

DEFINICION DE CRITERIOS DE DISEÑO PARA REDES OPTICAS DWDM.



**ALEIDA RODRÍGUEZ MANCILLA
LIDA MARGOTH ANACONA IPIA**

Trabajo Final de Grado para optar al título de
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Director:

ing. LUIS FELIPE CADENA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES**

POPAYÁN

2004

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|---|----------|
| INTRODUCCION | |
| 1. VISION GENERAL Y ACTUAL ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES 100% PTICAS..... | 1 |
| 1.1 LA FIBRA OPTICA..... | 1 |
| 1.2 DEMANDA DE GRAN ANCHO DE BANDA..... | 1 |
| 1.3 REDES 100% OPTICAS..... | 3 |
| 1.4 TÉCNICAS DE MULTIPLEXACIÓN..... | 4 |
| 1.4.1 WDM: multiplexación por división de longitud de onda..... | 4 |
| 1.4.2 Multiplexación por división aproximada de longitud de onda..... | 5 |
| 1.4.3 multiplexación óptica por división de tiempo: OTDM..... | 6 |
| 1.4.4 multiplexación óptica por división de código: OCDM..... | 6 |
| 2. FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA DWDM..... | 7 |
| 2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN SISTEMA DWDM..... | 8 |
| 2.2 EMISORES ÓPTICOS EN UN SISTEMA DWDM..... | 11 |
| 2.2.1 Características de los dispositivos láser en sistemas DWDM..... | 12 |
| 2.2.2 Tipos de dispositivos láser sintonizables..... | 13 |
| 2.2.2.1 Dispositivo láser de Realimentación Distribuida..... | 13 |
| 2.2.2.2 Dispositivo láser sintonizable mecánicamente Fabry- Perot..... | 14 |
| 2.3 MODULACIÓN ÓPTICA..... | 14 |
| 2.3.1 Ejemplo de moduladores..... | 15 |
| 2.3.2 Multiplexación..... | 15 |
| 2.3.2.1 Adaptación de longitud de onda..... | 15 |
| 2.3.2.2. Conversión de Longitud de onda..... | 16 |
| 2.3.3 Multiplexores por división de longitud de onda densa..... | 19 |
| 2.3.3.1 Técnicas de multiplexación óptica en sistemas DWDM..... | 19 |
| 2.4 AMPLIFICACIÓN ÓPTICA EN SISTEMAS DWDM..... | 22 |
| 2.4.1 Parámetros básicos de los amplificadores ópticos..... | 22 |
| 2.4.2 Amplificador de fibra dopado con erbio (EDFA)..... | 23 |
| 2.5 TRANSMISIÓN DE LAS SEÑALES ÓPTICAS..... | 25 |
| 2.5.1 NDSF (Non-Dispersion-Shifted Fiber)..... | 26 |
| 2.5.2 DSF (Dispersion-Shifted Fiber)..... | 27 |
| 2.5.3 NZ-DSF (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber)..... | 28 |

