(\frac{N}{N-1} \right) - \frac{\Delta}{(\Delta-1)^2} + \frac{D}{[(\Delta^D - 1)(\Delta - 1)]} < h < D \left[\frac{N}{N-1} \right] - \frac{1}{(\Delta-1)}$$
$$(\Delta > 2, D > 1)$$

Para Δ grandes, el límite superior es asintótico con respecto al límite teórico con N nodos y grado mayor $\Delta > 2$.



Utilización de enlace: En un gráfico de Bruijn, incluso para tráfico uniforme, la carga de enlace es desbalanceada. Esto es debido a la asimetría de la estructura. Para Δ grande, la expresión para la carga promedio, L , y carga máxima de enlace L_{max} , para el esquema de ruta más corta en tráfico uniforme esta dado como:

$$L = \frac{h}{N} \frac{N(N-1)}{\Delta N - \Delta} = \left(\frac{h}{\Delta}\right) \Delta^D$$

$$L_{max} \leq \left[\frac{D\Delta^{D+1} - (D+1)\Delta^D + 1}{(\Delta - 1)^2} \right] \approx D\Delta^{D-1}$$

Enrutamiento: Por analogía con un registro de desplazamiento, un nodo en un gráfico de Bruijn puede ser representado por una cadena de D dígitos. Desde un extremo del nodo A al nodo B puede estar representado por una cadena de $D + 1$ dígitos, los primeros D dígitos representan al nodo A y los últimos D dígitos representan al nodo B . Similarmente, cualquier ruta de longitud de salto K puede ser expresada como una cadena de $D + K$ dígitos.

Si definimos la operación desplazamiento de paridad (i,A,B) sobre dos cadenas $A = (a_1,a_2,\dots,a_D)$ y $B = (b_1,b_2,\dots,b_D)$ y la operación unión (i,A,B) de longitud $D + i$. El algoritmo de enrutamiento de ruta más corta desde el nodo A al nodo B , donde $a_i, b_i \in (0,1,\dots, \Delta - 1)$, $1 < i < D$ puede ser descrito como sigue:

```

/* Primero encontrar la distancia de salto entre los nodos A y B */
    i = 0;
while ( cambio de paridad (i,A,B) es Falso)
    i = i + 1;
end while
/* Entonces la ruta mas corta esta dada como sigue */
ruta_mas_corta = unión(i,A,B)

```

Por ejemplo, consideremos $G(2,3)$ y sea $A = (0,0,1)$ y $B = (1,1,1)$. Aquí los desplazamientos de paridad $(0, A, B)$ y $(1, A, B)$ son falsos. Mientras que el desplazamiento de paridad $(2, A, B)$ es cierto. De donde la unión $(2, A, B)$ produce $(0,0,1,1,1)$.

Entonces la ruta mas corta es $(0,0,1) \rightarrow (0,1,1) \rightarrow (1,1,1)$.

Tolerancia a fallas: Existen estudios de tolerancia a fallas de gráficos de Bruijn indirectos, los cuales se diferencian en que son enlaces bidireccionales. Según Hakimi y Esfahanian este gráfico bidireccional de Bruijn puede tolerar hasta $2\Delta - 3$ fallas de nodos.

Escalabilidad: Las propiedades de escalabilidad del gráfico de Bruijn son similares a las de la ShuffleNet.

2.6.2.3 GEMNet

GEMNet es una topología de red que tiene las ventajas tanto de ShuffleNet como las del gráfico de Bruijn. Asimismo, su modularidad es comparable o superior a topologías antes mencionadas.

Descripción topológica: Una topología GEMNet (K, M, p) , con $N (=K \cdot M)$ nodos, cada uno con grado nodal “ p ”, esta conformada de K columnas ($K > 1$) y M filas ($M > p$), ver figura 2.9.

En una configuración GEMNet a diferencia de la ShuffleNet no se está restringido a tener un número de nodos de la forma p^K . Una red GEMNet se reduce a una ShuffleNet (p, K) cuando $M = p^K$, y a una red tipo gráfico de Bruijn de diámetro D , si $M = p^D$ y $K = 1$. Por tanto la GEMNet es una estructura mucho más flexible que las estructuras de ShuffleNet como la del gráfico de Bruijn.

Propiedades estructurales. El diámetro de una topología de red GEMNet está dado por:

$$D = \lceil \log_p M \rceil + K - 1$$

No hay una forma única para hallar el promedio de salto de este tipo de red. Un estudio del enrutamiento en este tipo de red se encuentra en [11].

Tolerancia a fallas: Las propiedades de tolerancia a fallas de GEMNet son similares a las de ShuffleNet y las del gráfico de Bruijn, que son miembros de la familia GEMNet.

Escalabilidad: La escalabilidad de GEMNet es similar a las de ShuffleNet y del gráfico de Bruijn.

Una GEMNet con r filas puede ser escalada adicionando una fila completa, y reasignando algunos de los enlaces existentes.

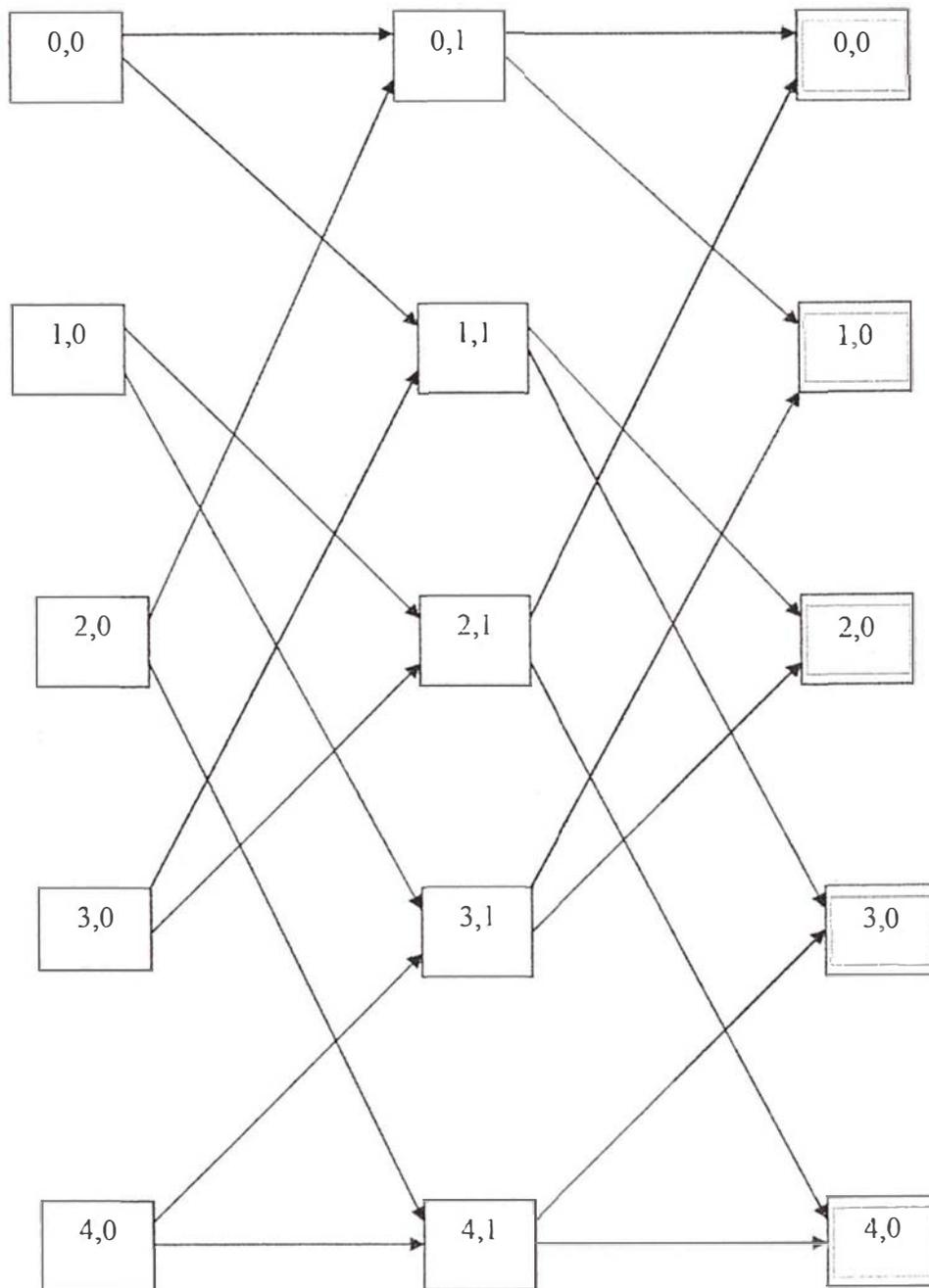


Figura 2.9 GEMNet ($K=2, M=2, p=2$)

2.6.2.4 Gráfico Kautz

Descripción. Sea $G = (V, A)$ una red, donde V es el conjunto de nodos y A , el conjunto de enlaces. Sea $N(x)$ que representa el conjunto de vértices vecinos de grado $d(x) = |N(x)|$. Sea $in_N(x)$ la vecindad que tiene como punto final a “x”. El grado de entrada en (x) es el cardinal de $in_N(x)$. En forma similar se define para el grado de salida en (x). Una ruta $R(x, y)$ es una secuencia de vértices que se inician en “x” y terminan en “y”, y cada vértice s incidente a los dos que inmediatamente lo preceden. Sea $dist(x, y)$ la longitud de la distancia de la ruta más corta entre “x” e “y”. Sea el diámetro de red $diam(G)$ y $K(G)$ la conectividad de la red.

El gráfico Kautz $K(d, k)$ es un gráfico regular con grado de entrada y de salida “d”, y de diámetro “k”. Sus vértices están etiquetados con palabras de longitud k (x_1, x_2, \dots, x_k) desde un alfabeto con $d + 1$ letras que no contienen dos letras idénticas consecutivas. Así, el número de nodos en un gráfico Kautz $K(d,k)$ es $d^k + d^{k-1}$, y el número de vértices, “e”, es Nd . Hay un enlace desde el vértice x al vértice y si y solo si las últimas k-1 letras de x son las mismas como las primeras k-1 letras de y. Un gráfico Kautz $K(2,3)$ se muestra en la figura 2.10.

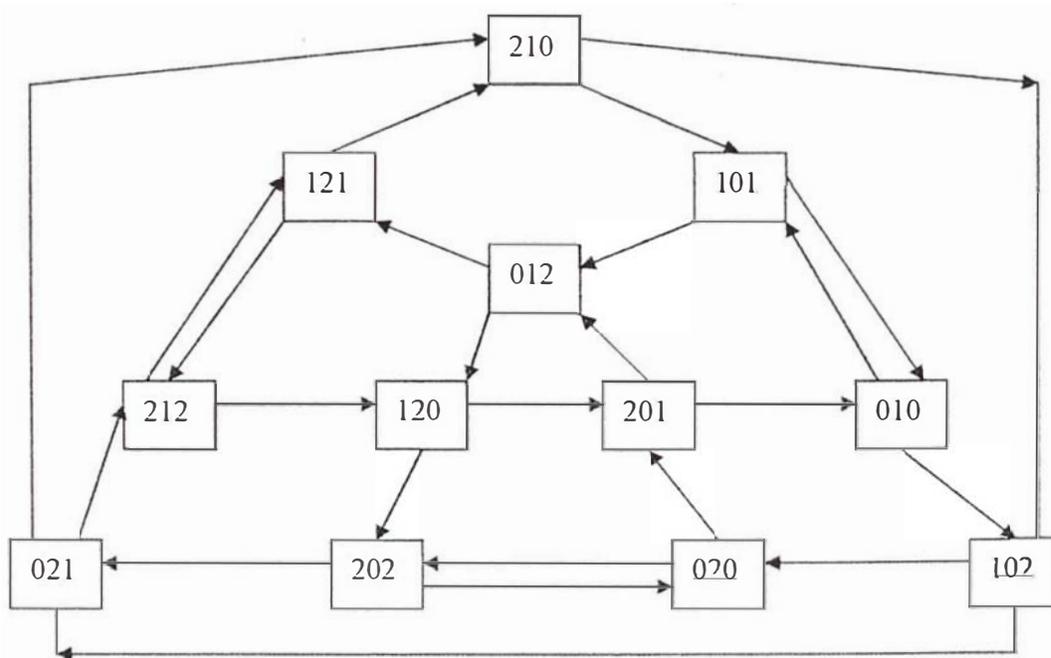


Figura 2.10: Gráfico Kautz

Propiedades estructurales: El diámetro de un gráfico Kautz (d, k) es “ k ” y su distancia promedio de salto, \bar{h} , esta en el orden de $\log_d N$.

La performance de Kautz es igual a la del gráfico de Bruijn bajo cargas normales (por ejemplo 40 %). Para cargas elevadas, un gráfico de Kautz responde mejor que el gráfico de Bruijn. El retardo promedio de cola sobre todos los posibles pares fuente-destino esta dado por
$$\delta = [1/(N(N-1))] \sum_{(i \rightarrow e)} [L_i / (Su - L_i \lambda)]$$

donde S es la velocidad de enlace, λ es la tasa promedio de arribo de paquetes, y u es el tamaño promedio de paquetes.

Congestión de enlace: El enrutamiento por ruta mas corta en un gráfico Kautz resulta en un carga asimétrica de enlaces, lo que incrementaría los retardos por colas en los enlaces congestionados. Para evitar esa congestión e incrementar la performance de la red, el enrutamiento debe de hacerse a través de rutas largas que pueden ser usadas también para distribuir la carga a lo largo de todos los enlaces.

Enrutamiento: El enrutamiento por ruta más corta es sencillo de realizar mediante el desplazamiento de un registro. Sea $K = (d,k)$ un gráfico de Kautz, y sea $X = (a_1, a_2, \dots, a_k)$ e $y = (b_1, b_2, \dots, b_k)$ los nodos fuente y destino respectivamente.

Una ruta $R(x,y)$ desde el nodo x al nodo y esta definida como una secuencia $S = \langle s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_j \rangle$ de letras $s_i \in \{0, \dots, d\}$ para todo $0 < i < n$ y $s_i \neq s_{i+1}$. Las primeras k letras de S son iguales a x y las últimas k letras de S son iguales a y . Cada secuencia de k letras contiguas de S denota un nodo intermedio en la ruta de x a y . Veamos un ejemplo de enrutamiento en un gráfico de Kautz: en la figura No.11 sea (021) el nodo fuente y (201) el nodo destino. Ahora notamos que $ON(021) = \{(212), (210)\}$ y $IN(201) = \{(120), (020)\}$. Entonces la ruta mas corta $R = \langle 021201 \rangle$ es vía los nodos (212) y (120) .

Tolerancia a fallas: Una red Kautz puede tolerar hasta un número de $(d-1)$ nodos fallados.

Escalabilidad: Dado un gráfico Kautz regular d , este puede escalar hasta un gráfico $d+1$.

2.6.2.5 Hipercúbica

La hipercubos binarios (es decir, $p = 2$) han sido extensamente estudiados como arquitecturas de interconexión de multiprocesadores debido a sus excelentes propiedades para soportar algoritmos paralelos. La estructura hipercúbica fue propuesta para redes de computadoras en el año 1984 por Bhuyan y Agrawal [14].

Descripción de la topología: Un hipercubo n -dimensional y p -aria consiste de p^n nodos. Estos nodos están etiquetados en números en base p , y dos nodos, i y j , están conectados con enlaces bidireccionales si sus etiquetas difieren exactamente en una posición de coordenada. Por lo tanto, el grado nodal de cada nodo es $n(p - 1)$.

Propiedades estructurales: La estructura hipercúbica ha sido también considerada como una topología virtual de red óptica. Aunque no es estimada como una solución práctica debido a que su grado nodal se incrementa con el tamaño de la red, lo que indica que se necesita costosas interfaces adicionales (incluyendo transceptores) y gran conjunto de distintos canales WDM.

Enrutamiento: El enrutamiento de ruta mas corta en una hipercúbica binaria completa es bastante simple. La ruta entre dos nodos $x = x_1x_2x_3\dots x_N$ e $y = y_1y_2y_3\dots y_N$ en una hipercúbica n -dimensional binaria es computada como sigue: Sea $z = x \oplus y$, donde \oplus es el operador o exclusivo. Entonces, las dimensiones a las posiciones no ceros de z viajan (en orden arbitrario) desde x a y .

Tolerancia a fallas: La tolerancia a fallas es buena debido a que entre dos nodos hay numerosas rutas alternativas entre ellos.

Difusión y escalabilidad: Una hipercúbica n -dimensional puede ser escalada a otra $(n+1)$ dimensional conteniendo a lo mas el doble de nodos.

2.6.3 Comparación de algunas topologías lógicas regulares

Existen otras topologías regulares las mismas que se tratan en [15]. Las propiedades más importantes de dichas topología se muestran en la Tabla No. 1.

Tabla No. 1 Propiedades de algunas redes regulares de salto múltiple

Propiedades	ShuffleNet	de Bruijn	GEMNet	Kautz (r, k)	Hipercúbica r-aria	Anillo óptimo FLBH	HCRNet	MSN (2D, Torus)
Número de Tx (= No. de Rx) por nodo (d)	R	r	≥ 2	r	$(r - 1) * \log_r N$	2	3	2
Número de nodos, N	$k * r^k$	r^x	$M \times k$	$r^k + r^{k-1}$	r^d	Sin restric.	$n * m$	$N1 * N2$ (sin restric.)
Orden de la dist. promedio de salto	$\log_d N$	$\log_d N$	$\log_d N$	$\log_d N$	$\log_d N$	\sqrt{N}	$\log_d N$	\sqrt{N} (d = 2)
Diámetro, D	$2k - 1$	$\log_d N$	$\log_d M + k - 1$		$\log_r N$	$2 (\sqrt{N} - n + n/2 - 1)$		\sqrt{N}
Escalabilidad	Pobre	Pobre	discreto	Bueno	Pobre	Bueno	Bueno	Bueno
Complejidad de enrutamiento	Muy baja	Muy baja	Baja	Baja	Muy baja	Baja	Baja	Baja
Simetría ¹	Perfecta	Buena ²	Buena	Perfecta	Perfecta	Perfecta	Perfecta	Buena ³
Tolerancia a fallas ⁴	Buena	Discreta	Escalable ⁵	Muy buena	Buena	Discreta	Buena	Muy buena

¹ Definida como desviación estándar de la distancia de salto promedio de cada nodo en la red respecto de los otros N-1 nodos.
² No tiene simetría perfecta debido a los r autoenlaces
³ Perfectamente simétrica si N1 y N2 son pares.
⁴ Basado en el número y longitud de las rutas alternativas.
⁵ Para algún número de nodos, los GEMNets con mas columnas proveen mas rutas alternativas.

Un análisis de retardo basado en modelos de colas para enlaces bajo condiciones de independencia indica que, para carga uniforme, el retardo promedio de paquetes en un gráfico de Bruijn puede ser ligeramente menor que en una red ShuffleNet para cargas bajas o moderadas. Un gráfico Kautz $K(d, k)$ puede soportar $1 + 1/d$ veces el número de nodos de un gráfico $G(d, k)$ de Bruijn. Una red MSN tiene como mayor desventaja que su distancia promedio de salto se incrementa a razón de \sqrt{N} que es mucho más rápido comparado con $\log_d N$ para estructuras como la ShuffleNet.

Las topologías regulares fueron usadas en las primeras redes ópticas tales como Teranet en la Universidad de Columbia, con redes reconfigurables encaminadas por longitud de onda. Las topologías lógicas regulares fueron ampliamente usadas en la literatura de redes ópticas debido a que son fáciles de analizar y demostrar la reconfigurabilidad de las redes ópticas. No obstante, la mayoría de redes desarrolladas comercialmente son de gran transporte y de área amplia. En una WAN, la topología física es muy parecida a su topología lógica. Estas redes generalmente no consisten de un gran número de nodos y bajo este contexto las topologías lógicas regulares no proveen ventajas significativas de enrutamiento.

2.7 La conmutación

En redes que no cuenten con almacenamiento, es casi obligatoria la conmutación de circuitos como una consecuencia indirecta de no disponer de elementos que reconozcan la cabecera y que realicen el procedimiento tradicional empleado en las redes de conmutación de paquetes.

Para distancias cortas, por ejemplo en una red LAN o en una red MAN pequeña, el tiempo de propagación entre los controladores asociados con el enrutamiento de longitud de onda en nodos intermedios es tan reducido que las rutas ópticas pueden ser fijadas y tomadas de paquete en paquete. Para grandes distancias, la duración del tiempo de propagación lo hace incompatible con la conmutación de paquetes.

Para tomar plena ventaja de los beneficios de la tecnología WDM, es necesario una red capaz de realizar un enrutamiento óptico de paquetes. El problema fundamental en el enrutamiento de paquetes es que no hay un buen medio para el almacenamiento de datos en forma óptica así como tampoco para manejar los problemas de congestión. La arquitectura de red de cilindros múltiples mezclados (MCSN) con un protocolo de deflexión de paquetes pequeños cortos, provee una metodología bien estructurada para el enrutamiento de paquetes WDM [16]. No obstante, la arquitectura de red MCSN presenta la dificultad de presentarse paquetes deflexionados incluso a bajas cargas de red.

La arquitectura MCSN es apropiada para tráfico asincrónico de paquetes. Los nodos de conmutación MCSN usan internamente ingeniería de permutación. La ingeniería de permutación es un mecanismo de control de enrutamiento distribuido simple, para direccionar datos de paquetes asincrónicos usando solamente información de tráfico local para tomar decisiones de enrutamiento. Para interconectar los dispositivos de dicho sistema se debe utilizar interfaces para convertir los protocolos electrónicos existentes a esquemas ópticos. Una interface ad-hoc para realizar esta tarea es el multiplexor de espacio- tiempo (STM), la cual posee la capacidad para multiplexar M fuentes electrónicas TDM sobre un enlace multicableado. La función multiplexación por espacio es mapear una fuente electrónica sobre un enlace de N bits de ancho.

Las tres funciones elementales de la interfase STM son, segmentación de grandes mensajes en pequeños paquetes, flujo de control e inserción/detección de cabecera.

Para el desarrollo efectivo de esta tecnología es necesario la integración del arreglo láser y un arreglo detector WDM con un acoplador óptico integrado para atenuar las pérdidas de acoplamiento.

Conversión de longitud de onda en conmutadores

Un esquema en el que los convertidores de longitud de onda se encuentran presentes en los conmutadores de la red, es conocido como de conmutadores de longitud de onda de conectores entrecruzados (WXSC). En el mismo, cada longitud de onda a lo largo de cada enlace de salida de un conmutador tiene un convertidor de longitud de onda dedicado.

Por otro lado, los conmutadores convertidores de longitud de onda dedicados no son muy eficientes en costo, debido a que no todos los convertidores de longitud de onda son requeridos todo el tiempo. Un método efectivo para disminuir costos es compartir los convertidores. Existen dos arquitecturas para compartir convertidores:

- a) En la estructura de distribución por nodo, todos los convertidores en el nodo de conmutación están agrupados en un banco de convertidores. Cualquier longitud de onda de cualquier fibra de entrada puede tener acceso a este banco mediante la configuración apropiada de un gran conmutador óptico. En esta arquitectura, solo las longitudes de onda que requieren conversión son derivadas al banco de conversores.
- b) En la estructura de distribución de enlace, cada enlace de salida tiene su banco dedicado, al que solo pueden tener acceso aquellas rutas ópticas que viajan hacia ese particular enlace de partida.

2.8 Tipos de arquitecturas ópticas

2.8.1 Redes lineales de luz (LLN)

Las redes lineales de ondas de luz (LLN) son redes diseñadas para proveer conexiones totalmente ópticas a demanda, para soportar un alto grado de flexibilidad, incluyendo la elección de formatos de modulación (analógicos o digitales), tasas binarias y de ancho de banda. Estas redes pueden tener topologías arbitrarias e incluso contar con capacidad de operación en redes WAN a la vez que sirven a miles de estaciones, operando cada una a tasas binarias del orden de los Gbps.

En la mayoría de redes las fibras ópticas son normalmente empleadas en enlaces punto a punto para reemplazar al cable metálico (ej., troncales telefónicas, interfase de datos, etc.), o en estructuras fijas multipunto tales como redes estrella pasivas y buses. En ninguno de estos tipos de configuraciones se explota completamente el potencial de las fibras.

En los casos anteriores, las terminaciones electro-ópticas de cada fibra producen cuellos de botella electrónicos, limitando la velocidad de la red a unos pocos Gbps. En el caso de los buses, todas las señales son enviadas a todos los usuarios, resultando en una innecesaria pérdida de potencia, desperdiciando la capacidad de la fibra. Por otro lado, los esquemas con reutilización del espectro óptico imponen exigentes condiciones en transmisores y receptores, y se debe proveer rutas alternativas en casos de falla. Las redes lineales no tienen estas limitaciones [17].

El concepto de red óptica lineal es motivado por tres premisas básicas:

- 1) Componentes que tienen comportamiento lineal en señales ópticas (acopladores, multiplexores, filtros, amplificadores ópticos, etc.), que actualmente están disponibles, tanto en costo como en rendimiento.
- 2) Las operaciones no lineales (ej. regeneración de señal, autoencaminamiento, almacenamiento) son muy difíciles de soportar en el dominio óptico y crean cuellos de botella si la performance es realizada en el dominio electrónico; y
- 3) La verdadera transparencia en la ruta de la señal requiere linealidad.

Una red LLN consiste de un número de nodos que están unidos a estaciones de red. Cada enlace debe ser bidireccional, y consiste de un par de fibras ópticas unidireccionales. La red opera en el modo WDM, con la porción útil de espectro óptico dividido en bandas de longitud de onda para propósito de enrutamiento y reutilización del espectro. Las bandas de longitud de onda están divididas en canales para lograr un alto grado de concurrencia en cada fibra.

Cada estación de red contiene al menos un transmisor y un receptor sintonizable, así como también interfaces electrónicas para uno o más terminales.

Los transmisores y receptores están capacitados para trabajar en el rango de los Gbps. Los canales de usuario pueden ser analógicos o digitales. Cada nodo de red consiste de un divisor/combinador lineal (LDC) y su circuito de control.