| | |
|--|-----------|
| 2.5.4 Características generales de las fibras ópticas..... | 29 |
| 2.6 RECEPTORES ÓPTICOS..... | 29 |
| 2.6.1 Fotodetectores..... | 30 |
| 2.6.2 Filtros..... | 31 |
| 2.6.3 Demultiplexores ópticos..... | 31 |
| 2.6.3.1 Multiplexor óptico de inserción-extracción (OADM)..... | 32 |
| 2.6.3.2 Cross conectores ópticos..... | 33 |
| 2.7 PROTOCOLOS UTILIZADOS EN LA TRANSMISIÓN ÓPTICA..... | 33 |
| 2.7.1 características y funcionamiento de MPLS..... | 34 |
| 2.7.2 red óptica transparente con conmutación de paquetes (OPTN)..... | 36 |
| 2.7.2.1 formato de los paquetes ópticos..... | 35 |
| 2.7.2.2 alineación de paquetes..... | 37 |
| 2.7.3 conmutación óptica a ráfagas (OBS)..... | 41 |
| 2.7.3.1 Arquitectura..... | 42 |
| 2.7.3.2 Control y señalización en OBS..... | 43 |
| 2.8 DESVENTAJAS DEL ENCAMINAMIENTO POR LONGITUD DE ONDA..... | 44 |
| 3. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO DE UN SISTEMA DWDM..... | 45 |
| 3.1 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE UNA RED ÓPTICA..... | 45 |
| 3.2 ARQUITECTURAS DE LAS REDES 100% ÓPTICAS..... | 45 |
| 3.2.1 Tipos de arquitecturas ópticas..... | 46 |
| 3.2.2 Diseño de arquitecturas de redes DWDM..... | 47 |
| 3.2.3 Parámetros de calidad óptica relacionados con el diseño de redes DWDM..... | 48 |
| 3.3. CRITERIOS GENERALES PARA EL DISEÑO DE REDES 100% OPTICAS..... | 50 |
| 3.3.1 Enrutamiento a nivel óptico..... | 51 |
| 3.3.2 Numero de longitudes de onda..... | 52 |
| 3.3.3 Criterios de diseño relacionados con la potencia..... | 53 |
| 3.3.3.1 Atenuación..... | 53 |
| 3.3.3.2 potencia mínima de canal..... | 54 |
| 3.3.3.3 Potencia Máxima de canal..... | 56 |
| 3.3.3.4 Gama para la potencia de canal..... | 57 |
| 3.3.3.5 Potencia total máxima..... | 58 |
| 3.3.4 Monitoreo de Desempeño y localización de Fallas en el EDFA..... | 60 |
| 3.3.5 Diafonía..... | 61 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.3.6 | Dispersión..... | 62 |
| 3.3.7 | Desviación de la frecuencia central..... | 62 |
| 3.3.8 | Sensibilidad del receptor..... | 62 |
| 3.3.9 | Plan de longitudes de onda..... | 63 |
| 3.4 | CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE DWDM BIDIRECCIONAL..... | 64 |
| 3.5 | PARÁMETROS DE DISEÑO RELACIONADOS CON LA TOPOLOGÍA DE LA RED..... | 64 |
| 3.5.1 | Identificación de la limitación de los parámetros físicos de la red..... | 66 |
| 3.5.2 | Parámetros de diseño relacionados con las limitaciones físicas..... | 68 |
| 3.5.3 | Limitaciones debido a al conexión en cascada de elementos de red..... | 69 |
| 3.5.4 | Parámetros relacionados con la arquitectura..... | 70 |
| 3.5.5 | Parámetros relacionados con la capacidad de la red..... | 70 |
| 3.6 | CONSIDERACIONES PRÁCTICAS EN UNA INSTALACIÓN DWDM | 71 |
| 3.6.1 | Previsión de la potencia óptica..... | 73 |
| 3.6.2 | Interoperabilidad..... | 74 |
| 3.7 | TOPOLOGÍAS Y PRINCIPIOS DE DISEÑO PARA REDES WDM..... | 74 |
| 3.7.1 | Topologías punto a punto..... | 74 |
| 3.7.2 | Topologías en anillo..... | 75 |
| 3.7.3 | Topología en malla..... | 76 |
| 3.7.4 | Principios de diseño de Redes Locales DWDM (DWDM LAN)..... | 76 |
| 3.7.5 | Principios de diseño de Redes ópticas conmutadas por longitud de onda (WAN DWDM)..... | 77 |
| 3.7.6 | Principios de diseño de Redes MAN DWDM..... | 80 |
| 3.7.6.1 | Tecnologías en las redes MAN DWDM..... | 81 |
| 3.7.6.2 | Aplicaciones y servicios en las redes MAN..... | |
| 3.8 | SEGURIDAD..... | 87 |
| 4. | MIGRACIÓN HACIA REDES 100% OPTICAS..... | 88 |
| 4.1 | INTRODUCCIÓN..... | 101 |
| 4.2 | INTERACCIÓN ENTRE LA CAPA ÓPTICA Y LA CAPA CLIENTE..... | 102 |
| 4.3 | RECOMENDACIONES PARA LA MIGRACIÓN DE LA RED DE DATOS DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA..... | 104 |
| 4.3.1 | Descripción de la red Actual..... | 104 |
| 4.3.2 | Análisis de algunos parámetros de diseño..... | 107 |
| 4.3.3 | PRIMERA ETAPA..... | 108 |
| 4.3.4 | SEGUNDA ETAPA..... | 110 |
| 4.3.5 | Recomendación en cuanto a equipos..... | 111 |
| 4.3.5.1 | MUX/DEMUX CWDM..... | 111 |

| | |
|--|------------|
| 4.3.5.2 GBICs..... | 112 |
| 4.3.5.3 Especificaciones Técnicas del equipo GBIC CWDM de Cisco..... | 112 |
| 4.3.5.3.1 Condiciones ambientales y requisitos de energía..... | 112 |
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 113 |
| 6. LISTA DE ABREVIATURAS..... | 115 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA..... | 119 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| Figura 1.1 Crecimiento de voz y datos a través de los años..... | 4 |
| Figura 2.1 Enlace DWDM..... | 11 |
| Figura 2.2 Uso de un convertor de longitud de onda | 19 |
| Figura 2.3 Demultiplexación mediante refracción en un prisma..... | 22 |
| Figura 2.4 Dispersión angular..... | 22 |
| Figura 2.5 Arreglo de guías de onda..... | 23 |
| Figura 2.6 Tecnología de filtrado óptico..... | 23 |
| Figura 2.7 Amplificador de fibra dopada con Erblio..... | 26 |
| Figura 2.8 Multiplexor de longitud de onda de inserción extracción..... | 34 |
| Figura 2.9 Formato de paquete OTPN..... | 38 |
| Figura 2.10 Estructura de un nodo óptico..... | 39 |
| Figura 2.11 Sincronizador..... | 40 |
| Figura 2.12 TOWCs (Convertidores ópticos sintonizables de longitud de onda) | 42 |
| Figura 2.13 Almacenamiento de paquetes..... | 43 |
| Figura 2.14 Arquitectura OBS..... | 44 |
| Figura 3.1 Red óptica con amplificadores ópticos en cascada..... | 55 |
| Figura 3.2 Enlace DWDM punto a punto..... | 56 |
| Figura 3.3 OXC..... | 59 |
| Figura 3.4 Densidad según topología..... | 66 |
| Figura 3.5 Red LAN DWDM..... | 77 |
| Figura 3.7 Red WAN DWDM..... | 78 |
| Figura 4.1 Modelo de red óptica basado en 2 capas..... | 103 |
| Figura 4.2 Migración de las Arquitecturas a nivel de capas..... | 104 |
| Figura 4.3 Estructura física de la red de datos..... | 105 |
| Figura 4.5 Configuración del actual nodo del edificio del IPET..... | 108 |
| Figura 4.6 Configuración del actual nodo del edificio del Carmen..... | 109 |
| Figura 4.7 Nueva configuración de los nodos..... | 110 |

LISTA DE TABLAS

| | Página |
|---|--------|
| Tabla 1.1 Longitudes de onda para CWDM..... | 9 |
| Tabla 1.2 Comparación de tecnologías de acceso..... | 9 |
| Tabla 2.1 Recomendación ITU para láser en sistemas DWDM..... | 20 |
| Tabla 4.1 Distancia entre edificios..... | 106 |
| Tabla 4.2 Numero de Equipos..... | 106 |
| Tabla 4.3 Clasificación de los canales cwdm según el color..... | 111 |
| Tabla 4.4 Relacion costo/fabricante de dispositivos Mux/Demux CWDM..... | 111 |
| Tabla 4.5 Datos De la Interfaz De la Corriente Eléctrica..... | 113 |
| Tabla 4.6 Parámetros Ópticos..... | 113 |
| Tabla 4.7 Relación precio/fabricante de dispositivos GBIC..... | 113 |

INTRODUCCIÓN

Las redes 100% ópticas serán el soporte de Internet de nueva generación, la cual estará basada en enrutadores IP y sistemas de conmutación y transmisión apoyados en la tecnología DWDM, creando una red de transporte óptima. DWDM no solo ofrece un camino óptico sino que soporta la capacidad de efectuar conmutación de longitud de onda.

Una de las principales ventajas de las redes 100% ópticas es la posibilidad de reducir los costos de la red debido a la disminución de conversiones electro-ópticas en los puntos de regeneración de los sistemas de transmisión.

Con este trabajo se logró dar una primera aproximación para la migración de la red de datos de la Universidad del Cauca a una red 100% óptica basada en tecnología WDM y se establecen las bases necesarias, los dispositivos que la posibilitan y la normatividad recomendada por la ITU.