Una conexión se establece por la creación de una ruta óptica desde la fuente hasta el destino. Las conexiones son fijadas y desconectadas a través de un controlador de red (el cual puede estar centralizado o distribuido). En respuesta a un requerimiento de conexión, el controlador determina una ruta factible para la conexión, y le asigna un canal.

Concurrencia en la fibra: Bandas de onda y canales

Para explotar eficientemente la capacidad de la fibra es apropiado usar técnicas de multiplexación. Las redes LLN se dividen a dos niveles. Primero una partición “gruesa” del espectro a usar en bandas separadas por bandas de guarda. Ver figura 2.11.

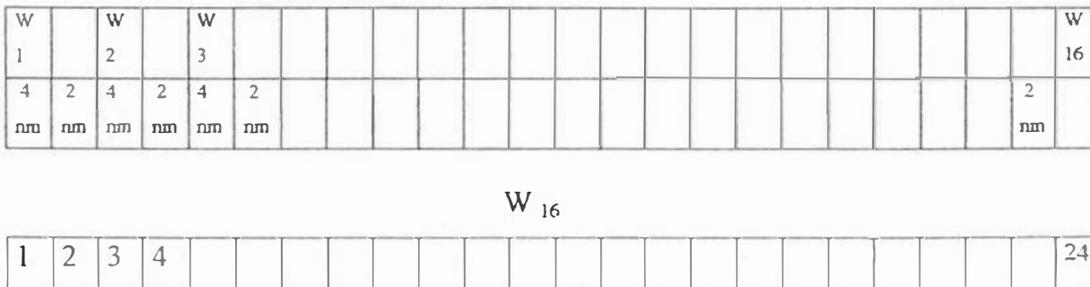


Figura 2.11	Concurrencia en la fibra	16 x 24 = 384 canales
	2.5 Gbps por canal	384 canales = 0,96 Tbps por fibra

Las bandas de longitud de onda de este tamaño y separación son lo suficientemente grandes para ser resueltas por los LDC's usando la actual tecnología disponible. Cada una de estas bandas tiene un ancho de banda aproximado de 250 GHz, capacidad suficiente para soportar muchos canales individuales, cada uno corriendo conservadoramente en el rango de 2.5 Gbps. Luego se hace una partición "fina", dividiendo cada banda de ondas en un número de canales.

La característica esencial de un canal en una red LLN es que sea distinguible de otros canales en los receptores. Cada estación de transmisión tiene acceso a un rango de longitud de onda de las fibras sintonizando su transmisor a una banda de longitud de onda asignada y a un canal asignado en esa banda. Similarmente, los receptores correspondientes sintonizan a la misma banda de longitud de onda y canal.

Usando la técnica WDMA (Acceso múltiple por división de longitud de onda) se puede acomodar canales que soporten una transmisión digital de 2.5 Gbps, o un ancho de banda analógico de 2.5 GHz. Considerando los requerimientos de ancho de banda de modulación, se puede acomodar 24 de estos canales con una separación de 0,1 nm (12,5 GHz). A 2.5 Gbps por canal, la tasa resultante por fibra es de 960 Gbps. El inconveniente de WDM de requerir de sintonización física en el dominio óptico, es solucionado usando una subportadora FDMA. En este caso, los datos transmitidos son primero electrónicamente modulados sobre una señal de microondas, y esta señal es usada para modular el portador óptico. En el receptor, un fotodiodo detector demodula la señal óptica, convirtiéndola a señal de microonda, de ella los datos son extraídos por demodulación electrónica.

Condiciones de enrutamiento en redes LLN

La linealidad de las operaciones realizadas en los LDC's impone condiciones especiales en el enrutamiento de señales dentro de una LLN. Estas condiciones son las siguientes:

- i) Continuidad de canal. Cada conexión usa el mismo canal en todos los enlaces que atraviesa desde la fuente hasta el destino.

- ii) Todas las conexiones que comparten un enlace común deben ser asignadas a distintos canales de longitud de onda.
- iii) Inseparabilidad. Las señales combinadas en una fibra y dentro de la misma banda de onda, no pueden ser separadas dentro de la LLN.

2.8.2 Arquitectura Lightnet

El principio de la arquitectura Lightnet es la construcción y uso de una topología virtual compuesta de enlaces virtuales implementados en el dominio de la longitud de onda, desarrollada sobre la base de la topología original [18].

Los enlaces virtuales son implementados por caminos ópticos. La arquitectura Lightnet tiene dos alternativas de conmutación:

- a. El conmutador pasivo, que implementa la ruta óptica interna conmutando las direcciones de las rutas ópticas a través de cada nodo. Estos conmutadores están prefijados durante el establecimiento del camino, y permanecen pasivos.
- b. El conmutador activo, usado para la conmutación entre rutas ópticas adyacentes en la topología virtual. Esta conmutación es determinada por el algoritmo de enrutamiento y el destino de transmisión final.

La elección de la topología virtual es de importancia crucial, como que determina el número promedio de etapas de conmutación activa por transmisión de paquete, y de ese modo, la cantidad total de procesamiento por paquete enviado.

Para dicha elección se debe tomar en cuenta que en una comunicación típica, tal como una red de telecomunicación en la que los patrones de tráfico son relativamente estables, las rutas ópticas pueden ser establecidos reflejando la demanda de tráfico. Sin embargo, en redes de comunicación de datos, los patrones de tráfico son a ráfagas. En estos casos estas rutas no pueden estar establecidas para tráfico de paquetes, por lo que debe utilizarse una topología regular tal como la topología virtual Lightnet.

El uso de una topología regular permite el diseño de un sistema incluyendo las siguientes consideraciones de hardware:

- 1) El tamaño del conmutador activo es determinado por el grado del nodo de la topología virtual y es igual al número de rutas ópticas terminadas en ese nodo.
- 2) El tamaño del conmutador pasivo es determinado por el grado del nodo físico, el número de longitudes de onda y sus rutas ópticas asociadas, lo cual simplifica la asignación de la misma longitud de onda a cada ruta óptica a través de su trayectoria.
- 3) El número de longitudes de onda requeridas, está asociado con el número de transmisores y receptores requeridos, el tamaño del conmutador pasivo requerido y la tecnología de transmisión.

Con todo esto se reduce la cantidad de procesamiento requerido por paquete de transmisión, y por lo tanto se reduce la congestión, los requerimientos de almacenamiento y se simplifica el enrutamiento en el conmutador activo.

Hay dos consideraciones importantes relacionadas a la topología virtual:

Primero, se investiga la topología virtual que sea adecuada en términos de sus requerimientos de implementación de hardware.

Segundo, una topología regular ofrece significativas mejoras de performance incluso para redes altamente irregulares.

En Lightnet, el proceso de superposición comprende tres consideraciones:

- a) Primero, la asignación de nodos en la topología virtual a nodos de la topología física que deben ser conectados mediante rutas ópticas.
- b) Segundo, la determinación de enlaces físicos constituyentes de cada una de las rutas ópticas.
- c) Tercero, la asignación de longitudes de onda a las rutas ópticas, de modo que;
 - c.1 La misma longitud de onda sea asignada a una ruta óptica a través de su propio trayecto.
 - c.2 La no asignación cuando ocurran conflictos. Un conflicto es definido como la asignación de la misma longitud de onda a dos rutas ópticas a través del mismo enlace.

Se presenta una solución en dos fases:

En la primera etapa se debe obtener una representación de alguna topología de red general en una forma simple, una cadena y, entonces se pasa a la segunda etapa que superpone una topología regular a esta cadena. Esta propuesta es ilustrada a través de la superposición de una topología hipercúbica en la topología general de red de la figura 2.12a.

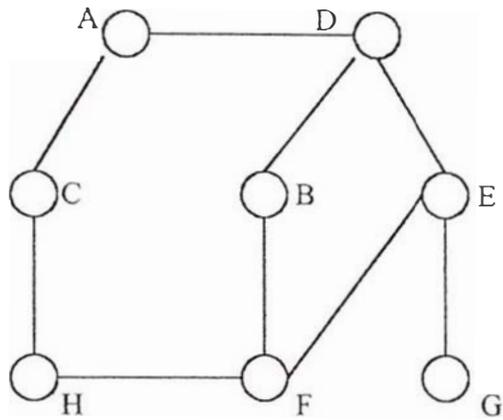


Figura 2.12a Topología de una red genérica

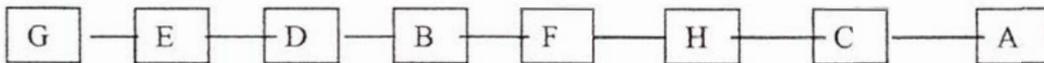


Figura 2.12b Cadena de caracteres correspondiente a la figura 2.12a

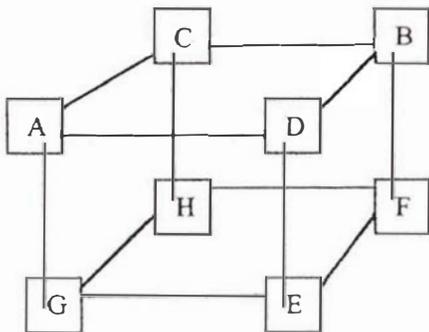


Figura 2.13 Nodo hipercúbico

SUPERPOSICION DE UN NODO HIPERCUBICO 8 EN UNA CADENA

	A	B	C	D	E	F	G	H
A	X		λ_2	λ_1			λ_3	
B		X	λ_1	λ_3		λ_2		
C	λ_2	λ_1	X					λ_3
D	λ_1	λ_3		X	λ_2			
E				λ_2	X	λ_3	λ_1	
F		λ_2			λ_3	X		λ_1
G	λ_3				λ_1		X	λ_2
H			λ_3			λ_1	λ_2	X

En la figura 2.12b se muestra una representación equivalente en forma de cadena, con la condición de que si dos rutas están separadas en la cadena, también lo son en la red original. Esta propiedad asegura que no haya conflicto en la asignación. Finalmente se hace la asignación de longitudes de onda a las rutas ópticas, en el caso ejemplo con tres longitudes de onda. En la figura 2.13 se muestra una solución propuesta basada en una topología regular hipercúbica.

2.9 La arquitectura jerárquica AON

2.9.1 Principios de la Arquitectura

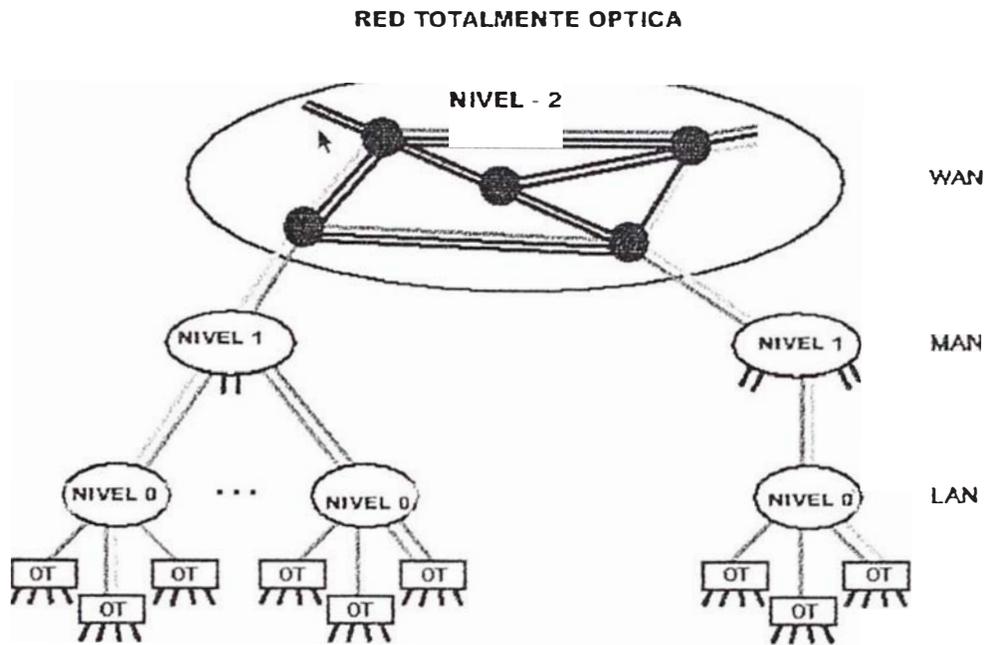
La arquitectura de red totalmente óptica (AON) esta guiada por los siguientes principios:

- a) La arquitectura desarrollada deberá ser capaz de aplicaciones razonables más allá de una generación tecnológica. Es decir, debe anticipar desarrollos de dispositivos, y debe asumirse la eventual disponibilidad de componentes que actualmente sólo existen sólo en laboratorio; ej. el enrutador dinámico o estático de longitud de onda y modificadores de longitud de onda, etc.

- b) No obstante el acápite anterior, la arquitectura desarrollada no deberá ser críticamente dependiente de presunciones de una tecnología particular. Por ejemplo, si el costo de un dispositivo determinado sube demasiado, debe ser posible usar otro dispositivo en una arquitectura alterna. Ej. modificadores de longitud de onda vs. multiplexor estático o conmutadores dinámicos espaciales.
- c) Las estaciones finales que usan la tecnología tradicional deben ser capaces de emplear esta red sin necesidad de requerir una nueva interface hardware y software de sistema. Por ejemplo, ambas estaciones utilizadas TCP/IP en redes LAN y estaciones usando redes ATM deben ser capaces de comunicarse sobre este sistema.
- d) La red debería continuar operando en caso de división. Esto implica el uso de una organización completamente distribuida o algoritmos de control organizados jerárquicamente.
- e) Los algoritmos deben ser auto estabilizados. Esto es, dada una falla razonable, la red retornaría a la estabilidad y operación correcta desde un estado inicial arbitrario dentro de un tiempo razonable.
- f) La arquitectura permitiría a la red escalar a un nivel más allá de lo que es razonable hoy en día. Las dimensiones de escalamiento serán el número de nodos terminales, expansión geográfica y la tasa de transmisión.
- g) La arquitectura proveerá mecanismos para limitar el campo de acción de problemas en la red causados por falla o comportamiento defectuoso en los nodos terminales.

2.9.2 Niveles de la Arquitectura AON

La arquitectura de red totalmente óptica (AON), consiste de tres niveles jerárquicos de subredes. Subred Nivel 0 (L-0), Subred Nivel 1 (L-1) y Subred Nivel 2 (L-2), como se muestra en la figura 2.14.



Donde OT:Terminal Optico

Figura 2.14 Red totalmente óptica (AON)

Cada subred cuenta a su vez con autonomía de operación.

Un terminal óptico esta conectado a cada L-0 a través de un par de fibra. Puede haber una cantidad de subredes L-0's, cada una conectada a una subred L-1 también a través de un único par de fibra. Una subred L-1 es una red MAN que enlaza un conjunto de L-0's usando enrutamiento de longitud de onda pasivo.

Una subred L-2 es una red WAN utilizada para interconectar las subredes L-1's.

Hay sólo una red L-2, que consiste de muchos nodos interconectados en una topología malla.

Una subred L-1 puede conectar varios nodos en la L-2 a través de múltiples pares de fibra.

El ancho de banda de la fibra es dividido en tres grupos: local, metro y global. Una longitud de onda adicional puede ser usada para servicios A o B (el servicio C es suministrado fuera de banda, a 1,3 um.).

Las longitudes de onda locales se utilizan para conexiones dentro de las subredes L-0's.

Las longitudes de onda metro son usadas para conexiones entre las subredes L-0's, para las OT's que están bajo la misma subred L-1. Las longitudes de onda local y metro pueden ser utilizadas por cada subred L-0 y L-1 respectivamente.

Las longitudes de onda globales son usadas para acceder y salir de la subred L-2.

Cada subred provee servicios A, B y C a las subredes debajo de ellas.

Cada subred es responsable de sus propios recursos, ej. ancho de banda, conmutadores, enrutadores, modificadores de longitud de onda, etc.

Para procesar los requerimientos de servicio y administración de sus recursos en cada subred se tiene un controlador. El controlador tiene el propósito de permitir la operación autónoma de ocurrencia de fallas de un subnivel más alto

Nivel 0:

El nivel 0 es el más bajo nivel en la arquitectura AON. Una subred L-0, es una red LAN de alta performance que envía todas las longitudes de onda recibidas hacia los terminales ópticos vinculados a él. Un filtro bypass separa las longitudes de onda local de las longitudes de onda metro y global. Las últimas longitudes de onda pasan a las subredes L-0's a través de una única subred L-1. Para mejorar la fiabilidad y seguridad, una subred L-0 puede contener conmutadores de corte, que cuando son accionados, remueven la subred del sistema.

Nivel 1:

Las redes de nivel 1 son las redes encaminadas por longitud de onda que direccionan las longitudes de onda desde una red de nivel 0 a otra de nivel similar. Las longitudes de onda pueden ser encaminadas agrupadas o individualmente. Una red AON de nivel 1 puede ser estática o dinámica. Su propósito es proveer una ruta óptica a una o más subredes de nivel 0. Las redes de nivel 1 generalmente requieren servicios desde una red L-2 para transmitir información desde una red L-0 local a otra red de nivel 0 conectada a otra diferente red de nivel 1.

Nivel 2:

El nivel L-2 es una red WAN, la cual es utilizada para interconectar las subredes L-1's. Es configurable, hace uso extensivo de conmutadores y de dispositivos modificadores de longitud de onda. Como las redes WANs tienden a crecer en forma asimétrica y no predecible, el nivel de red L-2 esta diseñada para contener mallas de cientos de nudos.

Existen dos tipos de configuraciones de nodos de tipo L-2. La primera, sin modificadores de longitud de onda, y la segunda que incluye modificadores de longitud de onda. Algunas topologías eficientes no requieren modificadores de longitud de onda, y estas topologías están cerca de lo óptimo en el sentido de que utilizan el mínimo número de longitudes de onda. Claro esta que estas redes tendrían que utilizar topologías optimizadas, las mismas que no pueden ser implementadas a escala nacional. Por otro lado, los modelos y simulaciones de topologías de malla dan una pequeña ventaja a las redes que utilizan modificadores de longitud de onda.

2.9.3 Servicios AON

Hay tres tipos de servicios de transmisión a ser proveídos a las interfaces de usuarios (punto de acceso o AP) de la red totalmente óptica. Estos son los tipos A, B y C.

Servicio Tipo A

Este es un servicio que usa una o más rutas ópticas dedicadas durante la conexión de transmisión de información. Los datos de tipo A y el formato de modulación generalmente no presentan restricciones aunque no deben excederse los niveles de la fuente de potencia y especificaciones de ancho de banda en los puntos de acceso (AP). Las conexiones tipo A son resultado de un requerimiento a través de un AP por un nodo. Los principales subtipos asociados con este servicio son:

- a) Conexión dúplex: Esta diseñada para conexión punto a punto bidireccional y podría ser el servicio tipo A más común. Este tipo de conexión podría usar dos rutas ópticas dedicadas en la AON. Tal conexión podría tener un número de aplicaciones tales como canal dedicado o para ser utilizado en conexiones de computador a computador de muy alta velocidad con canal de ancho de banda garantizado o mediante un sistema de conmutación de paquetes tradicional o conmutación de celdas ATM.
- b) Conexión multicast: Con este subtipo, el nodo demandado utiliza un único enlace multidireccional a los destinatarios con el propósito de transmisión unidireccional. Cuando este tipo de servicio es requerido, el solicitante debe especificar si intenta ser una fuente o destino.
- c) Conexión compartida: Con este tipo de servicio, cada nodo participante puede transmitir y recibir datos. En este tipo de servicio podrían haber colisiones si no existe un esquema de acceso ordenado al canal. Sin embargo, esta arquitectura no tiene un dispositivo específicamente dedicado para evitar la contención de canal en este tipo de servicio. Algunos algoritmos de contención individuales pueden ser acordados por los usuarios para compartir la conexión y acceder a sus aplicaciones.

El servicio A es un servicio reconfigurable punto a punto de alta velocidad o un circuito multicast.

Servicio Tipo B

Este es un servicio transparente TDM/WDM, que usa una ruta óptica para transmitir información durante la duración de la conexión. En general, los formatos de los datos y de la modulación dentro del intervalo de tiempo no tienen restricciones (pero con especificación de la configuración de conexión para asegurar la recuperación adecuada de la señal en el receptor). Con el servicio tipo B, tanto como con el de tipo A son posibles los subtipos dúplex, multicast y compartido. Se muestra una síntesis de las características de este servicio en la figura 2.15 [19].

SERVICIO TIPO B

WDM POSIBILITA COMPARTICION DE LONGITUD DE ONDA Y ASIGNACION FLEXIBLE DE ANCHO DE BANDA MULTIPLES

SINCRONIZACION DE TRAMA, OPERA COMO UNA CONMUTACION DE CIRCUITOS DISTRIBUIDA

EXTENSION A PAQUETES MAS GRANDES

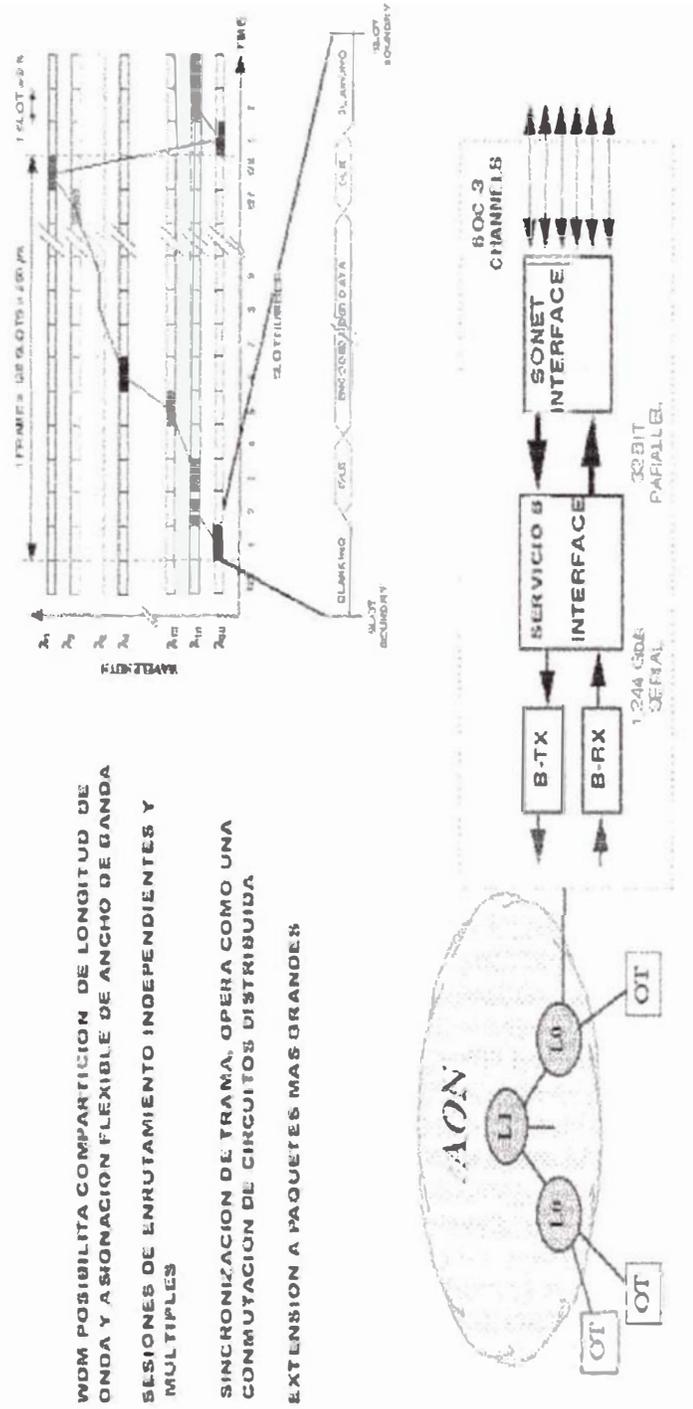


Figura 2.15 Servicio Tipo B

Este servicio es útil para aplicaciones de bajo ancho de banda. Otra razón importante del servicio tipo B, es la mayor eficacia de distribución de las rutas ópticas. Si cada conexión tipo B requiriera una ruta óptica dedicada, la red AON prontamente sería rebasada en sus recursos.

Por otro lado, en el caso de que algunos usuarios requieran múltiples receptores (y transmisores) es necesario algún método de distribución de recursos para un rendimiento agregado de transmisión de datos, o bien, para reducir la probabilidad de bloqueo. Para el servicio tipo B, las probabilidades de bloqueo no serán significativas hasta que la utilización de la ruta óptica sea relativamente alta.

El servicio tipo B es un servicio conmutado, simultáneamente TDM y WDM. Este tipo de servicio permite a los usuarios tener conexiones simultaneas independientes y ópticamente encaminadas, cada una a diferente capacidad de transmisión, que son multiplexadas y demultiplexadas en forma electrónica en cada terminal óptico, y ópticamente dentro de la AON. Ambos servicios facilitan la distribución de recursos de la red.

Servicio tipo C:

Este es un servicio bajo el cual los usuarios pueden transmitir “una información empaquetada” en longitud de onda. El protocolo de control de acceso al medio esta basado en un algoritmo de distribución tal como ALOHA y no requiere una central de sincronización, debido a que el servicio tipo C deberá ser usado para la auto configuración de la red. El manejo de red y el control de mensajes son también servicios tipo C.

El servicio tipo C es un servicio de datagrama en el que cada terminal óptico puede transmitir un paquete en un formato de datos y de modulación específico. El servicio tipo C no es transparente porque debe servir como un enlace de comunicación común entre todos los usuarios de la red AON. Esta es una red de señalización que es utilizada principalmente para programación de recursos, operación, administración y mantenimiento de redes.

El servicio tipo C es el canal de comando y control, y provee la distribución del reloj maestro del servicio B para la red AON, está implementado como un sistema analógico modulado en amplitud a 1310 nm.

En la figura 2.16 se muestra un esquema del control de red ofrecido por el servicio tipo C donde se aprecia que este tipo de servicio puede realizar la calibración, comandar remotamente problemas e imprevistos a la alta velocidad de la red AON.