Para cumplir con el objetivo propuesto se desarrollaron los siguientes capítulos:

En el capítulo 1 se presenta una visión general del estado del arte de las redes ópticas, considerando factores como la demanda de gran ancho de banda y algunas técnicas de multiplexación ópticas.

El capítulo 2 presenta un estudio de los fundamentos de la tecnología DWDM, incluyendo la descripción general de un sistema DWDM, las características básicas de los dispositivos que conforman este sistema, del medio de transmisión utilizado, del tipo de modulación óptica utilizada como también de los elementos que permitan realizar la modulación, además se presenta una breve descripción de los protocolos utilizados en la transmisión óptica.

En el capítulo 3 se analizan las consideraciones generales de diseño de un sistema DWDM, definiendo algunos criterios fundamentales en el diseño de este tipo de redes como también algunos parámetros relacionados con la topología de la red, con las limitaciones físicas y con las consideraciones prácticas en una instalación WDM necesarios que se deben tener en cuenta en el diseño de estas redes.

En el capítulo 4 se presenta el primer paso hacia un modelo de red óptica para la red de datos de la Universidad del Cauca, se hace una descripción de la red actual con que cuenta la Universidad y se presentan las opciones para realizar el proceso de migración hacia una red 100% óptica.

Como complemento a este trabajo se tienen 2 anexos, en el anexo A se presenta un estudio detallado de los diferentes dispositivos que posibilitan la tecnología óptica WDM.

El anexo B contiene todo lo relacionado con la gestión de redes ópticas y se incluye una descripción de la recomendación G.709 ITU “Interfaz para redes de transporte óptico”.

1. VISION GENERAL Y ACTUAL ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES 100% OPTICAS

1.1 LA FIBRA ÓPTICA

En la actualidad, la fibra óptica aparece como el medio de transmisión de información más eficiente para satisfacer la creciente demanda de ancho de banda, debido a sus principales características, como: baja atenuación, alta capacidad de transmisión, inmunidad a la interferencia electromagnética, aislamiento eléctrico y confiabilidad. Además, la luz es la mejor fuente para el transporte de la información en este medio.

Para la transmisión por fibra óptica, anteriormente se utilizaba la franja de los 1.310 nanómetros en longitud de onda. Actualmente, debido a que presenta un menor índice de atenuación, se utiliza la zona de los 1.550 nanómetros. El descubrimiento de nuevos procesos para la fabricación de fibra ha posibilitado la ampliación del espectro utilizable, eliminando los restos de agua que antes quedaban en la fibra y la hacían más opaca.

Este avance ha hecho que la región de los 1.400 nanómetros, que antes era considerada una zona opaca, se vuelva más cristalina y, por lo tanto, utilizable. La ampliación del espectro utilizable en la fibra, ha permitido que puedan multiplexarse varios canales en ella.

1.2 DEMANDA DE GRAN ANCHO DE BANDA

Actualmente las redes de transporte de Internet se están construyendo a un paso muy rápido. La velocidad de crecimiento del tráfico de datos es 10 veces mayor que el tráfico de voz por año. Se asume que el tráfico de voz crece a una razón de 13% anualmente, mientras que el tráfico de datos crece a razón del 7% al 20% mensualmente. En figura 1.1 se hace una comparación entre el crecimiento del tráfico de voz y el tráfico de datos a través de los años.

El crecimiento del tráfico viene acompañado por la aparición en el mercado de sistemas de transmisión que permiten multiplexar un mayor número de portadoras ópticas, en breve plazo hasta 160. Asimismo, y aunque en menor medida, va aumentando la velocidad máxima posible de modulación por portadora (de 2,5 a 10 Gigabits por segundo).