**SERVICIO TIPO C Y EL CONTROL DE LA RED
TELEMETRIA, CONTROL, PLANIFICACION, SINCRONIZACION Y
SERVICIO DE DATAGRAMA**

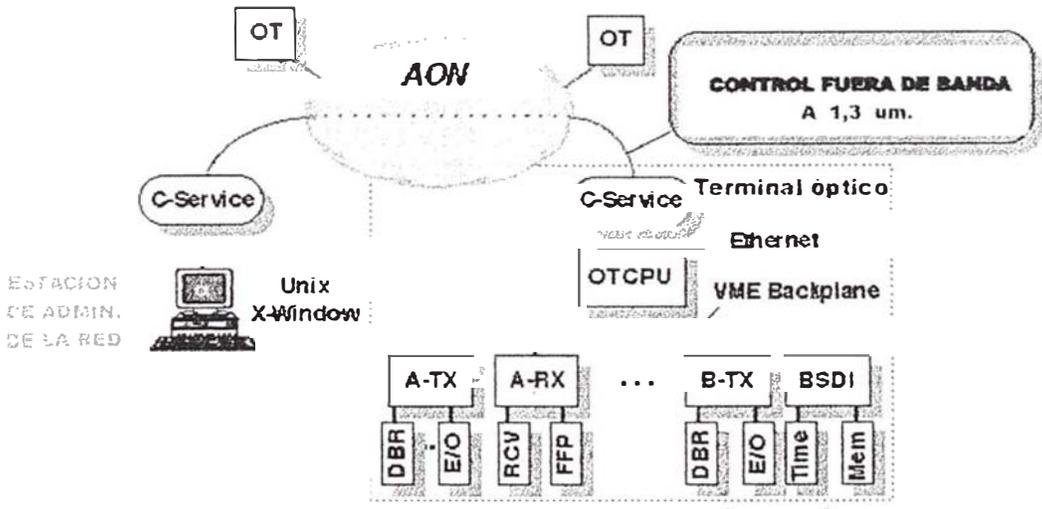


Figura 2.16 El Servicio C y el control de la red [19]

Capítulo 3

Elementos de Diseño de Redes totalmente ópticas

En el diseño de una red óptica, se debe tener en cuenta dos consideraciones fundamentales; primero, se debe de satisfacer una demanda de tráfico sobre un área determinada y al menor costo posible; y segundo, la respectiva funcionalidad de dicha red. Se tienen dos técnicas principales de multiplexación sobre la fibra óptica, WDM y OTDM. La alternativa CDMA óptica, aunque es muy interesante, esta algo lejana en cuanto a la disponibilidad de los dispositivos físicos necesarios para la implementación práctica de redes basadas en esta tecnología.

3.1 Requerimientos generales de diseño de arquitectura para redes OTDM

Una red OTDM destinada a servir a una población con requerimientos heterogéneos debe incluir las siguientes funciones:

- 1) Proveer una backbone para interconexión a redes de alta velocidad,
- 2) Rápida transferencia de grandes bloques de datos,
- 3) Conmutación de conjuntos grandes de tráfico,
- 4) Proveer acceso de bajas velocidades en forma flexible hacia dispositivos de alta velocidad,
- 5) Además, en el futuro, los dispositivos electrónicos y ópticos deben permitir la adición de estaciones capaces de procesar datos a centenares de Gb/s.

Se asumen requerimientos heterogéneos de usuarios de la red, que soporten conexiones con ancho de banda a demanda y garantizado, conjuntamente con servicios de diferentes capacidades. Para servir a estos usuarios, la red debe proveer servicios punto a punto y servicios punto a multipunto.

Por ejemplo, para interconectar redes de 100 Gb/s sobre una área considerable, se requiere una red WAN con un ancho de banda muy grande, tal como una red totalmente óptica. La red AON es una red óptica WDM capaz de llevar muchos canales de 10 Gb/s a través de miles de kilómetros. En este caso se requerirían, 10 canales ópticos para el caso de conectividad completa de la red de 100 Gb/s.

Para efectuar la transmisión a través de la red AON, el medio de acceso debe realizar tres funciones. Primero, debe demultiplexar el flujo de 100 Gb/s en múltiples flujos de 10 Gb/s. Segundo, los pulsos cortos en cada uno de los flujos demultiplexados deben de ser ensanchados para la transmisión sobre área ancha. Tercero, el medio de acceso necesita ser capaz de asignar específicas longitudes de onda a cada flujo a ser transportado por la red WDM.

Para recibir datos de redes OTDM remotas, el medio de acceso debe realizar esencialmente el proceso inverso. Finalmente, en caso de transmisión digital, los paquetes deben estar sincronizados con el reloj principal de la red OTDM.

Los dispositivos clave que intervienen en el diseño de estas redes son transmisores ultrarrápidos, fuentes ópticas de pulsos ultracortos, fuente de compresión, recuperador de sincronización, convertidores de longitud de onda, etc. Algunos de los dispositivos sólo están disponibles en el laboratorio, por lo que en este trabajo se da énfasis a la propuesta más madura para redes totalmente ópticas, las redes basadas en WDM. No obstante, por la capacidad demostrada en experimentos de laboratorio de la propuesta OTDM es muy probable que sean estas redes quienes den el gran salto hacia las redes de la nueva generación.

3.2 Requerimientos generales para el diseño de redes WDM

En una red óptica WDM existen dos problemas a resolver. Estos problemas están estrechamente relacionados, pero generalmente se les trata por separado [20]. El primer problema es el diseño de la red. Las entradas a este problema son la demanda de tráfico de la red y, posiblemente una topología general de red. La salida o solución de este problema determina la configuración de la

red en términos del número de fibras ópticas, el tamaño de los conmutadores, amplificadores ópticos necesarios, multiplexores de inserción/supresión, etc.

Por otro lado, en la mayoría de casos prácticos, el número de longitudes de onda por fibra esta determinado por la tecnología, y es fijo. Si una sola fibra no es suficiente para llevar el tráfico existente en el enlace, se utiliza más fibras en el enlace. Por ello, una medida de la calidad del diseño es minimizar el número y la longitud de las fibras, el tamaño de los conmutadores, etc. La medida final del valor del diseño, por supuesto, es el costo de la red.

El segundo problema en redes WDM es la operación de la red. En este caso, para una red y una demanda dada, el enrutamiento y selección de longitud de onda se deben llevar a cabo. Típicamente, los valores promedios de demanda de tráfico son conocidos o predichos en función de cambios aleatorios de la demanda actual. También debe tomarse en cuenta la probabilidad de bloqueo, la cual es una medida de la calidad del enrutamiento y del algoritmo de selección de longitud de onda en la red.

Adicionalmente, en el diseño de una red es importante tener en cuenta no sólo la funcionalidad deseada de la red, sino también las capacidades y limitaciones de los componentes ópticos de red disponibles. Primero se describirá algunas de las restricciones físicas que deben ser consideradas.

3.2.1 Número de canales

Un factor importante a considerar en el diseño de una red WDM es el número de longitudes de onda a utilizar. En algunos casos puede ser deseable diseñar la red con el máximo número de canales posible sujeto a requerimientos de tiempo de sintonización y a limitaciones de costo. Otra manera es asignar una longitud de onda diferente a cada nodo, aunque este tipo de red no sería muy escalable. Frecuentemente el objetivo en redes WAN es minimizar el número de longitudes de onda para una topología de red o patrón de tráfico deseado. En todo caso, el máximo número de longitudes de onda esta limitado por la tecnología del dispositivo óptico. En primer lugar, el número de canales esta condicionado por el total de ancho de banda disponible o rango espectral de los componentes y el espaciamiento de canales. Algunos factores que afectan el espaciamiento entre canales son la tasa de transmisión por canal, la potencia de la fuente óptica, las no linealidades en la fibra y la resolución de transmisores y receptores.

Por ejemplo, si deseamos que cada canal tenga una tasa binaria de B Gb/s, se requiere $2B$ GHz de ancho de banda para la codificación. Por lo que el espaciamiento entre canales debe ser al menos seis veces la tasa de transmisión por canal para minimizar los efectos de diafonía en un sistema WDM. Es decir, si deseamos w canales, necesitamos

$$\Delta f = 2B \cdot w + 6B(w-1) \text{ GHz}$$

De modo que el máximo número de canales resolubles para esta red es

$$w = (\Delta f + 6B)/8B$$

Aunque se pueden acomodar un máximo de w canales, en algunos casos puede ser deseable usar un menor número de canales, por ejemplo en canales WDM para redes LANs.

Un número de canales alto otorga mayor capacidad de red pero resulta en altos costos, y en algunos casos podría requerir protocolos complicados.

3.2.2 Consideraciones de potencia

En cualquier red, para asegurar una detección fiable en el receptor es importante mantener una adecuada relación señal a ruido (SNR). En una red WDM, la potencia de la señal puede degradarse debido a pérdidas tales como la atenuación en la fibra, pérdidas por acopladores, etc. Una importante consideración en el diseño de redes WDM, es la apropiada localización de los amplificadores. Los amplificadores deben ser ubicados en lugares estratégicos de la red de tal modo de garantizar que todas las señales sean adecuadamente amplificadas, y a la vez minimizar el número total de los mismos.

Cuando se utiliza cascadas de amplificadores en línea, se debe tener en cuenta el ruido ASE introducido por los amplificadores, y la ganancia espectral desigual de los mismos. Efectivamente, la acumulación de ruido ASE en la cascada de amplificadores podría degradar seriamente la SNR; si la señal de entrada es demasiado baja, el ruido ASE puede causar que la SNR disminuya por debajo de niveles detectables; si la señal es demasiado alta, la señal combinada con el ruido ASE podría saturar los amplificadores. Por otro lado, la ganancia espectral desigual de los EDFAs limita el ancho de banda utilizable en sistemas WDM.

Desarrollos recientes en tecnología de amplificadores han resuelto muchos de los problemas de pérdidas de potencia y de ruido en redes ópticas. No obstante, los diseños de redes no deberían confiar exclusivamente en amplificadores para resolver consideraciones de potencia sin considerar antes otras opciones. Por ejemplo, para evitar pérdidas por dispersión en interconexión de redes, podría considerarse la utilización de dispositivos enrutadores de longitud de onda, tales como el conmutador enrutador de longitud de onda y el enrutador de rejilla guía onda, en lugar de dispositivos independientes de la longitud de onda como el conmutador amplificador de puertos o el acoplador estrella pasivo.

3.2.3 Consideraciones de diafonía

La diafonía puede causar interferencia de señales en diferentes longitudes de onda o interferencia de señales en la misma longitud de onda o con otra fibra. Hay dos tipos de diafonía, la diafonía incoherente y la diafonía coherente.

La diafonía incoherente esta relacionada con el espaciamiento entre canales. No es acumulativa al atravesar múltiples nodos. Para remover este tipo de diafonía es necesario utilizar filtros receptores de banda estrecha. La diafonía incoherente no introduce pulsación durante la detección de la señal.

La diafonía coherente ocurre en los nodos de conmutación, donde señales múltiples en la misma longitud de onda están siendo conmutados desde diferentes entradas a diferentes salidas. Este tipo de diafonía no es sencillo de remover por filtros y puede ser acumulativa. El grado de diafonía coherente depende en parte de las arquitecturas de nodos y de conmutación. Una manera de reducir este efecto es introducir adicionalmente filtros selectivos de longitud de onda dentro del nodo.

Debe tenerse en cuenta en el diseño que, dado que los enrutadores son dispositivos de características no ideales, su utilización aumenta la distorsión de la señal y la diafonía. La diafonía es una consideración de gran importancia que puede limitar el tamaño de la red debido a que ésta se acumula a través de los enrutadores.

La diafonía óptica impone el límite más importante a la aplicación práctica de redes ópticas interconectadas.

3.3 Tipos de demanda de tráfico

La demanda de tráfico puede ser estática cuando tiene patrones fijos o dinámica, cuando se tiene una demanda que no se rige a un patrón predeterminado.

3.3.1 La demanda de tráfico estática

En este caso, la demanda de tráfico está predeterminada y la red se diseña para llevar este tráfico. El problema es idéntico al diseño en redes de conmutación de circuitos cuando la red emplea exclusivamente convertidores de longitud de onda. Este problema puede ser formulado como un problema de programación lineal con diferentes funciones objetivo. Una alternativa de solución puede ser minimizar el número de longitudes de onda necesarias para transportar toda la demanda.

En el caso de una red grande sólo una pequeña fracción de los usuarios requiere conexiones activas en un instante de tiempo dado. El propósito de la red es permitir a estos usuarios compartir eficientemente los recursos de comunicaciones del sistema. Debido a la naturaleza estocástica de los requerimientos de comunicación, esta distribución se realiza más eficientemente por asignación a demanda de recursos de la red.

El primer paso en cualquier diseño de red es la caracterización de la demanda esperada de la red. Se añade seguidamente el estudio de los retardos en la red. Estas características permiten técnicas de manejo de tráfico en el nivel óptico. La performance es medida usando la probabilidad de bloqueo como función del tráfico ofrecido.

Una topología útil cuando se hace uso de enrutamiento estático es el gráfico Petersen. En la figura 3.1 se aprecia este gráfico. Para esta red en particular, hay 10 nodos y 15 enlaces.

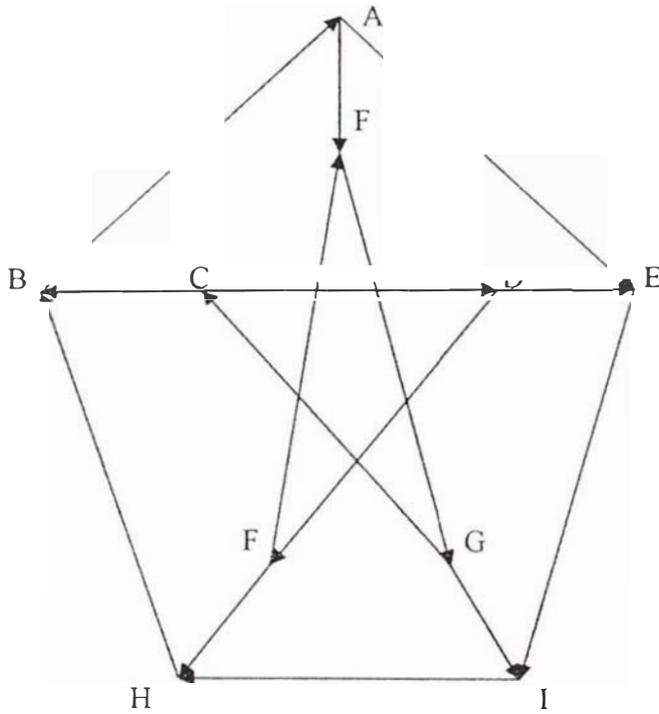


Figura 3.1 Gráfico de Petersen

Cada nodo tiene grado 3. La red posee diámetro $k = 2$, lo que significa que el número de los saltos entre un par de nodos no excede a 2. Es completamente simétrica. La probabilidad de bloqueo para requerimientos colectivos para una población finita de este tipo está gobernada por la distribución Enyset, que es también aproximada por la fórmula de bloqueo Erlang B para estaciones grandes.

Si asumimos un gran número de estaciones, se tiene dos consecuencias:

- 1) El uso de la fórmula Erlang B simplifica los cálculos.
- 2) Elimina los componentes extraños de probabilidad de bloqueo causados por requerimientos de conexión de estaciones ocupadas.

En el ejemplo, se requieren conexiones para las estaciones que accedan desde los diez nodos de la red. Si un requerimiento es aceptado comienza el estado activo de conexión por un periodo de tiempo exponencialmente distribuido. Si esta bloqueado, se retorna al estado inactivo por otro periodo de tiempo exponencialmente distribuido en el tiempo. Esto corresponde al modelo de “pérdida de llamadas”.

3.3.2 La demanda de tráfico dinámica

En el caso de demanda de tráfico dinámico se presenta dos consideraciones: Primero, puede ser necesario reconfigurar la red en respuesta a cambios en patrones de tráfico o falla en los enlaces/nodos. Segundo, con el aumento esperado en la demanda de tráfico debido a la introducción de nuevos servicios, se debe tener una red suficientemente flexible para que no sea desbordada por el incremento de tráfico.

Debido a que no están disponibles las estadísticas de tráfico de servicios inexistentes, todos los estudios que se presentan están basados en la presunción del proceso de arribo de Poisson. La medida de performance más frecuentemente utilizada para el problema de establecimiento dinámico de conexión, es la probabilidad de bloqueo. La creencia general de que los beneficios de la conversión de longitud de onda se incrementan considerablemente cuando la demanda es dinámica, esta parcialmente verificada por resultados en la literatura. En estos casos, la ganancia por conversión es mayor que en el caso de demanda estática. Sin embargo, la ganancia decrece rápidamente con el volumen de tráfico para la cual la red es diseñada.

3.4 Fases del diseño de una red de transporte

Antes de empezar el diseño debe de hacerse una decisión del tipo de red, arquitectura nodal y en la estratégica de restablecimiento. Esto determina el equipamiento que deberá ser usado en la red, tales como OADMs o OXCs, el tipo de anillos de protección, etc.

Una vez hecha esta elección, el diseño de la red puede empezar, el cual trata de dimensionar la red tal que sea capaz de encaminar todo el tráfico entre los nodos, tomando en cuenta ciertas restricciones, tales como la protección de la calidad de transmisión física, y asegurando que

pueda sobrevivir a escenarios de falla. Frecuentemente la fase de diseño se enfoca en un conjunto limitado de escenarios de falla (ej., solo fallas simples de enlace), aunque la supervivencia para mayor cantidad de escenarios de falla es deseada y apreciada.

En la fase de diseño, el objetivo principal es minimizar el costo (aunque el total de objetivos puede ser más complicado). Los parámetros de entrada para el proceso de diseño son la estructura de costo de la red y valores adecuados de costos. La figura 3.2 muestra un diagrama de bloques del proceso de planeamiento de la red.

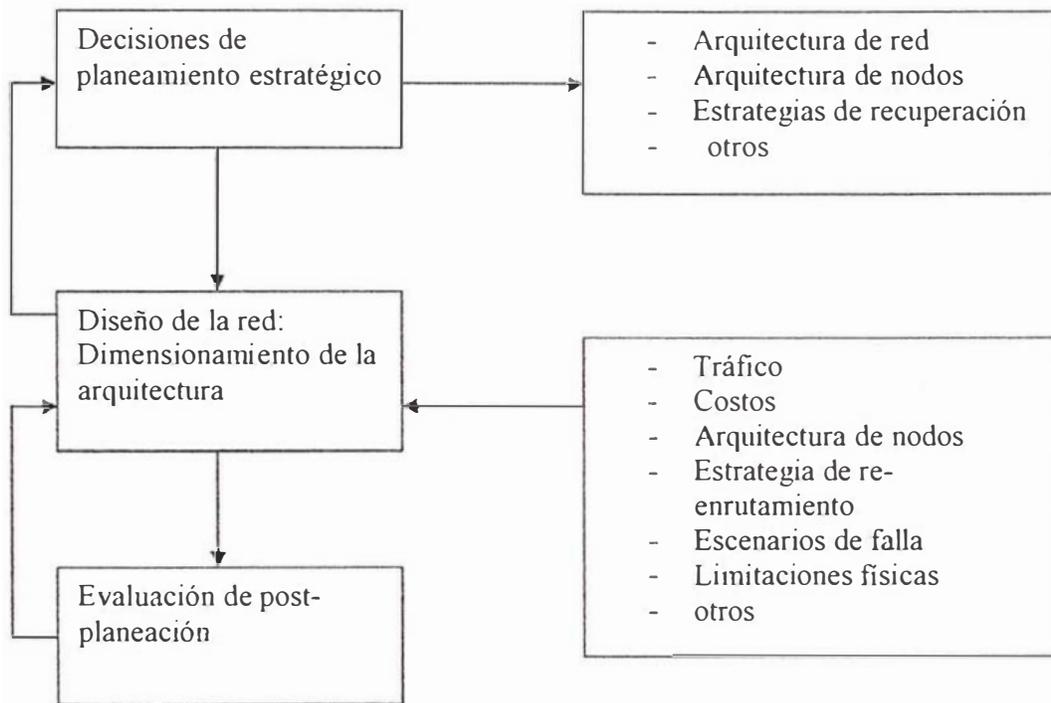


Figura 3.2 Diagrama de bloques del proceso de planeamiento de la red

La mayoría de problemas encontrados en el diseño de red, son problemas de optimización en las que las técnicas de la investigación de operaciones pueden ser usadas, tales como la programación lineal o técnicas de búsqueda heurísticas (ej., algoritmos genéticos). Los heurísticos nos dan soluciones que si bien no óptimas, al menos son buenas soluciones en el menor tiempo posible.

Dependiendo de la complejidad del problema y de optimización requerida, pueden ser realizadas las diferentes tareas de planeamiento en etapas consecutivas, o en una propuesta integrada. Mientras que una propuesta secuencial puede manejar el problema dentro de un aceptable esfuerzo computacional, la propuesta integrada puede producir un mejor resultado final. Una propuesta integrada puede ser implementada resolviendo los diversos problemas mediante un algoritmo integrado o usando un algoritmo que internamente haga una descomposición del problema principal en múltiples fases pero con fuerte realimentación e interacción, resuelto por iteración, y así al final dar una solución optimizada para todas las fases.

En la fase de post-planeación, se puede realizar una evaluación más prolija del diseño de red, tal como un análisis del comportamiento de la red para escenarios de fallas no considerados y condiciones de tráfico dinámico. Así, podemos medir la sensibilidad del diseño de la red a fluctuaciones en los parámetros de entrada. A la fase de evaluación puede seguir una realimentación al proceso de diseño para adaptar la red y se logre un mejor rendimiento en la próxima iteración.

En el caso de diseñar una red WDM nuestro principal objetivo será siempre la minimización del costo de la misma dada una arquitectura de red elegida, suministrando enrutamiento de la demanda de tráfico y asegurando que la red sobreviva en caso de aparición de fallas.

Debido a la complejidad del diseño de una red completa, este se subdivide en un número de fases de diseño.

Etapa I: Análisis de la demanda de tráfico

El conocimiento del tráfico futuro de la red es una consideración importante si uno desea lograr un diseño de red eficiente. Infortunadamente, en aplicaciones prácticas la información disponible para el planificador es usualmente escasa. En este caso la distribución de tráfico debe de ser estimada en forma aproximada.

Entrada

Topología física

Consideraciones

Matriz de tráfico: Estimación del tráfico a originado y terminado en cada nodo y las relaciones de tráfico entre cada par de nodos.

Proyección: Evolución de las relaciones de tráfico, nuevas áreas de tráfico, modificación de la importancia de las áreas.

Etapa 2: Arquitectura de red

Entradas

Topología física: Localización de los nodos e interconexiones de nodos

Matriz de tráfico

Se divide la red en algunas jerarquías o áreas de administración y capas con similar tecnología. El objetivo de este paso es determinar: Partición en los nodos por jerarquía y capa.

Topología de red por jerarquía y capa (enlaces, malla, anillos)

Para cada demanda de tráfico debe de encaminarse a través de algunas capas, identificar las capas que transporta la demanda y seleccionar los nodos en los que la demanda de tráfico es conmutada desde una capa a o otra.

Etapa 3: Diseño de red y dimensionamiento de las capas

Esta etapa esta enfocada al diseño topológico de cada jerarquía y de cada capa identificada en la red considerada. Al final de esta etapa el dimensionamiento de la red estará completado: Es decir, tienen que proveerse los recursos de la red tales como cables, fibras, multiplexores, nodos de conmutación, etc.

Etapa 4: Análisis de disponibilidad

Se realiza un análisis de disponibilidad de en cada conexión extremo a extremo, con la idea de identificar aquellas conexiones que no cumplen con las condiciones iniciales de disponibilidad. Una vez que un incumplimiento de las condiciones ha sido identificado, el planificador puede rediseñar la red, o modificar los esquemas de enrutamiento de alguna de las conexiones, para encontrar las condiciones de disponibilidad requeridas.

Etapa 5: Alternativas de análisis

Al final de la etapa 4, el planificador tiene formulado un número factible de tecnologías y soluciones de red alternativas cuasi-óptimas. Estas alternativas son comparadas una a otra para determinar la solución más beneficiosa. Entre los criterios que se pueden tomar en cuenta para determinar la mejor solución se tiene:

Costo de la red: Cálculo del costo de la red basado en el equipamiento necesario

Disponibilidad de las conexiones terminal a terminal

Escalabilidad: Análisis de performance de la red cuando el tráfico se incrementa en algunas conexiones.

Flexibilidad: Cuando hay variaciones de tráfico, en términos de cantidad y distribución. En este caso la red debería ser lo suficientemente flexible para ajustarse a estos cambios de patrones de tráfico.

3.5 Enrutamiento por longitud de onda

Una red WDM encaminada por longitud de onda se muestra en la figura 3.3. La red consiste de un conmutador fotónico, que contiene conmutadores activos conectados por enlaces de fibra para formar una topología lógica arbitraria. Cada usuario final está conectado a un conmutador activo mediante un enlace de fibra. Cada nodo (o estación de acceso) está equipado con un conjunto de transmisores y receptores, los cuales son sintonizables a determinadas longitudes de onda.

El mecanismo básico de comunicación en una red óptica encaminada por longitud de onda (WRON) es la ruta óptica. En dicha red, la trayectoria de la señal está determinada por la longitud de onda, el origen de la señal y los estados de conmutación de la red. Por ejemplo, en la figura 3.3 se han establecido rutas ópticas entre los nodos A y C sobre la longitud de onda λ_1 , entre B y F sobre la longitud de onda λ_2 , y entre H y G sobre la longitud de onda λ_1 . La ruta óptica entre los nodos A y C es encaminada mediante los conmutadores 1, 6 y 7.