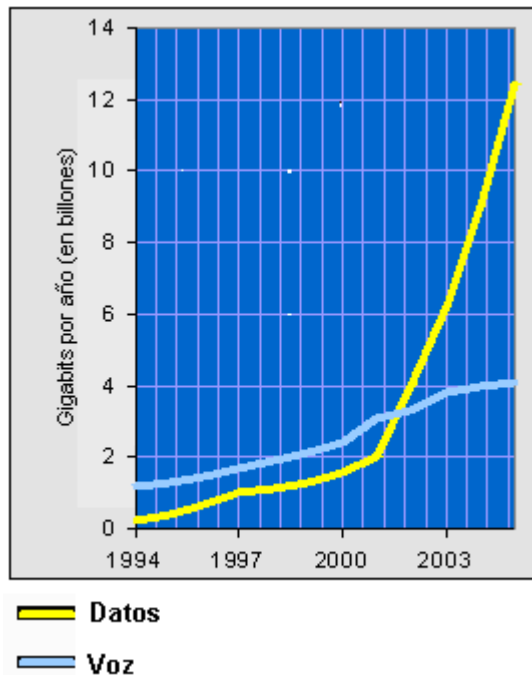


Figura 1.1 crecimiento de voz y datos a través de los años.

Estudios de Internet, indica que la demanda de ancho de banda de redes mundiales podría llegar a ser 300 veces más alta en los próximos 8 a 10 años. El auge en la demanda de ancho de banda estará impulsado por niveles crecientes de acceso de alta velocidad a Internet para el hogar y la empresa, las nuevas tecnologías y los nuevos servicios que ofrecen los proveedores.

Las actuales tecnologías utilizadas para abarcar un gran ancho de banda, apuntan a introducir cable módem, cable coaxial, XDSL. No obstante, estas tendrán gran posibilidad de quedar obsoletas en un futuro próximo, debido a la alta demanda de ancho de banda. Desde este punto de vista, cabe señalar que la fibra óptica proporciona un ancho de banda prácticamente ilimitado.

Las redes de telecomunicaciones actuales que utilizan fibra óptica, están basadas en tecnología de Jerarquía Digital Sincrónica (SONET/SDH: Synchronous Optical Network / Synchronous Digital Hierarchy) como capa estándar para la interfaz con capas superiores de protocolo. Si bien, esta configuración funciona correctamente para servicios de mediana velocidad, no es viable para la masificación de servicios de banda ancha en los usuarios

finales. Estudios realizados indican que la máxima velocidad que se puede obtener en redes SDH es de 10 Gbps, con lo que se restringen las posibilidades de escalamiento futuro en ancho de banda, en lo que a esta tecnología se refiere.

1.3 REDES 100% ÓPTICAS

Las redes 100% ópticas que emplean DWDM son las redes de transporte de próxima generación que pueden satisfacer los requerimientos de ancho de banda de los usuarios finales.

Mientras que la fibra óptica proporciona enlaces que tienen las propiedades requeridas, el ancho de banda de la red es limitado por la velocidad de procesamiento de los nodos, que se hace eléctricamente, esto significa que la señal óptica en la fibra debe ser convertida a una señal eléctrica, procesada a bajas velocidades y luego convertida en señal óptica para la transmisión a través de la fibra. Además de poner lenta la red, la conversión opto-eléctrica es costosa. Una solución a este problema es construir redes en las cuales las señales sean procesadas en el dominio óptico. Tales redes son las llamadas redes 100% ópticas (all-optical networks).

Todos los esfuerzos que actualmente se realizan a escala mundial en la investigación y desarrollo de las redes ópticas basadas en DWDM y sus tecnologías relacionadas, están orientadas hacia la construcción de una red 100% óptica.

La eliminación de la conversión opto-eléctrica reduce retardos y mejora la flexibilidad de las redes. Comercialmente hay enlaces que soportan hasta 40 Gbps y se han anunciado productos de 100Gbps. Experimentalmente se ha alcanzado mas de 1 Terabits por segundo.

El interés en las redes ópticas se debe a que la tecnología de transmisión por fibra óptica esta avanzando mas rápidamente que la tecnología de conmutación electrónica y de otro lado, la tecnología de conmutación óptica esta madurando al punto donde es económicamente viable para ciertas situaciones.

1.4 TÉCNICAS DE MULTIPLEXACIÓN

La fibra óptica puede proporcionar un gran ancho de banda, aproximadamente de 24 THz. Para compartir este ancho de banda, se han propuesto varias técnicas de multiplexación para las redes 100% ópticas. Estas técnicas incluyen la multiplexación por división de longitud de onda (WDM: Wavelength Division Multiplexing), multiplexación óptica en el dominio del tiempo (OTDM: Optical Time Division Multiplexing) y la multiplexación óptica por división de código (OCDM: Optical Code Division Multiplexing).

1.4.1 WDM: multiplexación por división de longitud de onda

En WDM, dos o más señales ópticas que tienen diferentes longitudes de onda se combinan y se transmiten simultáneamente en la misma dirección sobre una fibra óptica. WDM está en una etapa avanzada de desarrollo y las redes que emplean esta tecnología se pueden extender usando componentes y sistemas que ya se encuentran en el mercado. Existen algunas variantes de WDM: WDM de banda estrecha (NWDM: Narrow wavelength Division Multiplexing), WDM de banda ancha (WWDM: Wide wavelength Division Multiplexing), WDM denso (Dense wavelength Division Multiplexing) y WDM aproximado (CWDM: Coarse wavelength Division Multiplexing). Típicamente, NWDM se implementa utilizando dos longitudes de onda: 1533 y 1577 nanómetros. Por otra parte, WWDM se implementa combinando una longitud de onda de 1310 nanómetros con otra longitud de onda en la ventana de baja pérdida de un cable de fibra óptica entre 1528 y 1560 nanómetros en longitud de onda. Técnicamente, WDM, DWDM y CWDM son similares, sin embargo, DWDM soporta muchas más longitudes de onda y CWDM tienen canales con una mayor separación que las otras dos técnicas.

En redes metropolitanas el mercado para DWDM está creciendo en proporción de las necesidades de ancho de banda requerido por las empresas. DWDM reúne las características de ancho de banda, siendo independiente de las velocidades y protocolos usados en la red, permitiendo a los proveedores ofrecer nuevos servicios y mejorar los servicios existentes.

1.4.2 CWDM: Multiplexación por división aproximada de longitud de onda

La UIT ha establecido una norma mundial para las redes de fibra óptica metropolitanas que incrementará la utilización de la multiplexación por división aproximada de longitud de onda (CWDM) en las redes metropolitanas. Se prevé que con esta norma, indispensable para responder a la creciente demanda de los servicios de voz, datos y multimedios en materia de soluciones de transporte de corto alcance y a bajo costo, los operadores de telecomunicaciones podrán realizar economías. La multiplexación por división aproximada de longitud de onda (CWDM), es una tecnología WDM, que se caracteriza por un espaciado más amplio de canales que el de la multiplexación por división densa de longitud de onda (DWDM). Los sistemas CWDM son más rentables para las aplicaciones de redes metropolitanas.

Para distancias más cortas y una menor capacidad requerida, las aplicaciones CWDM permiten utilizar un espaciado de canales más amplio y equipos más baratos garantizando el mismo grado de calidad que los sistemas de fibras ópticas de largo alcance.

Los sistemas CWDM admiten distancias de transmisión de hasta 50 km. Entre esas distancias, la tecnología CWDM puede admitir diversas topologías: anillos con distribuidor (hubbed ring), punto a punto y redes ópticas pasivas. Además, se adapta correctamente a las aplicaciones de redes metropolitanas y a las aplicaciones relativas al acceso, como los anillos de acceso y las redes ópticas pasivas. La técnica de multiplexación CWDM consta de 18 longitudes de onda definidas en el intervalo 1 270 a 1 610 nanómetros con un espaciado de 20 nanómetros como se muestra en la tabla 1.1.

| No de canal | Longitud de onda central | No de canal | Longitud de onda central | No de canal | Longitud de onda central |
|-------------|--------------------------|-------------|--------------------------|-------------|--------------------------|
| 1 | 1270 | 7 | 1390 | 13 | 1510 |
| 2 | 1290 | 8 | 1410 | 14 | 1530 |
| 3 | 1310 | 9 | 1430 | 15 | 1550 |
| 4 | 1330 | 10 | 1450 | 16 | 1570 |
| 5 | 1350 | 11 | 1470 | 17 | 1590 |
| 6 | 1370 | 12 | 1490 | 18 | 1610 |

Tabla 1.1 Longitudes de onda para CWDM

Los sistemas ópticos con multiplexación por división densa de longitud de onda (DWDM), que transportan una gran cantidad de longitudes de onda densamente concentradas, necesitan un dispositivo termoeléctrico de refrigeración para estabilizar la emisión de longitudes de onda y absorber la energía disipada por el láser. De este modo, se aumenta el consumo de energía y al mismo tiempo el costo. En cambio, para distancias de transmisión cortas, un plan de distribución "aproximada" de longitudes de onda puede reducir el costo de los terminales suprimiendo el control de la temperatura de manera que las longitudes de onda emitidas deriven en función de las variaciones de la temperatura ambiente.