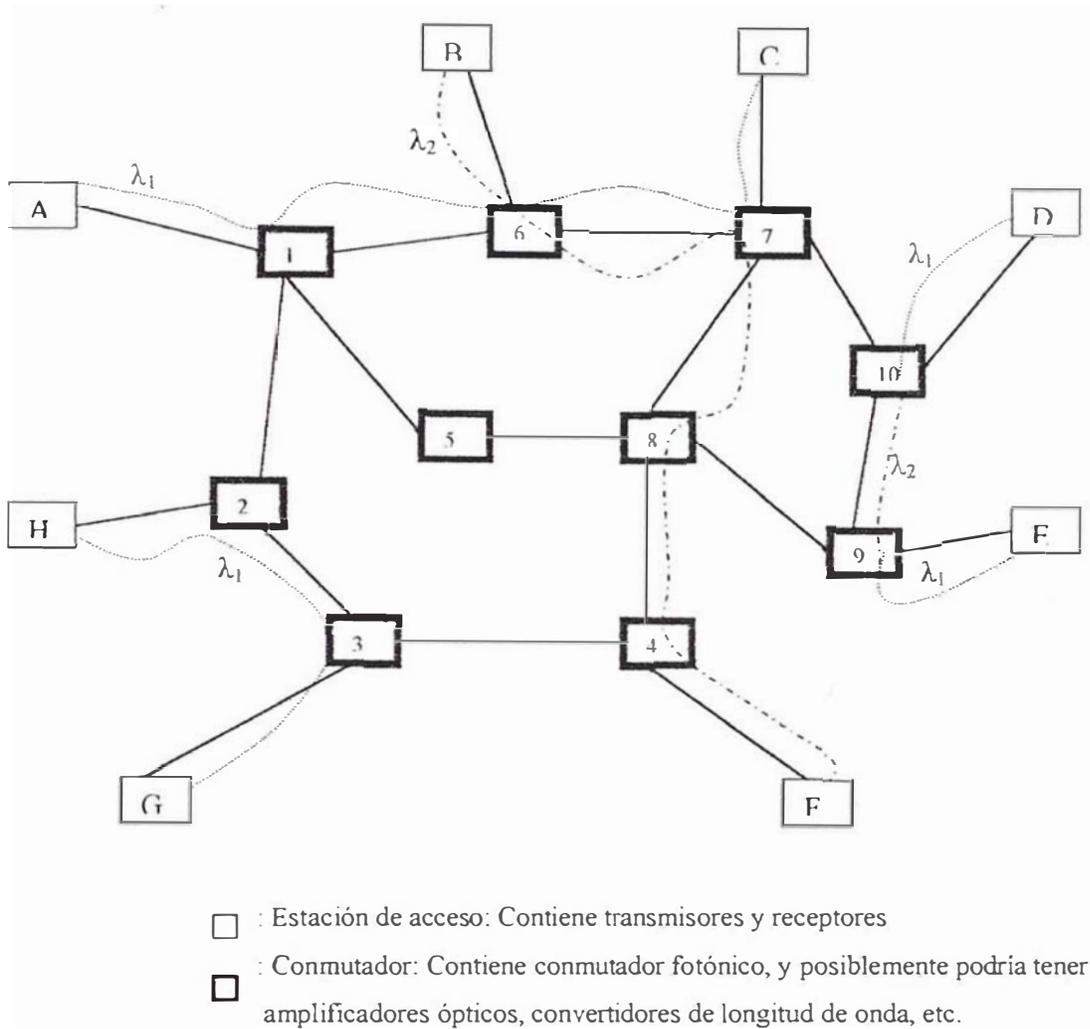


Figura 3.3 Red encaminada por longitud de onda [20]

En la ausencia de un convertidor de longitud de onda, una ruta óptica requiere la misma longitud de onda a lo largo de su trayectoria en la red; este requerimiento no es necesario si se tiene en la red convertidores de longitud de onda. Por ejemplo, en la figura Z, la ruta óptica entre los nodos D y E atraviesan el enlace de fibra des el nodo D al conmutador 10 sobre la longitud de onda λ_1 , se convierte a la longitud de onda λ_2 , saliendo reconvertida de nuevo a λ_1 en el conmutador 9 para enrumbar hacia E sobre esta longitud de onda.

El requerimiento fundamental en una red óptica encaminada por longitud de onda es que si dos o más rutas ópticas atraviesan el mismo enlace de fibra, deben de realizarlo sobre canales de longitud de onda diferentes para evitar la interferencia de uno respecto del otro canal.

Las redes ópticas WDM encaminadas por longitud de onda representan una de las soluciones más prometedoras para aplicaciones de alta capacidad. La mayor ventaja operacional de las WRON's se logra debido a la escasa necesidad de traslación de longitud de onda o de conmutación en los nodos intermedios, simplificando así la administración de cabeceras, y la determinación de una topología lógica simple de un sólo salto.

La implementación de las redes ópticas encaminadas por longitud de onda depende del número de longitudes de onda requeridas para satisfacer una conectividad lógica y una demanda de tráfico dada. El parámetro más crítico en estas redes es la topología lógica, debido a que esto determina la localización de las rutas ópticas.

3.5.1 El problema de enrutamiento y de asignación por longitud de onda

En una red con N nodos, si cada nodo esta equipado con $N-1$ transceptores (transmisores y receptores) y si hay suficientes canales de longitud de onda para todos los enlaces de fibra, entonces cada par de nodos podrían estar conectados por una ruta totalmente óptica, y no habría ningún problema de enrutamiento que resolver. No obstante, si la red necesita ser escalable se debe tener en cuenta que los transceptores son costosos y de que cada nodo necesitaría estar equipado con algunos de ellos. Además, las restricciones tecnológicas limitan el número de canales de longitud de onda que pueden ser soportados por una fibra a W (actualmente en el orden de algunas decenas). Por lo tanto, sólo un número limitado de rutas ópticas pueden ser fijadas en la red.

Sobre tal red dada, el problema de enrutamiento sería que, dado un conjunto de rutas ópticas que necesitan ser establecidas en la red, y dado un número limitado de longitudes de onda, determinar

las rutas sobre las que estarían establecidas y también determinar las longitudes de onda que deberían de ser asignadas a estas rutas ópticas, de manera de maximizar el número de rutas ópticas a ser establecidas. Debido a que no se pueden establecer rutas ópticas donde existan canales de longitud de onda bloqueados (por efecto de la restricción de continuidad de longitud de onda), el problema de optimización de la red es minimizar la probabilidad de bloqueo en la red.

En este tipo de red, dos rutas ópticas que comparten un mismo enlace de fibra no deben tener asignada la misma longitud de onda en ese tramo de fibra. No obstante, si el nodo posee convertidores de longitud de onda, entonces el requisito de continuidad de longitud de onda desaparece, debido a que a una de las rutas se le podría modificar la longitud de onda.

Este problema mencionado es conocido como el problema de enrutamiento y de asignación de longitud de onda (RWA), el cual ha sido estudiado por diferentes investigadores, quienes combinaron técnicas prestadas de matemáticas discretas, teoría de grafos y combinatoria con aplicación de los principios de la comunicación óptica [21]. En muchos casos las formulaciones del problema fueron demasiado complejas como para ser resueltas analíticamente o usando métodos de programación lineal entera, por lo que se requirió de la formulación de algoritmos heurísticos para resolverlos.

En la práctica, se debe de reservar capacidad en los enlaces para la restauración. En caso de que un enlace falle, todo el tráfico de servicios que usa ese enlace deberá de ser reenrutado a través de la red [22]. Esto complica la forma original del problema RWA que puede volverse aún más complejo al hacer intervenir consideraciones de análisis de costos [23], de fibras múltiples [24], de enrutamiento de paquetes [25], de enrutamiento de paquetes asíncronos y de longitud variable [26], etc.

3.6 El problema del árbol de mínima expansión

En este problema se trata de determinar la red de menor longitud que una todos los nodos de la misma. Las entradas del problema son las distancias entre cada par de nodos. Dada la matriz de distancias debemos de determinar los enlaces apropiados para minimizar la longitud total de la red. En los problemas de optimización es muy útil valernos de un software de apoyo. En este caso se empleará LingoTM. En Lingo, se modela este problema como una variante del problema del transporte. Como ejemplo de ilustración se utilizará el caso de una red con cinco ciudades (ej., Atlanta, Chicago, Houston, los Angeles y Montreal), el cual se puede plantear como sigue:

```
MODEL:
!Dado un conjunto de nodos y la distancia entre ellos, encontrar la distancia
mínima total de enlaces en la red para conectar todos los nodos. Este modelo
encuentra la red de costo mínimo para conectar cinco ciudades (o nodos)
Atlanta, Chicago, Houston, Los Angeles (LA), y Montreal;

SETS:
    CITY / ATL CHI HOU LA MON/: LVL;
!LVL( I)      = nivel de la ciudad I;
    LVL( 1)   = 0;
    LINK( CITY, CITY):
        DIST, ! La matriz de distancias;
        X;    ! X( I,J) = 1 si usamos el enlace I, J;
ENDSETS
DATA:
        ! La matriz de distancias no necesita ser simétrica;
        La ciudad 1 es la base del árbol;

        !desde Atl  Chi   Hou   LA   Mon ,
DIST -   0   702   842  2396  1196 !desde Atlanta;
         702   0   1093  2136   764 !desde Chicago;
         842  1093   0  1616  1857 !desde Houston;
        2396  2136  1616   0  2900 !desde LA;
        1196   764  1857  2900   0;!desde Montreal;

ENDDATA
!-----;
!Tamaño del modelo: Este modelo podría ser lento para N > 8;
N = @SIZE( CITY);
!El objetivo es minimizar la distancia total de los enlaces;
MIN = @SUM( LINK: DIST * X); !Para la ciudad K, excepto la base,
@FOR( CITY( K)| K #GT# 1: ! Debe ser entera;
    @SUM( CITY( I)| I #NE# K: X( I, K)) = 1;
!Si hay un enlace desde J-K, entonces LVL(K)=LVL(J)+1;
@FOR( CITY( J)| J #NE# K:
    LVL( K) >= LVL( J) + X( J, K)
    - ( N - 2) * ( 1 - X( J, K))
    + ( N - 3) * X( K, J); );
LVL( 1) = 0; ! Ciudad 1 tiene nivel 0;
!Hay un arco que sale desde la ciudad 1;
```

```

@SUM( CITY( J) | J #GT# 1: X( 1, J) ) >= 1;
!Hacer las X's variables binarias 0/1;
@FOR( LINK: @BIN( X); );
@FOR( CITY( K) | K #GT# 1:
    @BND( 1, LVL( K), 999999);
    LVL( K) <= N - 1 - ( N - 2 ) * X( 1, K); );
END

```

La solución al problema usando Lingo es:

```

Global optimal solution found at step:           53
Objective value:                               3924.000
Branch count:                                  0

```

Variable	Value
N	5.000000
LVL(ATL)	0.000000
LVL(CHI)	1.000000
LVL(HOU)	1.000000
LVL(LA)	2.000000
LVL(MON)	2.000000
DIST(ATL, ATL)	0.000000
DIST(ATL, CHI)	702.0000
DIST(ATL, HOU)	842.0000
DIST(ATL, LA)	2396.000
DIST(ATL, MON)	1196.000
DIST(CHI, ATL)	702.0000
DIST(CHI, CHI)	0.000000
DIST(CHI, HOU)	1093.000
DIST(CHI, LA)	2136.000
DIST(CHI, MON)	764.0000
DIST(HOU, ATL)	842.0000
DIST(HOU, CHI)	1093.000
DIST(HOU, HOU)	0.000000
DIST(HOU, LA)	1616.000
DIST(HOU, MON)	1857.000
DIST(LA, ATL)	2396.000
DIST(LA, CHI)	2136.000
DIST(LA, HOU)	1616.000
DIST(LA, LA)	0.000000
DIST(LA, MON)	2900.000
DIST(MON, ATL)	1196.000
DIST(MON, CHI)	764.0000
DIST(MON, HOU)	1857.000
DIST(MON, LA)	2900.000
DIST(MON, MON)	0.000000
X(ATL, ATL)	0.000000
X(ATL, CHI)	1.000000
X(ATL, HOU)	1.000000
X(ATL, LA)	0.000000
X(ATL, MON)	0.000000
X(CHI, ATL)	0.000000
X(CHI, CHI)	0.000000
X(CHI, HOU)	0.000000
X(CHI, LA)	0.000000
X(CHI, MON)	1.000000
X(HOU, ATL)	0.000000

X (HOU, CHI)	0.0000000
X (HOU, HOU)	0.0000000
X (HOU, LA)	1.0000000
X (HOU, MON)	0.0000000
X (LA, ATL)	0.0000000
X (LA, CHI)	0.0000000
X (LA, HOU)	0.0000000
X (LA, LA)	0.0000000
X (LA, MON)	0.0000000
X (MON, ATL)	0.0000000
X (MON, CHI)	0.0000000
X (MON, HOU)	0.0000000
X (MON, LA)	0.0000000
X (MON, MON)	0.0000000

Los enlaces a establecerse son donde la variable X toma el valor “1”:

Atlanta a Chicago, Atlanta a Houston, Chicago a Montreal y de Houston a Los Angeles.

Cuando el número de nodos en la red crece, un método para simplificar los cálculos consiste ya no en optimizar la mejor solución, sino buscar mediante un algoritmo heurístico una solución práctica, aunque no necesariamente la óptima. Un método general para determinar la red de distancia mínima se trata en el Apéndice C.

3.7 Conectividad

Varias topologías han sido propuestas como conectividades ópticas. Una propone usar un bus o acoplador estrella, esto requiere la utilización de gran número de longitudes de onda y consecuentemente el uso de una longitud de onda compartida en el tiempo.

Otra propuesta sugiere usar una conectividad de fibra idéntica a la conectividad óptica. Esto simplifica la asignación de longitud de onda pero requiere un número excesivo de enlaces de fibra. Una alternativa aceptable es usar una arquitectura de red escalable de salto múltiple, usando un anillo como la topología de fibra. Las razones son,

- a. Primero, los anillos son expansibles y sólo requieren un control simple tanto de software como de interfaces,
- b. Segundo, hay varios estándares para construir sobre anillos, tales como Token Ring y FDDI.

Este diseño tiene tres ventajas,

- 1) La red óptica de lazo múltiple posee un pequeño diámetro.
- 2) El enrutamiento puede ser adaptado a la distribución de tráfico, pasando por alto canales ópticos ocupados y reduciendo significativamente la probabilidad de bloqueo,
- 3) Existe un algoritmo óptimo para minimizar el número de longitudes de onda utilizadas.
- 4) Se necesitan un pequeño número de longitudes de onda para lograr el escalamiento hacia un nuevo tamaño de red.

En este diseño, una red consiste de un sistema de nodos de acceso e interfaces ópticas, que son conectadas a un anillo mediante fibras. Cada interfase óptica es completamente pasiva, las funciones de control son externas y residen en estaciones de acceso en las que se mantiene la operabilidad del sistema.

Sea r el número de transceptores en cada nodo de acceso a la red, N el número de nodos de acceso a la red, S la tasa binaria de cada transceptor, C la capacidad agregada de la red, definida como la tasa binaria del tráfico de arribo a ser inyectado a la red desde los usuarios vía nodos de acceso a la red. La capacidad promedio de la red por transmisor por nodo C_t esta definida como la tasa binaria de nuevo tráfico de arribo a ser inyectada en unos nodos.

$$C = C_t \times r \times N$$

La máxima tasa de transmisión a través de la red es $r \times S \times N$.

De esta capacidad de transmisión, una parte es usada para nuevos arribos y otra parte para volver a poner en tráfico a los datos que arriban. Sea E_{arg} el número promedio de saltos ópticos para una celda ATM desde una fuente hacia su destino. Cada salto óptico consume una porción de la tasa binaria total, entonces, cuando las cargas en los enlaces ópticos son balanceadas se tiene,

$$C = (r \times S \times N) / E_{arg} = S / (e_{arg})$$

Donde $e_{arg} = E_{arg} / (r \times N)$ representa el número promedio de veces que un enlace óptico es usado por una particular celda ATM. Cuando las cargas y los enlaces no están balanceados, cualquier enlace óptico que tenga la carga más pesada se convierte en un cuello de botella y limita la capacidad de la red.

Sea, $e_{\text{cuello de botella}}$ la probabilidad que un enlace sobrecargado sea usado por una celda particular ATM.

La capacidad de la red para asegurar que no sea bloqueada será,

$$C = S / (e_{\text{cuello de botella}})$$

En una red de enlace múltiple, cada nodo de acceso recibe celdas de todos los canales entrantes y retransmite las celdas ATM no destinadas al usuario en este nodo.

La conectividad óptica es un anillo de lazo múltiple en la que cada salto óptico equivale a un salto de fibra. Bajo esta arquitectura, cuando el tamaño de la red crece no puede incrementarse la capacidad agregada de la red.

La performance de bloqueo de redes de transporte WDM ha sido también estudiada por Karasan y Ayanoglu [27] cuando la demanda de tráfico es en lotes. En este estudio, las conexiones existentes en la red son habilitadas para soportar un gran número de conexiones que llegan dentro de un nuevo lote. De este modo, el número de conexiones bloqueadas en una red malla de 30 nodos se reduce en un orden de magnitud si esta es reconfigurada cada vez que arriba un lote. La probabilidad de bloqueo con o sin convertidores de longitud de onda es muy pequeña si se utiliza la reconfiguración óptima de la red. No obstante, la ventaja de los convertidores de longitud de onda se incrementa cuando no hay receptores ni transmisores sintonizables en el sistema.

3.8 Arquitecturas de nodos

La manera en que se realiza el tratamiento en los nodos de las longitudes de onda entrantes para obtener las salidas constituye la arquitectura del nodo. La misma que puede ser realizada de distintas formas. Se presenta sucintamente las 4 arquitecturas de nodos más conocidas:

- 1) WT-OXC (Wavelength Translating Optical Cross-connect): En esta arquitectura, la longitud de onda de la conexión óptica entrante puede ser convertida en cualquier otra longitud de onda hacia la conexión de salida. El problema de enrutamiento en estos nodos está bastante simplificado, dado que cualquier par de longitud de onda-fibra puede ser seleccionado para el enrutamiento de la conexión entrante.

- 2) WR-OXC (Wavelength Routing Optical Cross-connect): En este caso la conversión de longitud de onda no está disponible, de modo que la longitud de onda de la conexión entrante debe de mantenerse sin cambio en la conexión de salida. En esta arquitectura solo es factible seleccionar la fibra de salida.
- 3) OADM (Optical Add Drop Multiplexer): La conversión de longitud de onda no está disponible en este nodo y una longitud de onda puede ser o bien adicionada o suprimida, o ser permitida de continuar a través del nodo. Las longitudes de onda en la misma fibra pueden ser independientemente manejadas, ej, algunas longitudes de onda pueden ser suprimidas o adicionadas, o en algunos casos pueden pasar sin modificación.
- 4) F-OXC (Fiber Optical Cross-connect): Similar a la OADM con la condición adicional de que todas las longitudes de onda en la misma fibra deben de ser manejadas juntas: Es decir, todas las longitudes de onda de la misma fibra deben de ser o extraídas o adicionadas o permitirles atravesar sin cambio.

Como una ilustración simple, los OADMs pueden ser usados en los anillos, mientras que los OXCs podría ser utilizados para la interconexión de los anillos. Por el contrario, en una red malla sólo pueden ser empleados los nodos OXCs.

3.9 Consideraciones adicionales

Otras consideraciones en el diseño de redes WDM incluyen cuestiones de dispersión y arquitectura. La dispersión en un sistema de comunicación óptica causa la dilatación de un pulso así como su propagación a lo largo de la fibra. Este efecto limita el espaciamiento entre bits y con esto se limita la máxima tasa de transferencia para una distancia de propagación dada. Asimismo, limita la máxima distancia a una capacidad de transmisión dada. Además de las consideraciones de dispositivos antes mencionadas, existen otras en el diseño de una red WDM; por ejemplo, la topología de la fibra física enterrada en el suelo puede influenciar en la elección de que pares de transmisor-receptor van a operar y en que longitudes de onda. La necesidad de tolerancia a fallas y fiabilidad afecta la elección de la arquitectura de la red.

3.9.1 Productividad en las redes WDM

La productividad total de un sistema WDM, asumiendo la misma capacidad para todos los canales, es el producto del número de canales N por la tasa de canal R .

Una alternativa para incrementar la productividad consiste en aumentar R , pero esto es rápidamente contrarrestado por los efectos físicos.

La principal limitación de la velocidad en la fibra es la dispersión cromática. Para superar esta limitación, el manejo de la dispersión debe ser considerado.

La segunda limitación es el modo de polarización de dispersión (PMD), al igual que el caso anterior, este efecto limita la transmisión en una relación inversamente proporcional a R^2 .

Teniendo en cuenta que las actuales fibras de transmisión tienen valores de PMD bajos (típicamente $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{K.m}}$), la distancia de transmisión es limitada más que por el PMD, por la dispersión cromática.

La tercera limitación son las no linealidades de la fibra. Está demostrado que para idéntica productividad, potencia de salida total y ancho de banda, el impacto de las no linealidades de la fibra es mayor para un sistema con un valor grande de R . Por otro lado, aumentar el valor de R significa aumentar la velocidad, lo que hace más complejos y costosos los componentes O/E usados en la transmisión.

Para obtener la misma productividad, la segunda propuesta consiste en incrementar el número de canales N . En este caso, el parámetro limitante es el ancho de banda disponible B , que está definido por la ganancia de ancho de banda de la cascada de amplificadores ópticos entre dos regeneradores a lo largo del enlace.

Al incrementar el número de canales, el espaciamiento entre canales δ será pequeño. Además de los limitantes y condicionamientos físicos en transmisores y filtros, el valor pequeño de δ tiene como resultado el aumentar los efectos no lineales (XPM y FWM). Por lo tanto, un significativo incremento en la capacidad de la fibra tiene que realizarse a través de la provisión de una gran ganancia de ancho de banda de amplificación.

3.9.2 Estrategias para mejorar la capacidad de transmisión de las redes AON

- **Control de la dispersión**

La dispersión de un pulso esta relacionada con la amplitud del mismo. La dispersión se convierte en un problema para el receptor cuando excede el 70 % de la longitud del pulso. Así, por ejemplo, si en un enlace un pulso a 600 Mbps se dispersa un 15 %, entonces el sistema probablemente trabaje. Pero, si la tasa de transmisión se duplica a 1.2 Gbps la dispersión será de 30 % y el sistema probablemente ya no trabajará. Por ello es que el control de la dispersión se vuelve una consideración muy importante en enlaces de alta velocidad.

En la fibra monomodo la dispersión modal no existe, por lo que el control de la dispersión debe centrarse en el control de la dispersión material y el de guía de onda que pueden llegar a ser significativos. A finales de los 1980's se diseñaron fibras de modo que ambas formas de dispersión se cancelen una con la otra a una longitud de onda de 1310 nm. Por dicha razón, la banda de 1300 nm fue la ventana de transmisión más utilizada para transmisiones de larga distancia. No obstante, la atenuación en la banda de 1300 nm es el doble que a 1500 nm, y algo más crítico aún, los EDFA's solo trabajan en la banda de 1500nm.

Se plantearon algunas alternativas para la reducción de la dispersión de guía de onda (tales como la variación del índice de refracción del núcleo y la modificación de la geometría de la fibra) y ahora es posible balancear ambas formas de dispersión a 1500 nm, por ejemplo mediante el uso de la fibra de dispersión modificada a lo largo del enlace de transmisión en lugar de las convencionales fibras monomodo. Este tipo de fibras (Dispersion Shifted Fiber) DSFs, tienen su punto de dispersión cero localizado cerca de 1550 nm, posibilitando una transmisión con mínimas pérdidas en régimen de ganancia EDFA [28]. En el Apéndice A.1.2 se trata algunos tipos de fibras para transmisión disponibles en el mercado.

No obstante, aunque las pérdidas son despreciables, un canal único o múltiples canales cerca del punto de dispersión cero experimentarán los efectos FWM sobre la transmisión. Para solucionar esto, se puede usar dos tipos diferentes de fibras, en una de ellas se tendría dispersión positiva y en la otra dispersión negativa para alguna particular longitud de onda.

Después de cierta distancia la dispersión acumulada total es cero, pero el parámetro de dispersión absoluta por unidad de longitud no es cero. El resultado de este esquema es que el efecto de dispersión es despreciable para alguna longitud de onda, y lo que es más importante, la dispersión absoluta no es cero, con lo que se debilita la producción del FWM.

Otra manera de minimizar la dispersión es usar un láser de muy estrecho ancho espectral. A velocidades de transmisión muy grandes se vuelve un factor crítico la dispersión PMD, la misma que podría ser controlada en parte, mediante el uso de fibras de distinta polarización y de respuesta no lineal. En la figura 3.4 se muestra el efecto de dispersión PMD.

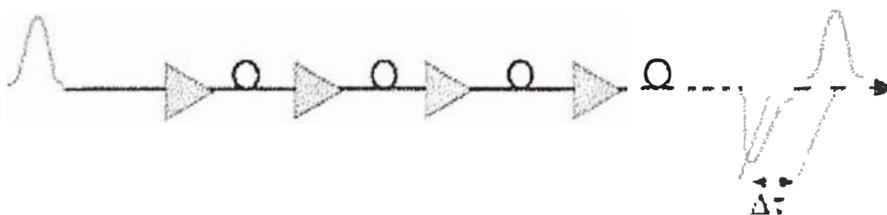


Figura 3.4 La dispersión PMD

- **Métodos para la reducción de la diafonía**

Uno de los factores que impiden que las redes ópticas WDM utilicen el vasto ancho de banda proveído por las fibras ópticas es que la densidad de canal en las redes WDM está limitada por la diafonía de los canales adyacentes. Para reducir la diafonía se debe mejorar las técnicas de diseño y de fabricación de los elementos ópticos de la red. Una alternativa es usar un esquema para el monitoreo y cancelación de la diafonía, el cual está formado por filtros pasabanda [79]. En este aspecto, los sistemas ópticos TDM han demostrado tener ventajas de baja diafonía y alta sensibilidad.

- **Arquitecturas apropiadas para reducir la diafonía**

- **Dilatación espacial**

Un problema básico de cualquier conmutador 2 x 2 es la porción de señal de entrada que no es encaminada al puerto deseado, lo cual contribuye a aumentar la diafonía. Un modo para reducir la diafonía es “dilatar” el conmutador, es decir, expandir la arquitectura del conmutador de modo

que la porción de señal no encaminada correctamente pueda interferir con los otros puertos de salida. La dilatación es bastante utilizada en los conmutadores espaciales. Sin embargo, esta dilatación es lograda al costo de adicionar un número significativo de elementos de conexión, con lo que se incrementa la complejidad y el costo.

Una solución para este problema es simplificar el enrutamiento, es decir, una arquitectura de interconexión que reduzca el número posible de rutas para alguna señal hacia un puerto de salida dado.

- Expansión de longitud de onda

Una segunda alternativa para reducir la diafonía es el uso de expansión de longitud de onda, la que fue originalmente propuesta como un modo de mejorar la performance de los filtros acústico-óptico sintonizables.