1.4.3 multiplexación óptica por división de tiempo: OTDM

La multiplexación por división de tiempo (TDM) es un esquema que combina numerosas señales para transmitir las en una sola línea o canal de comunicaciones. Cada canal de comunicación se divide en muchos segmentos de tiempo, teniendo cada uno una duración muy corta. Un multiplexor en el nodo final de un enlace de comunicaciones acepta la entrada desde un usuario final individual, divide cada señal en segmentos, y asigna los segmentos a las ranuras de tiempo en una secuencia rotativa. La flexibilidad que ofrece TDM está sobre todo en la variación del número de señales que se envían a través de la línea. Los sistemas OTDM superan la barrera de velocidad impuesta por los componentes electrónicos y optoelectrónicos por medio de la utilización de técnicas ópticas para multiplexar y demultiplexar flujos de datos de alta velocidad. En especial, se basan en las propiedades tanto lineales como no lineales de las fibras y de los dispositivos semiconductores para la construcción de modernos componentes.

1.4.4 multiplexación óptica por división de código: OCDM

En OCDM, una fuente óptica se conecta a un número de transmisores. Cada transmisor codifica y modula una señal óptica, y la señal codificada y modulada se envía por difusión a través de red. Para distinguir la transmisión individual, a cada usuario se le asigna un código único. Un receptor que tenga el código correcto puede recibir selectivamente la transmisión deseada.

2. FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA DWDM (Multiplexación densa por división de longitud de onda)

DWDM es una tecnología que proporciona conexiones entre los elementos de servicio a altas velocidades sobre las plantas de fibra óptica existentes. Una red óptica DWDM de transporte proporciona alta capacidad por fibra y por conexión. Cada longitud de onda DWDM proporciona una conexión que puede transportar cualquier protocolo con una velocidad de bit entre 50 Mbps y 2.5 Gbps o más. Estas longitudes de onda se pueden multiplexar con otras longitudes de onda y añadir, extraer o conmutar en la capa óptica, eliminando la necesidad de manipular el ancho de banda. La red DWDM proporciona:

- La separación de longitud de onda, transportando diferentes tipos de servicio (TDM, ATM, IP,...) permitiendo una diversidad de conexiones a elementos de servicio apropiados.
- La adición, sustracción de longitudes de onda multiplexadas.
- Protección de la capa óptica en caso de fallos de la red.
- La multiplexación de longitud de onda en líneas de fibra óptica como preparación para transportar tráfico agregados de 80 Gbps o más.
- El protocolo y la velocidad en una longitud de onda dada se pueden cambiar en el acto sin alterar las infraestructuras de transporte dándole a la red la capacidad de responder rápidamente a los cambios de servicio y crecimiento.

En la Tecnología DWDM se pueden multiplexar 32 o más longitudes de onda en una sola fibra. La flexibilidad de la red DWDM se deriva de la independencia de protocolo y de la velocidad. También maximiza la utilización de la planta de fibra existente, acomodando el crecimiento de los servicios nuevos y los existentes, y se hace un mejor uso del ancho de banda.

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN SISTEMA DWDM

Un sistema de transmisión DWDM basado en fibra óptica está conformado por cuatro bloques:

1. La fuente que emite la señal en el rango óptico del espectro electromagnético, es decir, una fuente que emite señales luminosas y que consiste normalmente en un diodo láser.
2. El medio físico por donde se propaga y transmite esa señal luminosa, que es el cable de fibra óptica constituido por un material de un determinado índice de refracción (el núcleo) y revestido por otro material de distinto índice de refracción (el revestimiento).
3. Un dispositivo fotodetector situado en el extremo final de la fibra que capta la señal emitida por la fuente y que ha viajado a lo largo de la fibra óptica.
4. El amplificador EDFA (Amplificador de Fibra Dopada con Erbio) .