Un conmutador expansor de longitud de onda es un tipo de conmutador en el que el conjunto inicial de longitudes de onda está dividido en dos o más grupos de longitudes de onda, diseñadas para maximizar la distancia entre vecinos dentro de un grupo dado. Cada uno de estos subconjuntos es entonces conmutado en conectores cruzados separados. Incluso la más simple forma de expansión divide los canales de longitud de onda en dos conjuntos, y así dobla la distancia entre canales conmutados en un conmutador dado, suministrando mejora substancial en los diversos tipos de diafonía.

- Reducción de la interacción intercanal en la conmutación multicanal

Existen algunos métodos para reducir las interacciones entre canales que incrementan la diafonía. Uno de ellos es a través del diseño de dispositivos y otro, del diseño de arquitecturas de conmutación. Dado que las interacciones entre canales son inevitables incluso en el mismo AOTF, ¿cómo podemos eliminar su efecto? Una alternativa de solución consiste en la utilización de dos filtros AOTFs tipo pasabanda en el mismo espacio ocupado por uno. Con esto, debido a la proximidad de canales pueden ser conmutados con una pequeña interacción. Así se reduce la interacción canal a canal debido a la presencia simultánea de más de una onda acústica, aunque los canales todavía podrían interactuar vía sus lóbulos laterales.

Capítulo 4

Protección y restauración de redes AON

Las redes totalmente ópticas son consideradas una verdadera promesa para la nueva generación de redes de transporte, dado que ellas pueden satisfacer en forma económica la creciente demanda de ancho de banda. No obstante, es necesario darle seguridad al sistema ante una eventual caída del mismo. En este capítulo se discutirá los problemas de diseño tanto en topología y asignación de recursos físicos para mantener la supervivencia de la red, indispensable para que las redes WDM puedan soportar una gran cantidad de tráfico [30].

La gran capacidad en ancho de banda de los sistemas WDM totalmente ópticos hace a esta red vulnerable, por ejemplo en el caso del rompimiento del cable. Una gran cantidad de información podría ser afectada, lo que hace necesario una rápida y eficiente restauración. Para mantener la comunicación a pesar de la rotura de un cable, se requiere capacidad de reserva en los restantes enlaces, junto con una bien elegida estrategia de restauración. Es interesante considerar alguna clase de protección automática, dado que esta puede reaccionar muy rápidamente en caso de una falla y asimismo tiene una implementación simple.

Consideremos la figura 4.1, en la que la topología virtual parece ofrecer adecuada redundancia entre los conmutadores. Asumiendo que falle la ruta óptica c_6 , el tráfico entre B y C puede volverse a encaminar a través de la ruta alternativa $P_2(c_4, c_5, c_3)$.

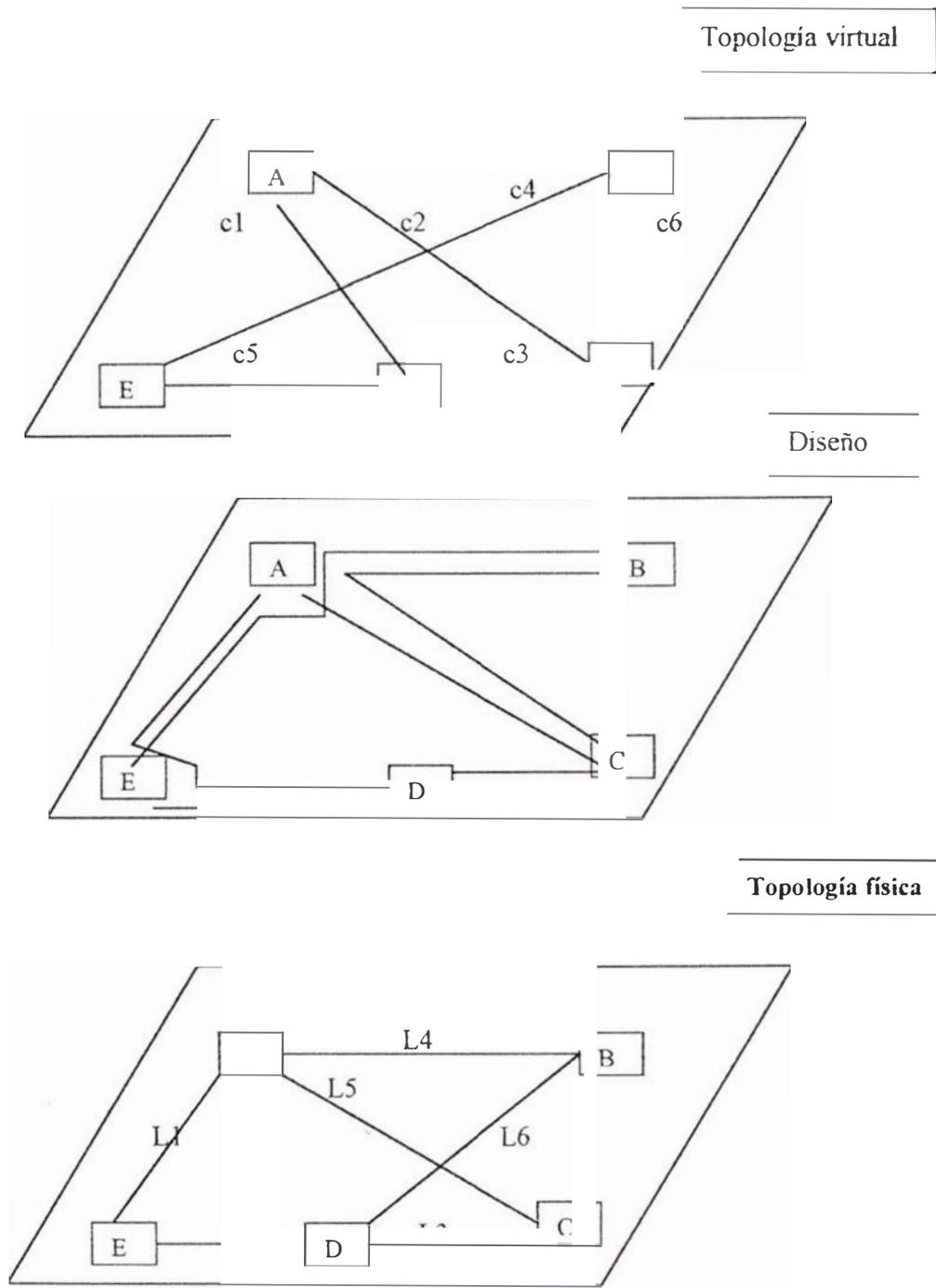


Figura 4.1 Modelo de Topología sin adecuada protección.
 La ruta óptica c6 usa los enlaces ópticos L4 y L5. Existe la ruta de salto único P1 = c6 entre B y C, así como las alternativas de salto múltiple P2 = (c4, c5, c3) y P3 = (c4, c5, c1, c2).

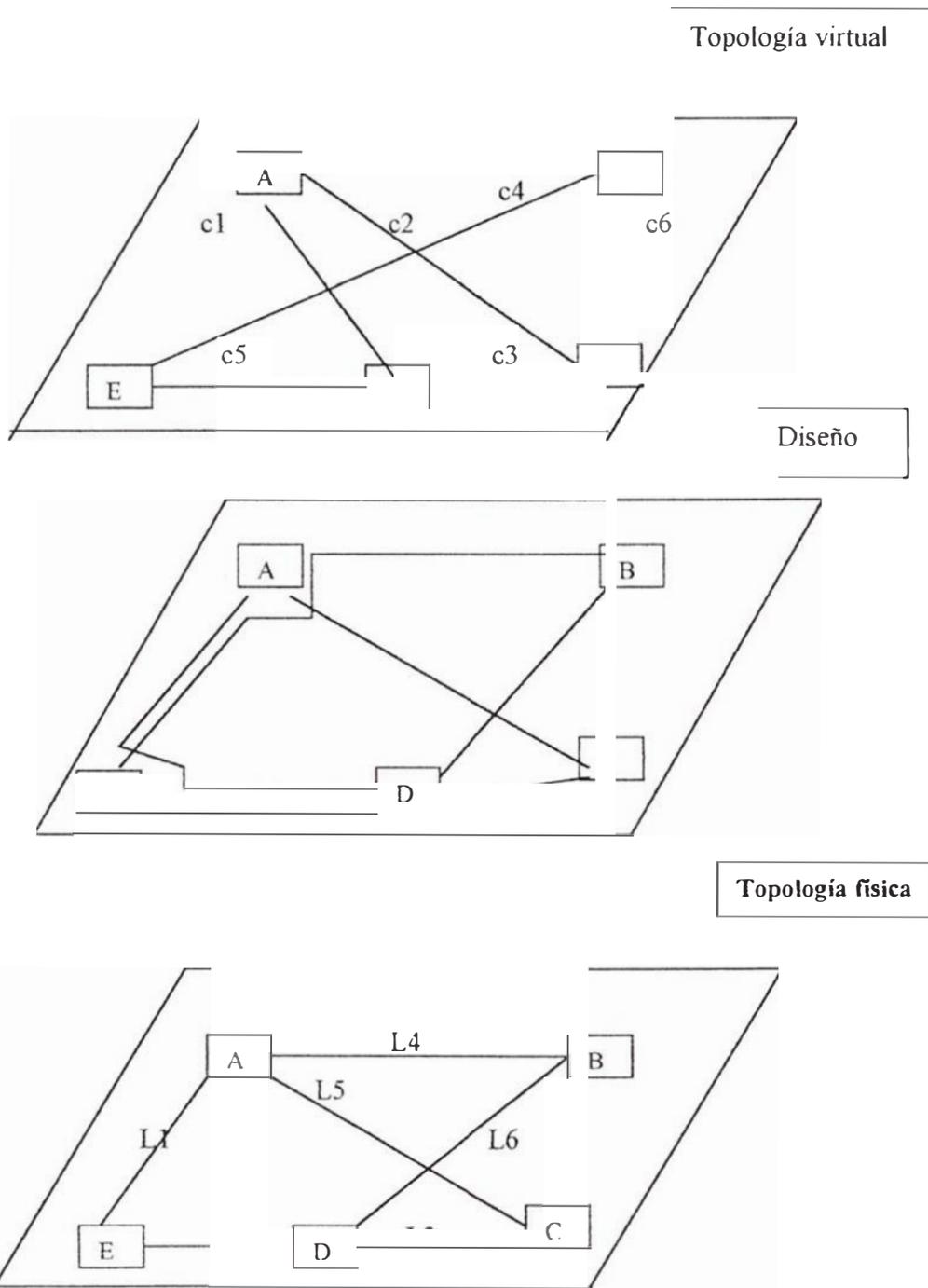


Figura 4.2 Modelo de Topología con protección.

Topología física y virtual similar a la de la figura 20, con una pequeña diferencia [La ruta de c6 es ahora (L6,L3)], que permite a la red sobrevivir a alguna falla en la topología física.

En realidad, tanto las rutas ópticas c6 y c4 comparten el enlace óptico L4. Si la ruta L4 falla, fallarán simultáneamente c4 y c6 en la red virtual.

En la figura 4.2 se presenta la forma mejorada para la protección del sistema.

El propósito del diseño de protección es evitar tales situaciones efectuando una apropiada asignación de las rutas sobre los enlaces ópticos. En otras palabras, el objetivo es obtener topologías de redes virtuales en las que la independencia de longitudes de onda sea cierta. Naturalmente, aun será necesario un plan de reserva de capacidades sobre los caminos ópticos con la idea de efectuar un posible servicio de restauración.

4.1 Estrategias de protección

La protección física tiene el objetivo de asegurar que un canal de comunicación entre dos puertos de la red permanezca operativo en el caso de que un componente o un enlace de la red falle. Este tipo de protección es realizada en el nivel físico. Puede reaccionar muy rápidamente en caso de falla, pero requiere de hardware redundante. En general, la protección física también incluye la capacidad de reasignar caminos ópticos después de una falla sin que los conmutadores de alto nivel participen de ello.

Existe un precio a pagar por la protección física, llamado duplicación de hardware. En muchas situaciones, el proveer tal redundancia puede no ser efectiva en costo, y así en redes reales solo sería justificable implementar la protección física en algunas rutas críticas.

Mediante una estrategia de protección se reserva para cada ruta de trabajo, una ruta de protección dedicada y esta puede ser de tipo de conmutación de protección 1+1 ó bien 1:1. Las rutas de operación y de protección pueden estar en un enlace sin elementos comunes, si el mecanismo de protección solo ofrece protección a fallas de enlace o pueden estar en un nodo disjunto si el

mecanismo de protección también protege ante fallas en los nodos. Alternativamente, la protección de enlace o de sección óptica multiplexada (OMS), conmuta una sección multiplexada completa a otra fibra paralela dedicada, o a una ruta en la red.

La protección de enlace puede ser aplicada en forma conjunta, ej, configuración M:1, cuando en el enlace hay M fibras en operación protegidas por una fibra redundante. Tal propuesta puede ser usada para soportar las fallas en equipos (fallas en uno o más amplificadores en línea) o para mantenimiento de una de las fibras de trabajo, situación en la que la señal en una de estas fibras puede ser cambiada a la fibra de protección.

En la ruta de protección se encuentran canales de reserva dedicados para protección y están incluidos en las fibras junto con los canales de operación. Estos canales de reserva están disponibles en las OXC's del mismo modo que los canales de operación y además contribuyen a la dimensión de la matriz de conmutación. En caso de protección utilizando OMS (Optical Multiplex Section), el acceso a los recursos de protección dedicada puede ser hecho en forma semiestática o con simple conmutación fuera del conmutador, haciendo menos complejos los nodos.

Las estrategias de protección se consideran primordialmente en enlaces punto a punto y en las estructuras tipo anillo. La protección requiere muchos recursos de reserva, lo cual puede ser visto como una desventaja.

4.2 Protección de redes tipo anillo

Los anillos WDM totalmente ópticos tienen como base de su arquitectura los multiplexores de inserción/supresión (OADMs). La estrategia de protección debe estar basada en dichos multiplexores. Esta protección puede darse de dos maneras: protección dedicada y protección compartida.

4.2.1 Protección dedicada de anillos

La protección dedicada de anillos consiste de dos fibras que usan la técnica de multiplexación WDM en cada una de las mismas. Cada demanda de longitud de onda es protegida usando una ruta principal a lo largo del anillo y una ruta de reserva del otro lado del anillo. Como los canales son protegidos en una longitud de onda básica, este anillo también es conocido como anillo de protección de canal óptico (Och-DPRing) [31]. Cuando ocurre una falla en un enlace o nodo dentro del anillo, el tráfico afectado es conmutado hacia la ruta de protección. La ventaja de este tipo de protección es su relativa simplicidad. La acción de conmutación es iniciada en el lado de recepción.

Esta propuesta es simple y robusta porque no necesita un protocolo de señalización complicado. La principal desventaja de Och-DPRing es que usa en forma ineficiente la capacidad dado que se requiere más del 100 % de reserva, con lo que la protección demanda mucha de la capacidad del anillo. Por otro lado, esto hace que la arquitectura Och-DPRing sea flexible respecto a las impredecibles demandas de protección.

4.2.2 Protección compartida de anillos

En la protección compartida de anillos, el 50 % de la capacidad del anillo es dedicada para propósitos de protección, lo que permite compartir este pool de capacidad de protección entre diferentes demandas de longitud de onda enrutadas en el anillo. En la llamada protección de anillo múltiplex en forma compartida (OMS-SPRing) la conmutación de protección puede ocurrir en una longitud de onda básica, en una protección compartida de canal óptico (Och-SPRing) o en un nivel multiplexado. Hay dos variantes del concepto de protección OMS-SP Ring: OMS-SP Ring de 2 fibras y OMS-SP Ring de 4 fibras. El esquema de 2 fibras solo requiere dos fibras entre cada par de OADMs adyacentes. La mitad de las longitudes de onda en cada fibra son reservadas para protección de canales. Para acomodar demandas de transmisión, las rutas ópticas son encaminadas en la otra mitad del conjunto de longitudes de onda. Los canales en operación de la

fibra son protegidos por los canales de protección en la otra fibra, viajando en la otra dirección del anillo.

En una OMS-SPRing de 4 fibras, se requiere cuatro fibras entre nodos adyacentes OADMS. Los canales de operación y de protección son ahora llevados sobre diferentes fibras. Lo que posibilita asignar direcciones de cada ruta operativa en la misma longitud de onda.

La arquitectura OCH-SPRing usa una configuración similar a la OMS-SPRing, y tiene las mismas ventajas en términos de capacidad compartida, sólo que el esquema de protección es diferente. Cuando una falla ocurre, las conexiones afectadas son individualmente conmutadas a las terminaciones OADMs del otro lado del anillo, usando la capacidad de protección en la otra fibra.

Una ventaja importante de Och-SP Ring sobre OMS-SP Ring es la longitud reducida de la ruta de protección, una importante consideración en redes ópticas, en que las rutas largas sufren más atenuación y distorsión de señal.

Para la mayoría de los patrones de tráfico la capacidad de utilización del anillo de protección compartida es más alta que el anillo de protección dedicada. Por otro lado, la implementación y administración de OADMs para un anillo de protección compartida es más compleja –y potencialmente más cara- que para un simple anillo de protección dedicado, dado que se requiere el desarrollo de protocolos de conmutación.

4.3 Protección de redes tipo malla

A diferencia de las redes anillo, donde 2 pares de fibras están interconectadas por OADMs, las redes malla están basadas en OXCs con capacidad de interconexión múltiple de pares de fibras. En los OXCs, las longitudes de onda pueden estar encaminadas entre fibras entrantes, salientes y locales mediante una apropiada configuración de conmutador espacial OXC.

Los conectores ópticos cruzados (OXC) no solo proveen un enrutamiento de longitud de onda flexible, sino también permiten el re-enrutamiento del tráfico en canales de reserva en caso de fallas. El re-enrutamiento puede ocurrir usando protección o restauración.

La protección vuelve a encaminar el tráfico hacia los recursos de reserva preasignados que pueden estar disponibles ante una determinada falla o conjunto de fallas (que hace que el enrutamiento 100 % predecible).

La restauración, por el contrario, hace uso de un conjunto de pares de reserva en la red, y para cada falla, un algoritmo de restauración calcula una ruta de restauración dentro de esos pares de reserva. De esa manera, la restauración puede hacer un mejor uso de los recursos de reserva compartidos.

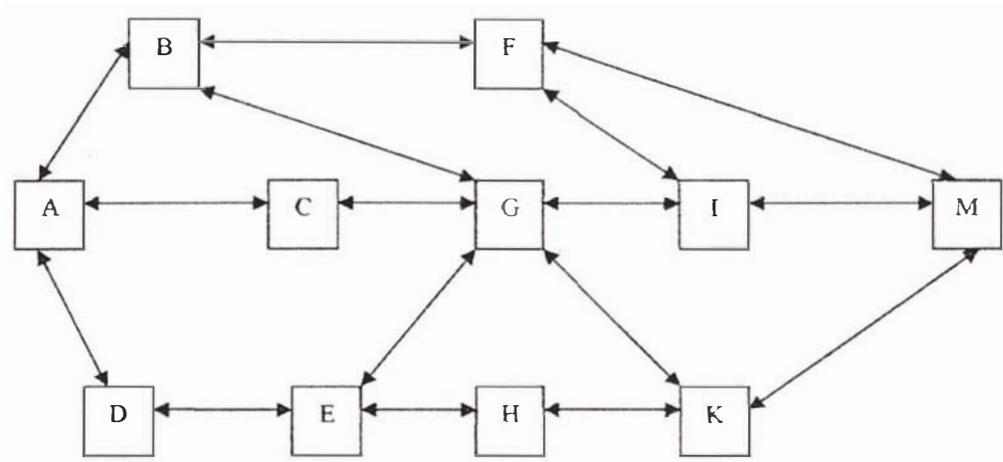
4.4 Restauración

Las estrategias de restauración pueden ser clasificadas de acuerdo a tres criterios principales:

- Restauración de enlace ó de ruta
- Restauración en tiempo real ó precalculada
- Restauración distribuida ó centralizada

4.4.1 Restauración de enlace ó de ruta

En el caso de restauración de enlace, el tráfico entre los nodos terminales del enlace fallado es redireccionado (en el supuesto que existan canales de reserva). Los canales pueden ser tomados conjuntamente o reencaminados separadamente. Esta estrategia utiliza una gran cantidad de pares de fibras en las vecindades de la falla. En caso de una falla en un enlace o de un nodo, todas las rutas ópticas afectadas serán individualmente restauradas. Esto reduciría el tiempo de restauración. Por otro lado, la restauración de ruta, puede tener mayor capacidad global lo cual mejora la eficiencia de la red. La ruta de restauración puede coincidir parcialmente con la ruta original o ser una ruta de restauración totalmente disjunta (ver figura 4.3).



Demanda	Ruta de servicio	Ruta de restauración
d1	A-C-G-I-M	A-D-E-H-K-M
d2	A-B-F-M	A-D-E-H-K-M
d3	B-F-M	B-G-I-M
d4	A-C-G	A-D-E-G

Figura 4.3: Restauración de rutas

En el caso de redes de tipo WP, la continuidad de longitud de onda es también necesaria a lo largo de la ruta de restauración. Esta longitud de onda puede ser diferente de la longitud de onda de trabajo si el transmisor y el receptor son sintonizados a otra longitud de onda.

En la figura 4.3, para el caso de cuatro demandas, podemos verificar la capacidad de utilización de un enlace mediante una tabla, como se muestra en la Tabla No. 2, en este caso respecto del enlace D-E.

Para responder a un requerimiento de una nueva demanda d , se determina primero las rutas de servicio d 's. Entonces se escanea todas las filas de la tabla para ver si alguna falla afecta a d . Si fuera el caso, se calcula en la tercera columna la que tenga menor número de requerimientos de enlaces. El procedimiento completo se muestra en [32].

Tabla No. 2. Tabla de control de capacidad de enlace (D-E)

Falla detectada	Demandas afectadas	Requerimiento de capacidad de enlace
Nodo B	d2	1
Nodo C	d1, d4	2
Nodo F	d2	1
Nodo G	d1	1
Nodo I	d1	1
Enlace A-C	d1, d4	2
Enlace A-B	d2	1
Enlace B-F	d2	1
Enlace C-G	d1, d4	2
Enlace G-I	d1	1
Enlace F-M	d2	1
Enlace I-M	d1	1

4.4.2 Restauración en tiempo real ó precalculada

La ruta de restauración puede estar precalculada (antes de que la falla ocurra) o ser determinada en tiempo real (después de que la falla ocurra). Para procesar las rutas alternativas se requiere velocidad y optimalidad en los algoritmos de restauración.

El precalculo requiere calcular y almacenar las rutas de restauración cada vez que el estado de la red cambie o a intervalos regulares de tiempo. El algoritmo entonces toma conocimiento del estado de la red completa, y las rutas de restauración para un conjunto predeterminado de escenarios de falla, lo cual puede ser almacenado en una base de datos. Dada una falla, el protocolo de la capacidad de reserva debe de verificar las rutas de restauración propuestas.

El precalculo da lugar para la optimización; por regla general no se considera que múltiples fallas pueden ocurrir en un corto tiempo y así la optimización puede ser hecha fuera de línea. Por otro lado, la restauración en tiempo real, dada una falla y dado el estado actual de la red, se

encarga de proponer la más adecuada ruta de restauración. Mientras que la restauración en tiempo real puede normalmente sobrevivir a más fallas inesperadas que la restauración precalculada, no obstante, es algo más lenta. El proceso de restauración podría acelerarse sacrificando la optimalidad del algoritmo de restauración.

4.4.3 Restauración distribuida ó centralizada

En la restauración centralizada, el cálculo de restauración de rutas es realizado en un controlador de red centralizado, donde toda la información actualizada de la red esta disponible. Después de la computación, las rutas son cargadas a la base de datos de los nodos. La restauración centralizada en tiempo real esta basada en mensajes de alarma para identificar la falla y obtener la información de topología, lo cual es típicamente un proceso lento. La restauración centralizada precalculada es mucho más rápida, pero requiere comunicaciones frecuentes entre el controlador centralizado y los elementos de la red para adquirir la información topológica actualizada, que podría ser no escalable en redes de gran tamaño.

La restauración distribuida esta basada en inundación de mensajes enviados por los nodos terminales de un enlace fallado, en búsqueda de rutas alternativas y puede ser en tiempo real. La restauración precalculada distribuida aunque algo lenta parece ser una alternativa viable. Para restringir la cantidad de rutas de restauración a ser almacenadas en memoria, es mejor usar rutas de restauración independientes de las fallas. Aunque algunos vendedores anuncian restauración dentro de los 50 ms; se cree que en general, esta clase de restauración requiere más tiempo.

Después de la detección y aislamiento de la falla, una decisión tiene que ser tomada (modo centralizado o distribuido) sobre las acciones necesarias para resolver la falla, que involucra los conmutadores necesarios para efectivizarla. Para lograr una rápida recuperación de una red malla, las arquitecturas de protección son una mejor alternativa, porque se requiere menor coordinación entre elementos de la red.

Para diseñar una red óptica autónoma, se debe de proveer un esquema de protección automática o un esquema de restauración de tráfico al nivel óptico.

4.5 Comparación entre esquemas de restauración

Un parámetro importante para comparar los diferentes esquemas de recuperación es el costo de instalación. La Tabla No. 3 se muestra una comparación entre esquemas de restauración.

Tabla No. 3 Comparación entre esquemas para restauración de redes

	Costo de enlace	Costo de nodo	Costo de admin.	Flexibilidad	Disponibilidad	Tiempo de recuperación
Protección dedicada anillo	Más alto	El más bajo	Bajo	Medio/bajo	Alto	Rápido
Protección compartida anillo	Bajo	El más bajo	Medio	Más bajo	Alto	Rápido
Protección ruta malla	Alto	Alto	Bajo	Medio	Medio	Rápido
Protección enlace malla	El más alto	Alto/medio	Bajo	Medio	Medio	Rápido
Restauración ruta malla	El más bajo	Medio/bajo	Más alto	Alto	Medio/alto	El más lento
Restauración enlace malla	Bajo	Medio	Más alto	Alto	Medio/alto	Más lento

El costo del enlace es más alto para esquemas de protección dedicada, porque no se comparte la capacidad de protección. El esquema de protección de enlace malla tiene el más alto costo de enlace si se requiere proteger a una cantidad elevada de enlaces.

Con respecto a la capacidad requerida, la protección requiere substancialmente más capacidad redundante que la restauración. Efectivamente, se necesita de 100 % a 200 % de capacidad redundante para la protección, mientras que solo 50 a 100 % para la restauración. Además, la protección compartida tiene un costo menor de enlace en esquemas de restauración con anillos, incluso mayor para restauración compartida en una malla, debido a que la capacidad de reserva

puede ser usada más globalmente. Para restauración de mallas, los esquemas basados en rutas también han mostrado una utilización más eficiente de la capacidad de reserva que los esquemas basados en enlaces.

En lo concerniente a los costos en los nodos, los OADMs son considerablemente más baratos que los OXC. Consecuentemente, los esquemas de protección basados en anillo deberían tener los menores costos por nodo si la cantidad requerida de OADMs no exceden en demasía a la cantidad equivalente de OXC. Cuando se interconectan una gran cantidad de anillos, todos los OADMs de los diferentes anillos tienen que estar interconectados, lo cual lo hace altamente complejo. En este caso, para mejorar la escalabilidad se puede considerar el uso de más OXC en la interconexión de anillos. Por otro lado, el uso de OADMs para interconectar anillos, puede incrementar el costo del nodo para esquemas basados en anillo.

A pesar de que los esquemas basados en malla realizados con OXC son más costosos que los basados en anillos con respecto al costo en los nodos, no obstante pueden reducir la dimensión de la matriz de conmutación y así el costo de los nodos.

Como los esquemas de restauración requieren menos capacidad de reserva en comparación con los esquemas de protección de ruta, la cantidad de tráfico a ser interconectado por esquemas de restauración es también menor, que a su vez también contribuye a disminuir el costo del nodo.

Por otro lado, el costo de administración es menor para el esquema de protección, dado que no requiere protocolo de señalización (sí es que se utiliza protección 1+1). Para la protección compartida de anillo se requiere un protocolo APS, que adiciona costo a la administración. También para esquemas de restauración en redes tipo malla, la señalización es requerida (sea centralizada o distribuida). Esta señalización es incluso más complicada, debido a que existen múltiples rutas para la restauración y es necesario evaluarlas (en un esquema de restauración dinámico). La restauración basada en malla contiene un más alto costo de administración que la protección compartida de anillos.

La flexibilidad es la capacidad de superar patrones de trabajo y fallas impredecibles de la red. Los esquemas basados en anillos ofrecen la menor flexibilidad debido a que no explotan completamente la conectividad de la red y la ruta de protección es fija. Los esquemas basados en malla, realizados con OXCs, son más flexibles por lo que pueden ser configurados usando cualquier ruta libre en la red. Adicionalmente, la restauración en tiempo real es también muy flexible en la atención a las fallas de la red.

La disponibilidad de una ruta/red, es la proporción de tiempo en que se espera que esta ruta/red se mantenga disponible del tiempo total. Las redes anillos interconectadas ofrecen la más alta disponibilidad. Y esto es debido a que fallas múltiples que ocurran en diferentes anillos pueden ser recuperadas (protección independiente).

Los esquemas basados en protección/restauración de enlaces no pueden recuperarse de las fallas de los nodos, pero eventualmente pueden recuperarse mejor de múltiples fallas de enlaces. Así, la disponibilidad total depende de la razón de disponibilidad de nodos y enlaces, y la cantidad de recursos de reserva.

Normalmente la disponibilidad requerida esta impuesta por la demanda de tráfico. Cuando se consideran diferentes tipos de tráfico, y algunos tipos requieran una más alta disponibilidad que las otras, entonces se requiere protección selectiva.

Capítulo 5

Operación y mantenimiento de redes AON

La función de control de la red óptica es responsable del suministro y mantenimiento de las conexiones y administración de recursos de la red. La distribución de conexiones requiere algoritmos para la selección de rutas, y mecanismos de señalización para solicitar y establecer conexiones dentro de la red a lo largo de una ruta elegida. Cuando una ruta es establecida satisfactoriamente, es necesario mantenerla con un nivel de calidad apropiado.

Para la operación de la red es fundamental el conocimiento de la topología de red y de los recursos disponibles de la misma. La utilización eficiente de los recursos de la red requiere que se mantenga un inventario actualizado de los recursos de red disponibles.

La tecnología para resolver estos problemas esta siendo desarrollada por los proveedores de equipos de telecomunicaciones. No obstante, cada proveedor ha desarrollado un conjunto separado de mecanismos y protocolos. Esto hace difícil la interconexión de equipos de distintos proveedores. Por ello es que se han conformado grupos de trabajo para alcanzar la interoperabilidad de equipos de los distintos proveedores [33].

El dispositivo básico para poder controlar la red es el elemento de red óptico. Las funciones básicas que debe soportar este dispositivo incluyen conmutación de longitud de onda, conversión y multiplexación/demultiplexación. Todas estas funciones deberán de realizarse con poco o ningún procesamiento electrónico para mantener la deseada transparencia.

La transparencia óptica se logra gracias al enrutamiento de longitud de onda. No obstante, las cualidades de transparencia y reconfigurabilidad de una red dinámica son atributos ortogonales que pueden ser soportados solo hasta un grado relativo. Es obvio que una red reconfigurable

dinámicamente provee mejores prestaciones de servicio y distribución de servicios que una red estática, por lo que las actuales investigaciones tratan de explorar el grado de reconfigurabilidad dinámica que puede ser construida sobre una red óptica.

Dado que la transparencia completa puede ser difícil de lograr, una primera etapa en el camino hacia las redes totalmente ópticas son las redes con reducido procesamiento, las cuales se pueden lograr con amplificadores ópticos que reemplacen regeneradores, y sustituyendo los conmutadores electrónicos por nodos ópticos más simples.

A la fecha, las investigaciones han sido exitosas en tecnologías ópticas para redes ópticas reconfigurables. Con la idea de que esta nueva tecnología sea comercialmente viable se requiere que las funciones de control y administración de la red sean incorporadas como parte integral de la arquitectura de interconexión.

En las redes ópticas, los elementos de red no tienen acceso a los bits transmitidos, por lo que debe de asignarse una longitud de onda especial para que lleve la información de administración y control de la red. En general, el canal de administración y mantenimiento usa una tabla de enrutamiento compuesta de longitudes de onda de entrada/salida y puertos de interconexión que reflejan el estado de las longitudes de onda de servicio en la red. Las especificaciones del canal de administración y mantenimiento contienen, su formato, elecciones de tasa binaria, y de longitud de onda que deben de ser estandarizadas para que se hagan realidad las interconexiones de gran cobertura .

5.1 Operación de la red

Para la operación de la red, los terminales ópticos usan una longitud de onda conocida de antemano para requerir una conexión con el administrador. La demanda de conexión debe incluir el tipo de servicio requerido, la dirección del terminal óptico (OT) solicitado, el rendimiento deseado, y la prioridad.

Dada una conexión entrante en una red AON, el administrador determina si este destino está también en el nivel L-0 de la dicha red. Si es así, determina la disponibilidad de los recursos

necesarios (rutas ópticas y suficientes intervalos de tiempo), y si los recursos necesarios están disponibles, informa a los destinatarios de la nueva conexión requerida. Si el destinatario acepta la conexión, entonces se informa al terminal óptico que pidió la conexión y la comunicación puede empezar. Sin embargo, si el destinatario está en una subred de nivel L-1 de la misma red AON, entonces el administrador del nivel L-0 comunica al administrador del nivel L-1 para que seleccione una longitud de onda que provea la ruta entre ambos niveles L-0.

Si el destino no está en la misma red, entonces el administrador nivel L-0 se comunica con su correspondiente administrador del nivel L-1 para encontrar una ruta óptica (esto podría requerir un cambio de longitud de onda) que use una longitud de onda disponible. Una vez que se establece la ruta, el proceso de conexión se completa como se describió anteriormente en el capítulo 2.

Para requerimientos de servicio tipo B, además de la asignación de una ruta óptica, se debe tener disponibilidad de intervalos de tiempo tanto en la fuente como en el destinatario. En este esquema, los terminales ópticos miden el tiempo desde su punto de acceso hacia el nivel L-1 de la red AON para transmitir un mensaje al canal de difusión. Entonces el administrador del nivel L-1 envía periódicamente un pulso de regulación a cada uno de sus niveles L-0 de las redes AON permitiendo a las terminales ópticas saber exactamente cuando el próximo pulso va a llegar a su punto de acceso. El resultado de este proceso es que todas las terminales ópticas del mismo nivel L-1 de la red AON transmiten una señal en su propio tiempo de referencia, ajustando así su tiempo relativo de transmisión a su tiempo de referencia local las terminales ópticas con lo que pueden compartir eficientemente una ruta óptica para el servicio tipo B.

5.2 Arquitectura de Capas para la Operación, Administración y Mantenimiento de la Red

La arquitectura de capas simplifica el diseño, desarrollo e implementación de las funciones de operación, administración y mantenimiento para la red de transporte. Las rutas ópticas son manejadas por tres dispositivos de la red.

Fibras ópticas, b) Amplificadores lineales ópticos y los repetidores, c) los conmutadores ópticos, que encaminan o conmutan rutas.

Por otro lado, la actual supervisión de la calidad de los elementos ópticos está limitada a aspectos analógicos. La arquitectura para redes ópticas combina la capa de sección y la capa de ruta en una única capa llamada capa digital y añade una nueva capa entre la capa de medio físico y la capa digital, llamada capa óptica (ver figura 5.1).

La capa óptica soporta la operación, administración y mantenimiento de las rutas ópticas y a su vez, esta dividida en dos subcapas llamadas, la capa óptica de ruta y la capa óptica de sección.

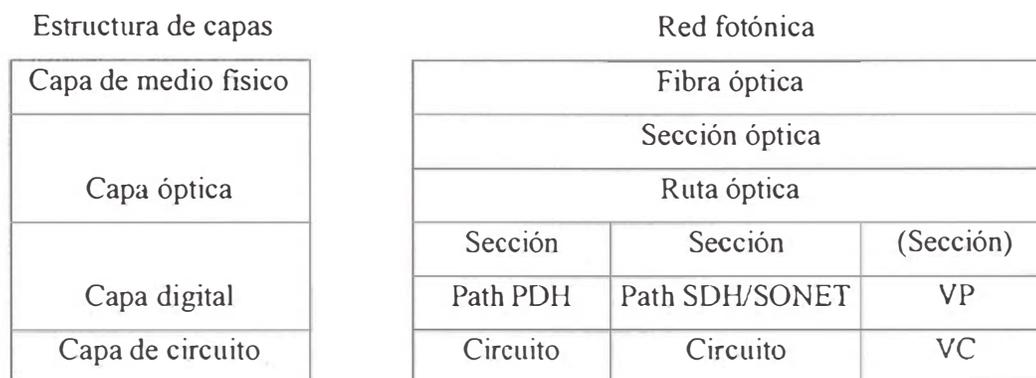


Figura 5.1 Estructura de capas para la OA&M de la red óptica

En una red de jerarquía digital síncrona, la calidad de servicio está representada por la tasa de error de bits (BER). En las redes AON, el monitoreo del BER no es aplicable cuando la capa óptica debe de ser transparente. Por lo cual, se debe establecer otro índice de calidad para supervisar las redes AON.

Los candidatos para reemplazar al BER pueden ser parámetros físicos tales como la potencia óptica, la relación señal a ruido o la relación portadora a ruido, el nivel de diafonía, etc. Estos parámetros, no obstante no están directamente relacionados al BER, y la medida de diafonía, que sí puede tener gran efecto sobre el nivel de calidad de servicio, es difícil.

En la Tabla No. 4, se da una lista de parámetros ópticos para monitoreo. Estos parámetros de monitoreo cubren la mayoría de escenarios de falla, tales como cable roto, falla de amplificador, falla de canal, falla de elemento de tablero de control, etc.

Tabla No. 4 : Parámetros de detección y monitoreo

Parámetro	Significado de detección
Detección de fallas:	
Pérdida de señal óptica	Fotodetector + electrónica de baja velocidad
Pérdida de modulación	Fotodetector + RF electrónico Control electrónico de conversor de longitud de onda
Pérdida de canal óptico	Demultiplexor + fotodetector + electrónica de baja velocidad Detección de identificador de longitud de onda Control electrónico de filtro sintonizable
Monitoreo de performance:	
Potencia de canal óptico	Demultiplexor + fotodetectores + electrónica de baja velocidad
Canal óptico de longitud de onda	Demultiplexor + fotodetectores + electrónica de baja velocidad
SNR de canal óptico	Demultiplexor de alta resolución + fotodetectores + electrónica de baja velocidad
Razón de extinción de canal óptico	Fotodetector + muestreo asincrónico

Una operación de administración y mantenimiento (OA&M) práctica puede ser llevada a cabo, sólo si esta soportada por funciones tanto en la capa óptica como en la capa digital, con lo que la localización de la falla debe ser determinada por el tiempo consumido en el test de prueba entre secciones, dado que no hay funciones de monitoreo de red incorporadas en la capa óptica.

Por otro lado, si las funciones ópticas están sólo en la capa óptica, entonces la estimación de calidad de señal entre componentes ópticos debe ser realizada usando monitoreo analógico-óptico. Aunque debe señalarse que el monitoreo analógico no es tan sensible ni preciso como el monitoreo soportado por la capa digital. Así, una estrategia práctica de operación, administración y mantenimiento deberá tener monitoreo analógico basado en elementos individuales ópticos realizado en la capa óptica, a la vez que un monitoreo con equipo digital al final de las rutas realizado en la capa digital. La tabla No. 5 sintetiza lo tratado previamente.

Tabla No. 5 Comparación de tipos OA&M de redes de transporte ópticas

Items de comparación Tipos de OA&M	Localización de falla en el tiempo	Transparencia de señal de línea	Costo	Adaptabilidad con modelo TMN
Completamente soportado por la capa digital	Larga	Alta	Bajo	Alta
Combinación de capa digital y capa óptica	Corta	Media	Medio	Alta
Completamente soportado por la capa óptica	Media	Baja	Bajo estudio	Bajo estudio

TMN: Telecommunications Management Network

5.3 Métodos de transferencia de señal

Con la idea de realizar una eficiente y confiable operación y administración de la red debe de considerarse la configuración y un método de supervisión (SV) de la transferencia de señal. La administración de información para las secciones óptica y del medio de transmisión es realizada por el sistema de supervisión entre los elementos ópticos vía medio físico. Hay dos configuraciones de transferencia, como se muestra en la figura 5.2.

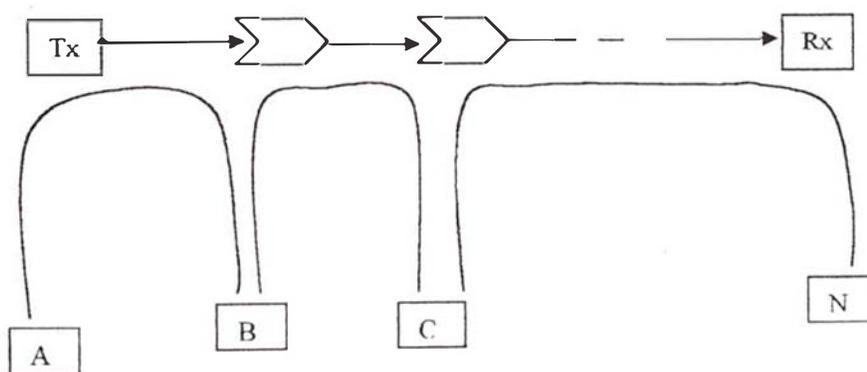


Figura 5.2 Terminación y retransferencia a NE

En este caso la señal SV es terminada digitalmente y retransmitida a cada sección repetidora. La otra alternativa, es el método transparente, donde la señal de supervisión SV del flujo óptico entre los elementos de red no esta terminada digitalmente, pero es transparentemente transferida.

El método de relevo es el más adecuado, debido a que las señales SV deben subsistir incluso si algún elemento de la red falle. Otros métodos propuestos pueden dividirse en dos grupos; el primer grupo superpone la señal SV sobre la línea WDM usando técnicas tales como modulación de amplitud, modulación de fase y modulación de polarización. Hay dos subcategorías en este grupo, la que modula la fuente LD, y la que modula directamente la fuente de luz de la señal de línea.

El segundo grupo incluye métodos que usan un canal separado WDM para la señal SV.

La Tabla No. 6 se compara los métodos de transferencia de la señal SV.

Tabla No. 6 Comparación de métodos de transferencia de señal SV

Items de comparación	Precisión de localización de falla	Capacidad de canal SV	Complejidad de circuito	Fiabilidad	Costo
Métodos de transferencia Modulación Pumping LD	Pobre	Media	Simple	Baja	Bajo
Superposición Modulación Directa	Pobre	Estrecha	Compleja	Media	Medio
WDM Modulación Pumping LD	Pobre	Media	Simple	Baja	Bajo
Modulación Extra LD	Buena	Ancha	Compleja	Alta	Medio

Capítulo 6

Limitaciones de las redes totalmente ópticas

6.1 Límites de capacidad

Los más importantes límites del sistema de transmisión óptica son los impuestos por las distorsiones no lineales inducidas por la fibra así como también por el ancho de banda total disponible para la transmisión con bajas pérdidas en la fibra de silicio. El límite teórico de la capacidad de canal se obtiene a partir del teorema de Shannon;

$$C = B \log_2(1 + S/N) \quad (\text{Ec. } \alpha)$$

Donde, S es la potencia de la señal, N es la potencia del ruido, y B es el ancho de banda del canal. Esta expresión se aplica a canales lineales con ruido aditivo.

Teóricamente, esta es la máxima capacidad de canal a ser lograda. En la práctica, se puede llegar a un valor muy próximo con la ayuda de técnicas de codificación. Sin embargo, el tipo de codificación no puede lograr mayor capacidad de canal. Actualmente el ancho de banda está muy relacionado con el ancho de banda de la ganancia de los EDFAs. Este ancho de banda puede ser ampliado adicionando amplificadores Raman, y empleando otros tipos de fibras ópticas (ver Apéndice A). El límite de ancho de banda de la fibra de silicio es de 400 nm o 50 THz, restringido por las pérdidas intrínsecas de la fibra en la banda de 1200 nm a 1600 nm.

En los actuales sistemas de comunicación el tipo de ruido dominante es el ASE causado por la emisión espontánea de los amplificadores. Un valor típico de relación señal a ruido es de 100, que es requerido para alcanzar tasas de error menores que 10^{-9} . Si usamos este valor de S/N y estimamos el límite de ancho de banda en 50 THz, la ecuación α nos da una capacidad de canal límite de 350 Tbps. Otra medida de capacidad de canal es la razón capacidad a ancho de banda (C/B) llamada frecuentemente eficiencia espectral. Para un valor de S/N de 100, la eficiencia espectral puede, en principio, ser aproximadamente 7 bps/Hz. Los sistemas comerciales actuales logran eficiencias espectrales de 0.4 bps/Hz usando modulación BASK. Para polarización simple, la eficiencia espectral óptima usando BASK es 1 bps/Hz. Claramente, son necesarias técnicas de codificación más avanzadas para superar la limitación de capacidad de canal.

Por otro lado, a tasas de transmisión muy elevadas como las que se emplearan en las futuras redes, el nivel de potencia óptica llegaría a un nivel donde las distorsiones no lineales de la fibra limitarían la capacidad de canal. En efecto, estas distorsiones introducen un ruido extra al sistema que se incrementa con la potencia de la señal y que limita fundamentalmente la capacidad de canal.

Estas distorsiones no lineales están asociadas con susceptibilidades no lineales de tercer orden de la fibra de silicio. Aunque esta susceptibilidad es muy pequeña, la longitud de la fibra, el pequeño diámetro del núcleo y el incremento de la potencia óptica pico hacen que los efectos no lineales sean muy importantes. Los efectos no lineales incluyen automodulación de fase, modulación cruzada de fase y efecto FWM, descritos anteriormente. La teoría de capacidad de canal para el caso cuando comienzan a ser dominantes estos mecanismos de ruido recién empieza a ser explorada.

¿Cómo se puede incrementar los límites no lineales de la capacidad de canal? Se han propuesto algunas interesantes técnicas. Por ejemplo la propagación soliton puede ser usada para balancear los efectos no lineales con dispersión en un canal único. Los repetidores ópticos pueden ser usados en los nodos de una red para restaurar la sincronización, amplitud, y forma de los pulsos ópticos. Los espejos no lineales pueden ser empleados para recuperar los sincronismos de las señales en los nodos de la red, además de remover las distorsiones no lineales en la red. Esta

técnica requiere el uso de tramos de fibra con diferente dispersión. Hay una amplia variedad de técnicas de codificación que pueden ser usadas para incrementar la capacidad de canal.

Una segunda alternativa para incrementar la capacidad de canal es reducir el ruido del sistema. Aquí de nuevo se tienen otros límites fundamentales. Por ejemplo, los amplificadores actuales tienen una figura de ruido cercana a 3 dB que es el límite fundamental para un amplificador lineal insensible a la fase. Amplificadores sensibles a la fase pueden reducir el ruido del sistema hasta un factor de dos.

¿Podrá la mecánica cuántica ofrecer algunas mejoras en la comunicación? Efectivamente, la interacción de los fotones de comunicación con el ambiente a través de la fibra introduce pérdidas e incoherencias que reducen muchos procesos cuánticos a procesos clásicos. Para canales con bajas pérdidas, la capacidad cuántica de canal es un factor de dos veces la capacidad de un canal clásico, la cual puede ser obtenida usando técnicas de codificación de alta densidad basadas en la repartición de pares de fotones correlacionados cuánticamente entre el emisor y el receptor.

Un flujo de ideas teóricas está empezando a fluir de una nueva comunidad compuesta por una combinación sinérgica de físicos, científicos de la información e ingenieros. Algunas de estas ideas están siendo exploradas y desarrolladas experimentalmente.

6.2 Límites físicos impuestos por dispositivos

Hoy en día, el número de longitudes de onda que un sistema puede utilizar está más limitado por la tasa de modulación, que por la tecnología de estabilización y resolución. La tecnología de recepción preferida es la detección incoherente, dado que la tecnología de detección coherente involucra un considerable incremento en costo y complejidad. Otros dispositivos están limitados por el tamaño físico. El tamaño llega a ser relevante cuando el dispositivo es fabricado a partir de un material costoso, como el niobato de litio o el indio fosforado.

Las grandes cascadas de dispositivos de resolución de longitud de onda, tal como los interferómetros Mach-Zehnder, poseen limitaciones de tamaño y atenuación. La diafonía puede ocurrir en cualquier conmutador con conmutación imperfecta. Uno de los principales problemas

de los conmutadores de longitudes de onda múltiples, es la degradación de la señal debido a la diafonía. Por otro lado, para una topología dada, si una señal transmitida no es adecuadamente removida del circuito, entonces el remanente continua circulando, entregando así múltiples copias retardadas hacia el receptor. Mediante la expansión del número de conmutadores requeridos y conectados con un patrón de dilación de longitud de onda, se puede reducir substancialmente la diafonía coherente de salida, aunque esto obviamente aumenta los costos en complejidad y pérdidas en exceso de componentes.

6.3 Límites impuestos por las no linealidades

La potencia de la señal aplicada a una longitud de onda individual de un enlace WDM óptico o de una red, debe ser suficiente para proveer una adecuada relación SNR en el receptor, después de sufrir los efectos de atenuación (distancia, splitting y pérdidas por exceso de componentes), diafonía y el ruido ASE dentro de los amplificadores. Por otro lado, la potencia óptica no debe ser tan grande. En efecto, si los enlaces son muy extensos y los niveles de potencia son demasiado altos, efectos físicos diversos podrían causar que las no linealidades de la fibra introduzcan diafonía; de este modo la señal original en una longitud de onda es deflexionada e insertada como diafonía en otros canales. Existen también límites de potencia en la fibra impuestos por consideraciones de seguridad. Las no linealidades son un serio impedimento para el crecimiento del sistema en grandes redes.

Los dos principales efectos de las no linealidades son el four-wave-mixing FWM, y la dispersión estimulada de Raman (SRS). Los niveles de diafonía debido al efecto SRS se elevan con el incremento del número de canales y su espaciamiento. Este efecto SRS se hace más evidente en extensos enlaces con una alta tasa de transmisión.

Por otro lado, el efecto FWM se incrementa en forma no lineal cuando se incrementa la potencia de canal. Se acumula en los sistemas de amplificadores y depende fuertemente del tipo de fibra. Cuando la velocidad de transmisión supera los 10 Gbps (OC-192 en adelante), el efecto dominante es la dispersión de modo de polarización (PMD).

6.4 Limitaciones físicas de topologías

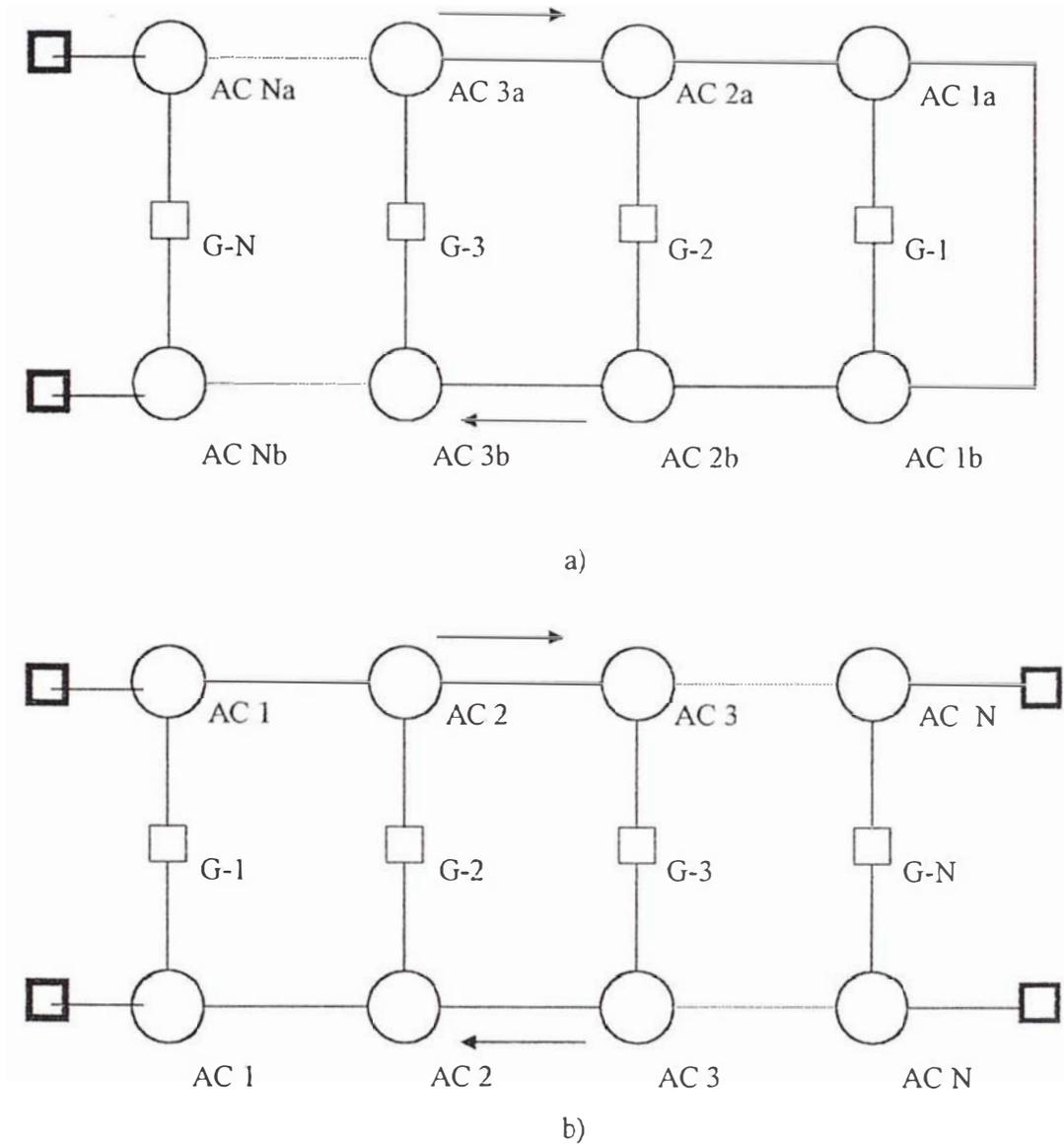
Con el advenimiento de la fibra óptica en los enlaces de comunicaciones se aumenta sobremanera el ancho de banda disponible para la transmisión, pero se crea un problema significativo para las futuras redes B-ISDN. Es claro que la interconexión de redes mediante fibra óptica envuelve otras consideraciones diferentes a las que intervienen en redes de cobre. Los cálculos demuestran que la mayor tolerancia a fallas ocurre cuando la tasa de transmisión es baja. En el caso de la red estrella, la calidad de recepción depende del número de nodos. Asimismo los resultados demuestran que no existe una tecnología óptima en interconexión de redes ópticas. Cada topología tiene sus ventajas y desventajas, las que dependen de la aplicación considerada.

La topología estrella usa la mayor cantidad de fibra pero posee el menor retardo de propagación con una alta tolerancia a fallas, y además, para un pequeño número de nodos tiene la máxima tasa de transmisión.

La topología anillo es la menos tolerante a fallas, tiene un gran retardo de propagación, pero en contrapartida requiere menos cantidad de fibra. Usando un esquema con anillo dual se vuelve más tolerante a fallas aunque requiere el doble de cantidad de fibra y aumenta en consecuencia el retardo de propagación.

La topología bus FUB (Folded Unidirectional Bus) tiene el mayor retardo de propagación, requiere casi tanta fibra como el anillo dual y tiene menos tolerancia a fallas. La principal ventaja de esta, es que es fácil de implementar. La de tipo DUB (Dual Unidirectional Bus) requiere la misma cantidad de fibra que la FUB y es más tolerante a fallas, pero no tiene la performance del anillo doble. Su ventaja es la facilidad de implementación física porque no requiere enrutadores o detección electrónica de fallas [34]. Comparando los diferentes acopladores de acceso se llega a las siguientes conclusiones: Los nodos dobles tienen la mejor tasa de transmisión pero una falla en cualquier nodo causa falla en la red. El acoplador simple tiene una pequeña tasa binaria. El problema es que requiere sincronización entre el transmisor y el receptor, y esto limita el tipo de modulación a utilizar. El acoplador debe compensar estas deficiencias a expensas de reducir la capacidad de transmisión.

En la figura 6.1 se puede apreciar un diagrama de bloques de las topologías FUB y DUB.



AC: Acoplador de acceso
 G : Entrada

Figura 6.1 Topologías a) FUB y b) DUB

Capítulo 7

Ensayos en Redes Ópticas

Se mencionan en este capítulo algunos de los ensayos que se constituyeron en hitos hacia las redes completamente ópticas.

7.1 Sistemas en redes LANs y MANs

- 1) LAMBDANET: LAMBDANET [35] fue un sistema experimental WDM diseñado para explorar un gran número de aplicaciones. La topología de red es una estrella de difusión. La configuración experimental empleó 18 estaciones. Cada estación transmite a una única frecuencia fija. Cada nodo está equipado con un transmisor fijo consistente en un láser DFB. Las longitudes de onda entrantes se separan usando demultiplexores de rejilla. Cada transmisor en el nodo tiene una longitud de onda fija. Esto permite conectividad de un solo salto sin necesidad de requerir de componentes sintonizables.

Las características técnicas del sistema fueron las siguientes:

Los transmisores láseres son de tipo DFB.

El rango de longitudes de onda varía desde 1527 a 1561 nm con 2 nm de separación. Se empleó receptores APDs comerciales (InGaAs) y fibra monomodo estándar. Se experimentó a las tasas de 1.5 Gbps y 2 Gbps.

Mientras que las ventajas de LAMBDANET incluyen simplicidad de diseño y soporte de arquitecturas para difusión múltiple, su arquitectura no es considerada escalable dado que requiere N longitudes de onda. No obstante, el tener N nodos receptores es también una limitación, puesto que para sistemas con número de nodos mayor a N , el costo por nodo podría crecer en demasía. Aunque, con una tecnología de arreglos optimizada se podría bajar los costos.

- 2) RAINBOW-1: La arquitectura RAINBOW-1 de IBM [36] fue diseñada para soportar hasta 32 estaciones PS/2 IBM conectadas mediante una topología estrella, sobre un rango de 25 Km. Los datos pueden ser transmitidos en cada canal WDM hasta una velocidad de 300 Mb/s. En la arquitectura RAINBOW, cada estación esta equipada con un único transmisor fijo, que es sintonizado a una única longitud de onda, y un único filtro sintonizable Fabry-Perot. La sintonización a algún canal particular toma hasta 25 ms.

Cuando un receptor esta inactivo, escanea todos las longitudes de onda hasta encontrar un requerimiento de canal que contenga la dirección del receptor. Entonces transmite una señal al nodo fuente, y la comunicación puede seguidamente empezar. A través de este protocolo simple, el tiempo de establecimiento puede ser muy largo para la conmutación de paquetes. Al igual que LAMBDANET, RAINBOW-1 no escala bien. RAINBOW-1 fue el primer desarrollo WDM que demostró el funcionamiento de componentes sintonizables WDM trabajando en un ambiente real.

- 3) RAINBOW-2: RAINBOW-2 [37] es la generación siguiente del sistema experimental RAINBOW-1. RAINBOW-2 fue desarrollada durante los años 1993 y 1994. En principio, es similar a RAINBOW-1, aunque en la práctica es completamente diferente. RAINBOW-1 fue un sistema LAN orientado a interconectar usuarios de estaciones de trabajo. RAINBOW-2 esta dirigido a interconectar supercomputadoras.

RAINBOW-1 fue implementado en tarjetas adaptadoras PS/2 mientras que RAINBOW-2 es una tarjeta externa. Los principios ópticos y protocolos de los dos proyectos son muy similares pero RAINBOW-2 empieza a explorar aspectos del sistema para tomar ventaja del inmenso ancho de banda ahora disponible. RAINBOW-1 conecta 32 PS/2 a una velocidad de 300 Mb/s sobre 25 Km. RAINBOW-2 conecta 32 estaciones a una velocidad de 1 Gbps sobre una distancia máxima de 15 Km.

- 4) STARNET: Starnet [38] es una red óptica WDM LAN de gran ancho de banda basada en una topología estrella pasiva. STARNET trabaja a dos niveles sobre la misma red física. La subred de alta velocidad opera hasta una tasa de 2.488 Gbps por nodo y la subred de

velocidad moderada trabaja a 125 Mbps. La subred de alta velocidad trabaja para aplicaciones de gran ancho de banda y para servicios orientados a conexión, y es dinámicamente reconfigurable. La subred de velocidad moderada es compatible con FDDI. Esta subred soporta la transmisión de la información de control de la red y adicionalmente los datos para manejar la configuración de la subred de alta velocidad. De esta manera, STARNET puede soportar adecuadamente variado tipo de tráfico y es altamente adecuada para redes de aplicaciones multimedia y de videoconferencia.

7.2 Pruebas en WANs

Existen desarrollos conjuntos entre Europa y Estados Unidos para investigar las redes WAN WDM. Algunos proyectos notables son: RACE (Research and Development in Advanced Communications Technologies in Europe), Multiwavelength Optical Networking (MWTN), Optical Networks Technology Consortium (ONTC), y All-Optical Network (AON). Estos programas se enfocaron en el diseño de redes WDM así como también en el diseño de componentes ópticos a utilizarse en tales redes. Algunos componentes frutos de dichas investigaciones son los amplificadores EDFAs, los filtros AOTFs, las rejillas de Bragg, fibras de dispersión modificada, entre otros. En el Apéndice A se detalla las características de los dispositivos mencionados.

- 1) RACE MWTN: En [39] se hace referencia a este proyecto cuyo objetivo fue diseñar redes de transporte totalmente ópticos empleando conmutadores ópticos, cross-connects, transmisores, receptores y amplificadores. Este proyecto ha desarrollado principalmente dos elementos de red ópticos:

El conector cruzado óptico (OXC) y el multiplexor óptico de inserción/supresión (OADM). El OXC es un elemento de conmutación óptico para conmutación de redes. El OXC es capaz de realizar conmutación basada en longitud de onda a través del uso de filtros sintonizables. El multiplexor OADM adiciona o suprime una o más longitudes de onda. Con este sistema experimental se consiguió demostrar la capacidad de la red sobre

un área de 130 Km trabajando con cuatro longitudes de onda en la banda de 1550 nm con 0,62 Gbps por canal. Esta implementación ha sido diseñada principalmente para redes con topología tipo bus o anillo.

- 2) MONET: El objetivo del programa MONET [40] fue desarrollar una red óptica transparente, y explorar el potencial de las redes WDM. Con ese propósito se estudio la transmisión sobre largas distancias. En 1997, MONET logro transmisiones de 2.5 Gb/s sobre 2290 Km. El programa MONET empleo arreglos de láseres DFB con moduladores integrados, enrutadores de longitud de onda, etc. MONET mostró el manejo de WDM en un área extensa logrando gran ancho de banda de usuarios, constituyéndose en un gran paso hacia la viabilidad de los sistemas comerciales.

- 3) ONTC: El objetivo del programa ONTC [39] era construir una red óptica de prueba para explorar varios componentes WDM y estudiar las redes ATM/WDM. El experimento consistía de cuatro nodos de acceso conectados a dos anillos de fibra WDM vía cross-connects WDM 2 x 2. Los dos anillos de fibra también estaban conectados entre usando cross-connects WDM 2 x 2. Cada nodo de acceso estaba equipado con conmutadores ATM e interfaces ópticas SONET. Los nodos pueden insertar o extraer datos de la red, y también pueden proveer comunicaciones de paquetes con salto múltiple. Los elementos claves de la red son EDFAs, filtros sintonizables acústico-ópticos, multiplexores de inserción/supresión, transmisores de múltiples longitudes de onda, y receptores de múltiples longitudes de onda.

- 4) AON: En 1993, la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) auspicio un consorcio realizado por los laboratorios AT&T Bell Laboratories, Digital Equipment Corporation, y el Instituto Tecnológico de Massachusetts [19] para crear y desarrollar arquitecturas y tecnologías para explotar la gran capacidad de la fibra óptica para crear una infraestructura nacional capaz de proveer una capa flexible de transporte.

Las principales motivaciones de esta arquitectura son las siguientes:

La arquitectura debería ser capaz de escalar fácilmente hasta miles de nodos y proveer una infraestructura de comunicaciones en el ámbito nacional.

La arquitectura debería ser modular y flexible para incorporar futuros desarrollos en tecnología.

Su arquitectura emplea tres niveles de jerarquía. Para un tratamiento más detallado ver la sección 2.8.

- 5) OPEN: El proyecto OPEN [39] se desarrolló con el fin de demostrar la factibilidad de una red Pan-Europea, que interconecte las principales ciudades de Europa mediante una malla de enlaces de fibra óptica de alta capacidad, a través de nodos ópticos transparentes.

Este proyecto demuestra la factibilidad de una red óptica Pan-Europea usando tecnologías totalmente ópticas WDM para transmisión y enrutamiento. En el laboratorio de validación se ha estudiado las limitaciones de la capa física, así como también la factibilidad de una interface de alta velocidad OTDM/WDM, que ha resultado en una transmisión y enrutamiento de muy alta productividad. En la prueba final se transmitió cuatro canales desde Noruega a Dinamarca sobre una distancia de 1000 Km a una tasa de 2,5 Gbps por canal.

7.3 Sistemas de transmisión de alta capacidad

Recientemente los experimentos de la capacidad de transmisión en fibras ópticas monomodo se ha incrementado sensiblemente y continua en aumento. Estos sistemas prototipo no llevan datos reales y no están instalados “en el campo”. Estos experimentos muestran sin embargo, la capacidad de transmisión potencial de la fibra óptica.

Algunos experimentos de transmisión [41, 42] son los siguientes:

80 Gbps (Hitachi)

Este sistema emplea 8 canales de 10 Gbps sobre una distancia de 1171 Km. Fue construido usando tramos de 90.1 Km de fibra estándar con fibra de compensación de dispersión. Los EDFAs se ecualizaron usando filtros. Se trabajó con un BER mejor que 10^{-9} . Ver Sekine et al. Electronics Letters, June 22, 1995.

100 Gbps WDM (AT&T)

Este sistema usó 20 canales a 5 Gbps sobre una distancia de 6300 Km. Sus principales características de sistema fueron:

- Espaciamiento de canales de 0,6 nm.
Codificación NRZI estándar
El experimento usó 5 tramos de fibra de 1260 Km.
Se utilizó un diseño de manejo de dispersión, empleándose secciones de dispersión negativa conjuntamente con secciones de dispersión positiva.
Se emplearon 37 EDFAs con preénfasis para compensar las no linealidades de los amplificadores.
Se consiguió una tasa BER mejor que 6×10^{-10} para todos los canales.
Ver Bergano et al., Postdeadline paper at ECOC'95, (1995)

2,64 Tbps WDM (NEC)

Este es el experimento de mayor capacidad reportado a la fecha. Las características de sistema fueron las siguientes:

- 132 canales a 20 Gbps
Espaciamiento de canales de 0.25 nm en la banda de 1529-1564 nm.
Tramos de 120 Km entre EDFAs de ganancia compensada.
Se describe este sistema en un informe final de la conferencia ECOC'96.

320 Gbps (Bell Labs, Lucent)

Sesenta y cuatro canales WDM de 5 Gbps se transmiten sobre una distancia de 7200 Km. En este experimento se empleo un ancho de banda óptico muy angosto (19 nm en total). Las interacciones entre canales ópticos causadas por las no linealidades de la fibra fueron minimizadas usando fibra de dispersión modificada.

Ver Neal S. Bergano et al. (1997)

1 Tbps (Bell Labs, Lucent)

Esta demostración empleo 100 canales a 10 Gbps con 50 o 100 GHz de espaciamiento entre canales. El enlace de 400 Km fue construido usando fibra TrueWave. Se uso EDFAs de ultra ancho de banda con ganancia plana.

Ver A. K. Srivastava et al. (1997)

1 Tbps (NTT)

Este sistema fue el primero en utilizar dos bandas de longitud de onda simultáneamente. Se emplearon 50 canales en total, 20 en la banda de 1550 nm y 30 en la banda de 1580 nm. Todos los canales tienen una tasa de 20 Gbps sobre una distancia de 600 Km.

Ver S. Aisawa et al. (1997)

1,2 Tbps (Bell Labs, Lucent)

En este experimento se empleo 30 canales espaciados por 1 nm en la banda de 1534.5 nm a 1563.5 nm, trabajando a 40 Gbps sobre una distancia de 85 Km, usando fibra de tipo NZDF. Fue reportado en 1998 por C. C. Chen, I. Kim y otros, en la Conferencia de San José, California, paper PD-21.

Una tabla resumen conteniendo algunos parámetros de los más importantes sistemas desarrollados se muestra en la Tabla No. 7 [4, 42].

Tabla No. 7: Sistemas desarrollados con tecnología óptica

Año	Sist	Nombre	Org.	No. de long. de onda	Fuente	Trafico	Gbps por canal	Distancia (Km)	Tipo o sistema
71	L	-	IBM	5	LED	De prueba	1 MHz	3m	Exp.
85	B	-	Toshiba	4	LED	FM TV	4.5 MHz	5	Exp.
86	B	-	BTL	4	DFB	De prueba	0.28	5	Exp.
86	B	Lambdanet	Bellcore	18	DFB	De prueba	2	58	Tesbed
88	B	-	AT&T	3	DFB	De prueba	0.045	-	Exp.
90	B	-	NTT	100	DFB	De prueba	0.62	50	Testbed
91	R	-	BTL	3	DFB	De prueba	0.62	45	Exp.
91-94	B	Rainbow I, II	IBM	6	DFB	Video/FDDI/HIPPI	0.3-1	25	Testbed
91	B	Teranet	Columbia University	3	DFB	De prueba	1	-	Exp.
93	R	MWTN	BTL y otros	4	DFB	SDH	0.62	-	Prop.
93	B	STARNET	Stanford University	2		De prueba	2.5	-	Exp.
93	B	COSNET	Dutch PTT	3	DFB	Video	0.155	205	Tesbed
93	B	COBRA	Philips y otros	10	DFB	Video	0.14	10	Testbed
95	B, R	AON	AT&T/MI T/DEC	20	DBR	De tres clases	10	100	Testbed
95	R	ONTC	Bellcore	4	DFB	Video/ATM	0.155	150	Testbed
95	L	Model TXT	Pirelli	4	DFB	SONET	2.4	550	Producto
95	L	NLGN	AT&T	8	DFB	OC48	2.4	360	Producto
95	L	Modelo 9729	IBM	20	DFB	ESCON, FDDI	0.2 - 1	50	Producto
95		RACE COBRA	Philips y otros	16	DFB	ATM	2.4	50	Tesbed
96	-	-	Fujitsu	55	DFB y ECL	De prueba	20	150, 3 x 50	Exp.
95	-	-	AT&T	5	DFB y ECL	De prueba	20	55	Exp.
97	-	-	Bell Labs	64	DFB	De prueba	5	7200	Exp.
97	-	-	Bell Labs	100	DFB	De prueba	10	400	Exp.
97	-	-	NTT	50	DFB	De prueba	20	600; 10 x 60	Exp.
98	-	-	Bell Labs	30	DFB	De prueba	40	85	Exp.

L = Enlace B = Difusión R = Enrutamiento por longitud de onda

A partir de 1999 se esta incidiendo en llevar a cabo la implementación de las tecnologías desarrolladas en los experimentos para alcanzar productos comerciales.

La evolución de las redes ópticas en las telecomunicaciones ocurrirá en diferentes fases de acuerdo a los distintos mercados, dado que cada escenario presenta diferentes necesidades de capacidad de tráfico. En conjunto se predice que el crecimiento estimado será enorme.

1. Redes de larga distancia (long-haul)

En ninguna otra parte el ancho de banda es devorado tan rápidamente como en las redes de larga distancia. Llegando a medir en muchos casos hasta miles de kilómetros millas, el mercado de las redes de larga distancia es diferente a los otros mercados en varios conceptos importantes: los largos tramos entre los nodos y los requisitos del ancho de banda son sumamente altos.

Las redes de larga distancia fueron las primeras en que se pusieron de manifiesto la gran potencia de los amplificadores ópticos y de los sistemas de gran ancho de banda WDM/DWDM, debido principalmente a las reducciones de costo. Los amplificadores ópticos son una alternativa más económica respecto de un número grande de regeneradores eléctricos en un tramo determinado. Además, los portadores de tráfico aumentaron la capacidad de fibra empleando WDM que evita los gastos grandes de instalar la nueva fibra. Por lo que el escenario natural para las redes completamente ópticas son este tipo de redes.

En resumen, en este contexto mediante DWDM se pueden emplear las redes totalmente para :

- a. Redes de larga distancia (long-haul).
- b. Backbone de redes IP, ATM, SDH/SONET
- c. Redes de gran ancho de banda: 10 Gbps (STM-64, OC-192) y 40 Gbps (STM-256, OC-768)
- d. Enlaces punto a punto, redes malla.

2. Redes interoficinas metropolitanas (Interoffice Metropolitan Networks)

Las redes en el mercado interoficinas metropolitano tienen una diferente clase de necesidades de las tecnologías ópticas. Este tipo de redes son las que típicamente están más interconectadas. Debido a los patrones de tráfico y distancias entre oficinas, se emplean anillos ópticos y conectores cruzados ópticos. Estas redes no solo necesitan tráfico distribuido a lo largo de una

región sino también conectarse a las redes de larga distancia. Mediante CWDM se pueden emplear las redes totalmente ópticas para:

- a. Tráfico mixto
- b. Acceso a banda base
- c. Para distancias cortas
- d. Velocidades relativamente bajas, 622 Mbps (STM-4, OC-12) y 2,5 Gbps (STM-16, OC-48).

3. Redes empresariales

Este tipo de redes provee conexiones para empresas con la infraestructura de telecomunicaciones. Aquí las aplicaciones de las redes ópticas no se muestran muy claras debido a las complejidades de este tipo de redes, que a menudo emplean diferentes interfaces, velocidades variables, distintas estructuras de costos, y diferentes necesidades de capacidad. Un componente importante en esta aplicación es el transpondedor asincrónico que permite manejar distintas velocidades de datos para entrar a la red óptica y emplear DWDM. Una consideración importante para el diseño de redes en esta aplicación es el de reducir los costos y posibilitar servicios de calidad en ellas. Se debe tener en cuenta especialmente las consideraciones de seguridad en las mismas.

Capítulo 8

Futuro de las Redes totalmente ópticas

Aunque el conjunto de aplicaciones actuales de las redes totalmente ópticas está algo restringido, se ha comprobado que dichas redes explotan efectivamente un gran ancho de banda. La verdadera prueba de la utilidad de las redes totalmente ópticas radicará en que ofrezcan una solución superior a las alternativas actuales existentes, y a un costo competitivo; particularmente respecto a las redes actuales de comunicaciones.

Con respecto a nuestras redes nacionales, dado que las tasas de transmisión empleadas en las comunicaciones continúan creciendo, en algún momento dado, el flujo de tráfico será tan alto que no pueda ser soportado eficientemente por estas redes. En este contexto, soluciones tales como las redes totalmente ópticas podrían empezar a ser consideradas.

Sin embargo, a pesar de los continuos avances en dispositivos, técnicas, topologías, etc., permanece en pie la pregunta, ¿Cuán rápidamente se conseguirá reducciones significativas como para hacer viable la propuesta totalmente óptica? Este es el problema que en principio debe ser resuelto.

Actualmente la investigación en dispositivos ópticos ha logrado ampliar grandemente la capacidad de los sistemas. Tal se aprecia por ejemplo en la figura 8.1, en la que se muestra un tipo de fibra óptica conocido como Zero-OH, que elimina el pico de atenuación de agua a 1385 nm, lo cual permite la transmisión continua sobre el rango desde 1200 a 1600 nm.

Asimismo, se puede observar en la parte derecha de la figura el manejo mejorado de la dispersión, la cual es mucho menor con los tipos de fibra tales como Non Zero Dispersión Shifted Fiber (NZDSF) y la Dispersión Shifted Fiber (DSF), en comparación con la fibra monomodo estándar; en particular para el rango de longitudes de onda para el cual trabajan los amplificadores EDFAs.

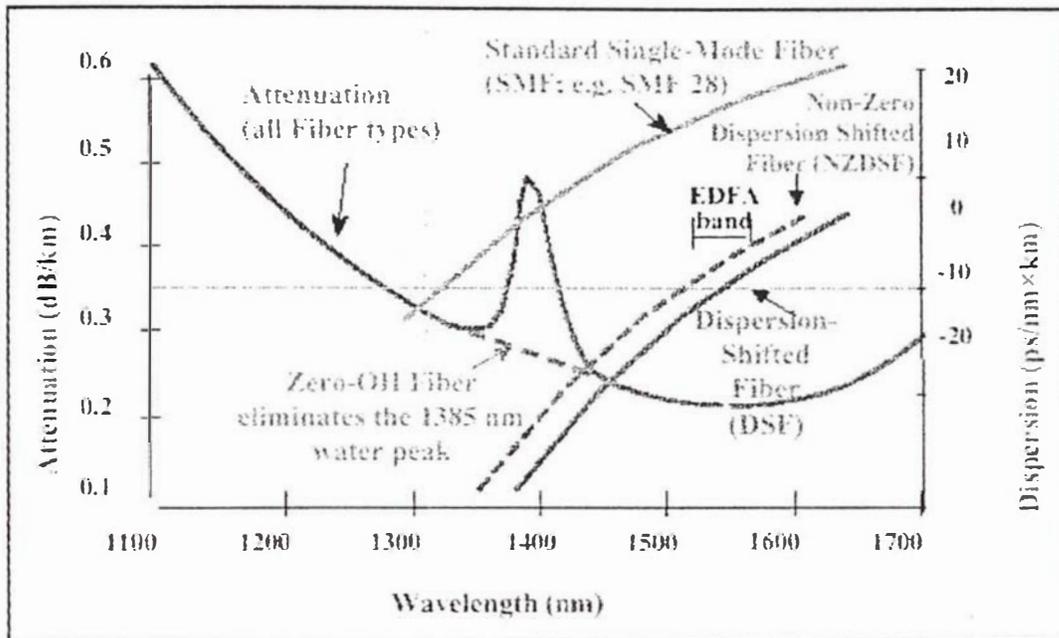


Figura 8.1 Tipos de fibras de transmisión [43]

En la figura 8.2 se observa las nuevas ventanas de transmisión con las cuales se intenta aumentar la capacidad de transmisión de los sistemas ópticos, para lo cual deberá diseñarse dispositivos adecuados que permitan la operación en tales rangos de longitud de onda.

Por otro lado, el espaciamiento cada vez mayor entre regeneradores en comunicaciones disminuye los costos de los enlaces. Recordemos por ejemplo que el sistema digital T1 que se introdujo en 1962, tenía la capacidad de portar 24 canales de voz sobre par trenzado de cobre a una tasa de 1.5 Mbps. La regeneración para sistemas T1 se hacía en tramos de 2 Km.

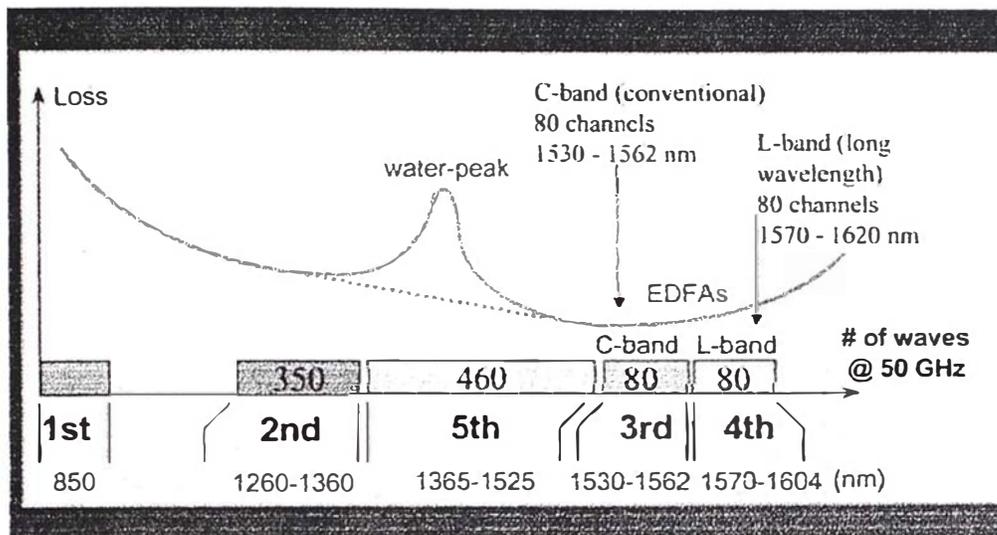


Figura 8.2 Ventanas de transmisión incluyendo las ventanas experimentales (4ta y 5ta) [43]

El cable coaxial fue introducido a comienzos de lo 1980's mediante el sistema T4. Este sistema tenía una capacidad de transmisión de 274 Mbps con un espaciamiento entre regeneradores de 1,6 Km. En comparación, el espaciamiento típico de los sistemas basados en fibra óptica es 50 Km y puede alcanzar los cientos de kilómetros como se muestra en la Tabla No. 8.

Tabla No. 8 Generaciones de tecnologías ópticas terrestres [44]

Sistema	Año	Tipo de fibra	Longitud de onda	Canales WDM	Tasa por canal	Tasa por fibra	Canales de voz por fibra	Distancia de regeneración
FT3	1980	MM	0,82 μ m	1	45 Mbps	45 Mbps	672	7 Km
FT3C	1983	MM	0,82 μ m	1	90 Mbps	90 Mbps	1 344	7 Km
FTG-417	1985	SM	1,3 μ m	1	417 Mbps	417 Mbps	6 048	50 Km
FTG-1.7	1987	SM	1,3 μ m	1	1,7 Gbps	1,7 Gbps	24 192	50 Km
FTG-1.7 WDM	1989	SM	1.3/1.55 μ m	2	1,7 Gbps	3,4 Gbps	48 384	50 Km
FT-2000	1992	SM	1,3 μ m	1	2,5 Gbps	2,5 Gbps	32 256	50 Km
FT-2000 WDM	----	SM	1.3/1.55 μ m	2	2,5 Gbps	5 Gbps	64 120	50 Km
NGLN	1995	SM	1.55 μ m	8	2,5 Gbps	20 Gbps	258 000	360 Km
NGLN II	1997	SM	1,55 μ m	16	2,5 Gbps	40 Gbps	516 000	360 Km
WaveStar™ 400G	1999	SM	1,55 μ m	80	2,5 Gbps	200 Gbps	2 580 000	640 Km
				40	10 Gbps	400 Gbps	5 160 000	640 Km

MM – Multimode

SM – Single mode

NGLN- Next-Generation Lightwave Network

El dramático incremento de la capacidad de los sistemas ópticos ha tenido un fuerte impacto en la reducción de los costos de transmisión a larga distancia [44]. La regla de Dixon-Clapp proyecta

que el costo por canal de voz se reduce con la raíz cuadrada de la capacidad de los sistemas. Empleando esta regla se deduce que el costo de la tecnología de transmisión de un canal de voz decrece por un factor de 10 cada diez años.

La infraestructura de las telecomunicaciones esta actualmente evolucionando hacia incrementos heterogéneos pero interconectado de redes. Las redes ópticas están siendo ampliamente utilizadas en aplicaciones de larga distancia y para altas tasas de transmisión. El progreso de las telecomunicaciones ha llegado a la fecha hacia la evolución de servicios de comunicación multimedia en la Red de Servicios Integrados de Banda Ancha (B-ISDN).

Con la idea de ahorrar costos se emplea una red óptica pasiva (PON) con lo cual se puede lograr un gran ancho de banda a un costo reducido. En una PON, una única fibra conecta la oficina central a un distribuidor óptico pasivo, que distribuye la señal a 16 unidades de red ópticas (ONUs). Las ONUs realizan la conversión óptica-eléctrica y distribuyen el servicio a unidades activas. Si una ONU esta localizada en una casa, se describe al sistema como FTTH (Fiber-to-the-home); si la ONU esta compartida entre algunos usuarios (4 a 32) unidades activas, el sistema se denomina FTTC (Fiber-to-the-curb). Una PON es más adecuada en costo que enlazar una fibra a cada ONU porque los costos de la conversión optoelectrónica y de la fibra son compartidos entre múltiples usuarios. Por otro lado, con las PONs puede lograrse mayor productividad de transmisión sin necesidad de introducir complejos protocolos si la PON separa el tráfico de usuario en base a la longitud de onda.

Un grupo de operadores de red han creado el consorcio de Red de Acceso de Servicios Totales (FSAN). Mediante la especificación de una plataforma común a ser desarrollada por un gran número de operadores de red, la FSAN espera reducir los costos de los sistemas PON. La red FSAN es una red WDM (CWDM) PON común que usa la banda de 1,5 μm para transmisiones de flujo abajo y la banda de 1,3 μm para transmisiones flujo arriba. La señalización se realiza a 155 Mbps en ambos sentidos, con un protocolo TDMA implementado para transmisión hacia arriba. Los servicios de voz y datos se realizan usando celdas ATM.

La arquitectura más efectiva en costo WDM PON emplea una PON compuesta (CPON) que opera con una DWDM PON con una longitud de onda separada para cada ONU (en la banda de 1,5 um) en la dirección de flujo de bajada y como una TDMA PON (con todas las ONUs compartiendo la banda de 1,3 um) en la dirección de subida.

Simultáneamente se desarrollan los sistemas con fibra óptica para transmisión del servicio de televisión por cable (CATV). En este caso, los sistemas más apropiados son los que emplean DWDM, lográndose portar mayor cantidad de canales con una calidad de señal de video de alta calidad.

La penetración actual de las redes ópticas esta limitada a coyunturas donde los niveles de costo de las alternativas son muy altos. Como con el tiempo, las soluciones se volverán más económicas, el conjunto de las aplicaciones se difundirá, comenzando con enlaces locales WDM, luego se extenderá a las redes MAN de difusión y selección para algunas aplicaciones de gran ancho de banda como vídeo no comprimido o interconexión de supercomputadoras.

La inserción de las redes totalmente ópticas en la infraestructura de comunicaciones existente presumiblemente tome lugar en varias etapas. Dichas etapas en que se lograría tal migración son similares a las etapas en que se desarrollaron las redes digitales de alta velocidad.

- Primero, se tendría la aplicación en enlaces punto a punto en redes tipo long-haul.
- Por analogía al desarrollo de las redes TDM, el siguiente paso hacia las redes totalmente ópticas son las redes tipo WDM anillo. Para proveer mayor conectividad y protección frente a fallas, los anillos simples WDM pueden estar interconectados en una malla de anillos.
- Luego de que la transmisión WDM se hace técnica y económicamente factible se emplean las redes pasivas WDM con enrutamiento estático, punto a multipunto.
- Las redes con enrutamiento por longitud de onda sería la siguiente etapa lógica en el proceso de extensión hacia las redes totalmente ópticas.
- Finalmente se introducirán las redes totalmente ópticas (fotónicas) con el empleo de WADMs y redes reconfigurables WDM multipunto.

Capítulo 9

Conclusiones

9.1 Introducción

En los primeros capítulos del presente trabajo se ha revisado los conceptos involucrados en el desarrollo de las redes totalmente ópticas, los dispositivos, técnicas de multiplexación, principios de topologías y arquitecturas; con la idea de mostrar que tan íntimamente ligados se encuentran. Se aborda seguidamente el problema del diseño de redes totalmente ópticas.

En esta tesis se ha abordado un aspecto trascendental sobre las redes de comunicaciones del futuro, que deberán ser capaces de soportar la transmisión de grandes flujos de información y de prestar servicios de calidad. Para enfrentar a este problema se analiza integralmente la propuesta de la red totalmente óptica, a la luz de las modernas tecnologías e investigaciones desarrolladas en tales redes.

9.2 Conclusiones

Al tratar el tema de la operación, administración y mantenimiento de las redes totalmente ópticas se enfrenta ante la difícil tarea de suministrar estas funciones en el dominio óptico. Una consideración importante que ha sido tomada en cuenta en la operación de las redes ópticas es el de darle protección ante alguna eventual falla, con lo cual el sistema se vuelve más confiable.

Las limitaciones del sistema de transmisión óptico nos presentan un desafío principalmente respecto a la construcción de dispositivos que posean respuesta mejorada, con lo cual se podría elevar la capacidad total del sistema. El futuro de las redes totalmente ópticas está fuertemente

condicionado a superar las actuales limitaciones que restringen las conmutaciones en el nivel óptico y en reducir la dispersión, que tiende a aumentar en sistemas de alta capacidad de transmisión. De todo lo tratado se puede extraer las siguientes conclusiones:

Si se desea incrementar la capacidad y el rendimiento de un sistema de comunicaciones óptico no se puede descuidar ninguno de los elementos que conforman el sistema completo.

El salto hacia las redes totalmente ópticas dependerá en grado sumo del desarrollo de dispositivos que presenten características de respuesta de ancho de banda mejoradas y poco sensibles tanto a la diafonía como a la dispersión.

El procesamiento en los nodos, para que pueda ser realizado en el dominio óptico deberá ser bastante simple, habida cuenta de que los dispositivos ópticos no poseen una memoria eficiente.

La topología de una red es determinante en la conectividad de la misma, por lo es preferible implementar una topología lógica regular, que ofrece un sencillo conexionamiento y enrutamiento de las comunicaciones.

Los dispositivos actualmente desarrollados tales como las rejillas de Bragg, filtros AOTF, los OADMs, los EDFAs, OXCs, WGRs ofrecen soluciones en productividad (ancho de banda*distancia) de sistema a un costo menor que sus pares de tecnología electrónica. Por lo que se puede esperar que cuando se desarrollen y perfeccionen otros dispositivos ópticos como por ejemplo el conmutador totalmente óptico, se tenga una solución totalmente óptica efectiva en costo a las comunicaciones de gran ancho de banda.

Dado que cada elemento óptico es de naturaleza analógica, el ruido y la dispersión generada se acumulan a lo largo del recorrido de la señal, lo cual va deteriorando la misma. Para reducir la dispersión cuando se requiere transmisión de gran velocidad en tramos largos, se debe de utilizar una combinación de distintos tipos de fibra, tales como SMF, DSF, NZDSF, DCF, entre otros.

La capacidad de los sistemas esta influenciada por el tipo de fibra a utilizar en la red y el espaciamiento entre canales. Cuando se incrementa el número de canales de transmisión se reduce el espacio entre longitudes de onda, lo cual puede reducir la performance del sistema. Además, a mayor cantidad de canales se necesita mayor

potencia de transmisión para mantener el SNR, y tener muy pocas longitudes de onda disponibles en el sistema resulta en una conectividad menor, por lo que es necesario una solución ingenieril de optimización de un objetivo específico a ser logrado en la transmisión.

El manejo de capas de red permite simplificar el diseño, desarrollo y operación de la red totalmente óptica, y asimismo esto permite una evolución paulatina de la red en armonía con la demanda de los usuarios.

Para grandes flujos de tráfico los anillos SONET son inefficientes. Mejorar la infraestructura necesitaría demasiados anillos. Por otro lado, las redes tipo malla son más eficientes tanto en rutas de servicio como para reserva o restauración.

Un buen sistema de corrección de errores puede ayudar a disminuir el efecto de la acumulación de ruido.

El enrutamiento por longitud de onda permite mantener la transparencia de la red. Los algoritmos de enrutamiento deben de ser tipo heurístico para facilitar la respuesta del sistema y simplificar en lo posible el procesamiento para el direccionamiento .

Las redes totalmente ópticas tienen las siguientes ventajas:

- a) Se elimina el costo de las conversiones O/E/O. Se reduce el equipamiento a la vez que se simplifica la infraestructura de la red.
- b) La red es más flexible a los cambios de demanda de tráfico.
- c) La función de conversión de longitud de onda otorga gran escalabilidad a las redes WDM debido a que ofrecen un amplio grado de transparencia.
- d) Se dispone de gran ancho de banda para atender las demandas actuales y futuras.

Por otro lado, entre las actuales desventajas, se tiene:

- a) A grandes velocidades la red es muy sensible al efecto de dispersión de modo de polarización (PMD).
- b) Es muy sensible a la dispersión cromática.
- c) Es afectada por la acumulación de ruido a largo de su trayecto.
- d) El control de la red no es sencillo de realizar debido a la dificultad de monitoreo de portadoras analógicas.

En contrapartida, con ayuda de la tecnología de los solitones se puede combatir tanto la dispersión cromática, como la de modo de polarización.

Con respecto a las arquitecturas, una red lineal óptica LLN operando en el modo WDM, con conexiones que son suministradas a demanda entre sus usuarios, logra una masiva explotación del ancho de banda óptico.

La arquitectura jerárquica AON, ofrece una alta performance y es uno de los candidatos de fuerza para las futuras implementaciones de redes de comunicaciones totalmente ópticas.

La técnica OTDM es una alternativa a tener en cuenta en las redes del futuro, la misma que combinada con la técnica WDM ofrece alto rendimiento y calidad de servicios en canales ultrarrápidos y transparentes.

Referencias

- [1] C. A. Brackett, "Is there an Emerging consensus on WDM networking?, " IEEE J. Lightwave Technology, vol. 14, pp. 936-941, June 1996.
- [2] T. Shiozawa, M. Shibutani, and J. Namiki, "Upstream-FDMA/Downstream-TDM Optical Fiber Multiaccess Network," IEEE J. Lightwave Technology, vol. 11, No. 5/6, May/Jun, pp. 1034-1039, 1993
- [3] Biswanath Mukherjee, "WDM Optical Communication Networks: Progress and Challenges," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 18, No. 10, pp. 1810-1824, Oct. 2000.
- [4] Paul E. Green, Jr. , "Optical Network Update," IEEE Journal on Select Areas in Communications, Vol. 14, No. 5, pp. 764-779, June 1996.
- [5] Seung-Woo, K. Bergman and P. Prucnal, "Transparent Optical Networks with Time-Division Multiplexing," IEEE J. Selected Areas in Communications, Vol. 14, No. 5, pp. 1039-1050, June 1996
- [6] Mari W. Maeda, "Management and Control of Transparent Optical Networks," IEEE J. Selected Areas in Communications, Vol. 16, No.7, pp. 1008-1023, Sept. 1998.
- [7] F. Kerfoot and W. C. Marra, "Undersea Fiber Optic Networks: Past, Present, and Future", IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol. 16 No. 7, pp. 1220-1225, Sept. 1998.
- [8] R. Ramaswasmi and K. N. Sivarajan, "Design of Logical Topologies for Wavelength-Routed Optical Networks," IEEE J. Selected Areas in Communications, Vol. 14, No. 5, pp. 840-851, June 1996.
- [9] B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy and A. Mukherjee, "Some Principles for a Designing a Wide-area WDM Optical Network", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 4, No. 5, pp.684-696, Oct. 1996.

- [10] Z. Zhang and A. Acampora, "A Heuristic Wavelength Assignment Algorithm for Multihop WDM Networks with Wavelength Routing and Wavelength Reuse" Proc. IEEE Infocom '94, pp 543-543, Toronto, Jun. 1993.
- [11] Subrata Banerjee, "Design, Analysis, and Implementation of Wavelength-Routed All-Optical Networks: Routing and Wavelength Assignment Approach, Stevens Institute of Technology, Hoboken, NJ07030, IEEE, , 61 p., May. 1997.
- [12] M. W. Chbat, E. Grard, L. Berthelon, A. Jourdan, P. A. Perrier, and others, "Toward Wide-Scale All-Optical Transparent Networking: The ACTS Optical Pan-European Network (OPEN) Project," IEEE J. Selected Areas in Communications, Vol. 16, No. 7, pp. 1226-1244, Sept. 1998.
- [13] K. Sivarajan and R. Ramaswami, "Multihop Lightwave Network Based on the Bruijn graphs", IEEE INFOCOM '91, Bal Harbor, FL, pp. 1001-1011, Apr. 1991.
- [14] L. N. Bhyan and D. P. Agrawal, "Generalized hypercube and hypercube structures for a computer network", IEEE Trans. Computers, vol. C-33, No. 4, pp. 323-333, Apr. 1984.
- [15] Subrata Banerjee, Vivek Jain y Sanjay Shah, "Regular Multihop Logical Topologies for Lightwave Networks", IEEE Communications Surveys, pp. 2-18 1999.
- [16] S. P. Monacos, J. M. Morookian, L. Davis, L. A. Bergman, S. Forouhar and J. R. Sauer, "All-Optical WDM Packet Networks," IEEE J. Lightwave Technology, Vol. 14, No. 6, pp. 1356-1369, Jun. 1996.
- [17] T. E. Stern, K. Bala, S. Jiang, and J. Sharony, "Linear Lightwave Networks: Performance Issues," IEEE J. Lightwave Technology, Vol. 11, No. 5/6, pp. 937-950, May/June 1993.
- [18] I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi, "Lightnets: Topologies for High-Speed Optical Networks," IEEE J. Lightwave Technology, Vol. 11, No. 5/6, pp. 951-962, May/June 1993.
- [19] MIT Lincoln Laboratory. Link: All Optical Networking Consortium.
- [20] E. Karasan, and E. Ayanoglu, "Performance of WDM Transport Networks," IEEE J. Selected Areas in Communications, Vol. 16, No. 7, pp. 1081-1095, Sept. 1998.
- [21] Stefano Baroni and Polina Bayvel, "Wavelength Requirements in Arbitrarily Connected Wavelength-Routed Optical Networks", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 2, pp. 242-251, Feb. 1997.

- [22] Louis A. Cox, Jr. and Jennifer Sánchez, “Cost savings from optimized packing and grooming of optical circuits: mesh versus ring comparisons”, *Optical Networks Magazine*, pp. 72-90, May/Jun 2001.
- [23] S. Johansson, A. Manzalini, M. Giannoccaro, R. Cadedu, M. Giorgi, R. Clemente, R. Brandstrom, A. Gladisch, J. Chawki, L. Gillner, Peter Ohlen, and E. Bergling, “A Cost-Effective Approach to Introduce an Optical WDM Network in the Metropolitan Environment”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 16, No. 7, pp. 1109-1121, Sept. 1998
- [24] S. Baroni, P. Bayvel, R. J. Gibbens and S. K. Korothy, “Analysis and Design of Resilient Multifiber Wavelength-Routed Optical Transport Networks”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 5, pp. 743-758, May. 1999.
- [25] Michael Düser, Eugene Kozlovsky, Robert I. Killey and Polina Bayvel, “Distributed Router Architecture for Packet-Routed Optical Networks”, *Optical Networks Group, Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London*, pp. 1-16, May. 2000.
- [26] L. Tančevsky, S. Yegnanarayanan, G. Castanon, L. Tamil, F. Masetti and T. McDermott, “Optical Routing of Asynchronous, Variable Length Packets”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, No. 10, pp. 2084-2093, Oct. 2000.
- [27] Ezham Karasan and Ender Ayanoglu, “Performance of WDM Transport Networks”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 16, No. 7, pp. 1081-1095, Sept. 1998.
- [28] X. Y. Zou, M. I. Hayee, S. M. Hwang, and A. E. Willner, “Limitations in 10 Gb/s WDM Optical-Fiber Transmission When Using a Variety of Fiber Types to Manage Dispersion and Nonlinearities,” *IEEE J. Lightwave Technology*, Vol. 14, No. 6, pp. 1144-1152, June 1996.
- [29] J. L. Jackel, M. S. Goodman, J. E. Baran, W. J. Tomlinson, G. Kung, M. Z. Iqbal, G. H. Song, K. Bala, C. A. Brackett, D. A. , and others, “Acoustic-Optic Tunable Filters (AOTF’s) for Multiwavelength Optical Cross-Connects: Crosstalk Considerations,” *IEEE J. Lightwave Technology*, Vol. 14, No. 6, pp. 1056-1066, Jun. 1996.
- [30] Yasuhiro Miyao y Hiroyuki Saito, “Optimal Design and Evaluation of Survivable WDM Transport Networks”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* Vol. 16, No. 7, Sept. 1998, pp. 1190-1217.

- [31] P. Arijs, B. Van Caenegem, P. Demeester, P. Lagasse, W. Van Parys and P. Achten, "Design of Ring and Mesh based WDM Transport Networks", *Optical Networks Magazine*, July 2000, pp. 25-40.
- [32] B. T. Doshi, S. Dravida, P. Harshavardhana, O. Hauser, and Y. Wang, "Optical Network Design and Restoration", *Bell Labs Technical Journal*, pp. 58-84, Jan./Mar 1999.
- [33] G. M. Bernstein, J. Yates y D. Saha, "IP-Centric and Management of Optical Transport Networks", *IEEE Communications Magazine*, pp. 2-8, Oct. 2000.
- [34] O. K. Tonguz, and K. A. Falcone, "Fiber-Optic Interconnection of Local Area Networks: Physical Limitations of Topologies," *IEEE J. Lightwave Technology*, Vol. 11, No. 5/6, pp. 1040-1052, May/June 1993.
- [35] M. S. Goodman, H. Kobrinisky, M. P. Vecchi, R. M. Bulley, and J. L. Gimlett, "The LAMBDANET Multiwavelength Network: Architecture, application, and demonstrations", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 8, No. 6, pp. 995-1004 Aug. 1990.
- [36] Jason P. Jue, Michael S. Borella, and Biswanath Mukherjee, "Performance Analysis of the Rainbow WDM Optical Network Prototype", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 14, No. 5, pp. 945-951, Jun. 1996.
- [37] Eric Hall, J. Kravitz, R. Ramaswami, M. Halvison, S. Taibrink and R. Thomsen, "The Rainbow-II Gigabit Optical Network", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 14, No. 5, pp. 814-823, Jun. 1996.
- [38] Ting-Kuang Chiang, S. K. Agrawal, D. T. Mayweather, D. Sadot, Ch. F. Barry, M. Hickey and L. G. Kazovsky, "Implementation of STARNET: A WDM Computer Communications Network", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 14, No. 5, pp. 824-838, Jun. 1996.
- [39] M. Borella, J. P. Jue, D. Banerjee, B. Ramamurthy and B. Mukherjee, "Optical Components for WDM Lightwave Networks," *IEEE Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, No. 8, pp. 1274-1306, Aug. 1997.
- [40] Richard E. Wagner, Rod C. Alferness, A. A. Saleh and M. S. Goodman, "MONET: Multiwavelength Optical Networking", *Journal of Lightwave Technologies*, Vol. 14, No. 6, pp. 1349-1355, Jun. 1996.

- [41] Harry J. R. Dutton, "Understanding Optical Communication" , International Support Organization, IBM Redbooks, Sept. 1998.
- [42] A. R. Chraplyvy, "High-Capacity Lightwave Transmission Experiments", Bell Labs Technical Journal; pp. 230-245, Jan/Mar 1999.
- [43] Richard Barry, "Optical Networking Technologies" , Sycamore Networks Inc., Conference Papers, NGN, 2001.
- [44] Red C. Alferness, Herwing Kogelnik and Tomas H. Wood, "The Evolution of Optical Systems: Optics everywhere", Bell Labs Technical Journal, pp. 188-202, Jan/Mar 2000.
- [45] A. M. Glass, D. J. Di Giovanni, T. A. Strusser and others, "Advances in Fiber Optics" Bell Lab. Technical Journal, pp. 168-177, Jan/Mar 2000.
- [46] Y. Sun, A. K. Srivastava, J. Zhou and J. W. Sulhoff, "Optical Fiber Amplifiers for WDM Optical Networks", Bell Lab Technical Journal, pp.187-199, Jan/Mar 1999.
- [47] R. Giles and T. Li, "Optical Amplifiers Transform Long-Distance Lightwave Telecommunications", Proceedings of the IEEE Vol. 84 No. 6, pp. 870-883, June 1996.
- [48] B. Ramamurthy and B. Mukherjee, "Wavelength Conversion in WDM Networking," IEEE J. Selected Areas in Communications, Vol. 16, No.7, pp.1061-1073, Sept. 1998.
- [49] Vivek Arya, "Analysis, Design and Performance Evaluation of Optical Fiber Spectrum-Sliced WDM Systems" Thesis, p. 16, 2000
- [50] R. A. Barry, V. W. S. Chan, K. L. Hall, E. S. Kintzer, J. D. Moores and others, "All-Optical Network Consortium-Ultrafast TDM Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 14, No. 5, pp. 999-1012, June 1996.