El bloque emisor en DWDM está constituido por una serie de diodos láser que emiten señales luminosas a diferentes longitudes de onda; estos diodos son normalmente del tipo DFB (Láser de Realimentación Distribuida). Estas diferentes longitudes de onda emitidas por los láseres se multiplexan mediante un equipo multiplexor y se transfieren a la fibra óptica dando lugar a diferentes canales que se pueden contemplar como varias fibras ópticas virtuales integradas dentro de la fibra óptica real. Actualmente, el número de canales en los sistemas instalados es de 96 tras una secuencia que se inicia en 1993 con 4 canales para pasar en 1996 a 8 canales y a 16 en 1997.

El tercer bloque que conforma el sistema DWDM está constituido por el conjunto de fotodetectores que reciben la radiación luminosa que ha viajado a través de la fibra. Las diferentes longitudes de onda que aparecen al final de la fibra se distribuyen mediante un dispositivo que puede ser un acoplador pasivo en estrella. Cada receptor lleva asociado un filtro óptico sintonizable que permite eliminar las señales no deseadas (seleccionar un solo canal/ longitud de onda) y minimizar el ruido generado por el amplificador EDFA encargado de regenerar las señales que han perdido potencia a su paso por la fibra. Estos

filtros están constituidos por un etalón de Fabry-Perot que consiste en dos espejos que forman una cavidad resonante en la que se puede seleccionar la longitud de onda. Cuando se modifica la distancia entre los espejos se modifica al mismo tiempo la longitud de onda de la luz que resuena en la cavidad, lo que constituye un medio para sintonizar el filtro. Cada canal funciona con una longitud de onda específica.

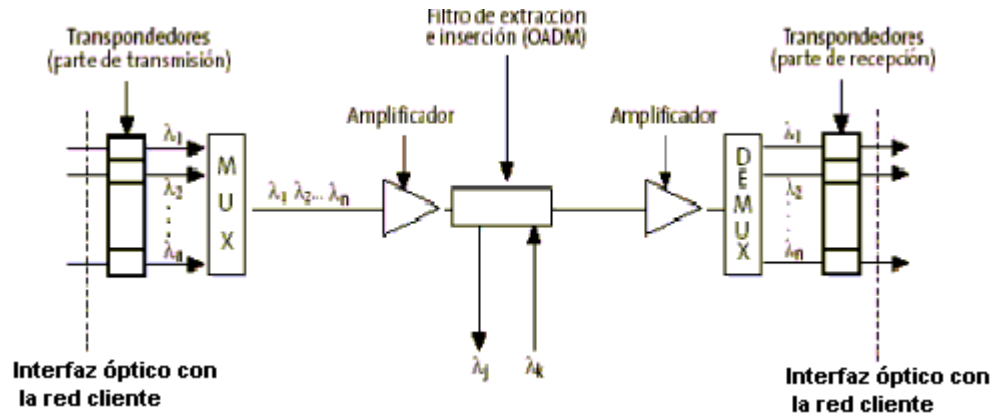


Figura 2.1 Enlace DWDM

Como se muestra en la Figura 2.1, la frontera entre la red cliente y un enlace de la red de transporte óptica está definida por un elemento denominado transpondedor. En el sentido de entrada al enlace, la interfaz proveniente de la red de transporte puede ser óptica de corto alcance, a una longitud de onda indeterminada y con una pureza espectral baja. En el transpondedor la señal de esta interfaz se fotodetecta y regenera eléctricamente, y a continuación la señal resultante se utiliza para modular un transmisor óptico que emite a una longitud de onda específica. La salida de este transpondedor se multiplexa con la de otros, en otras longitudes de onda, y el múltiplex resultante se amplifica e inyecta en la fibra del enlace. En el sentido de salida del enlace, el funcionamiento es similar. El conjunto de longitudes de onda que llegan de la fibra se demultiplexan, y cada una de ellas se lleva directamente a la interfaz de la red cliente. Opcionalmente, el transpondedor incorpora un receptor óptico que fotodetecta y regenera la señal de línea, y a continuación modula un láser de características genéricas. La salida de este láser, se lleva finalmente al elemento terminal de la red de transporte.

El transpondedor acepta la entrada en la forma de un láser estándar monomodo o multimodo. La entrada puede venir de distinto medio físico y diferentes protocolos y tipos de tráfico. La longitud de onda de cada señal de entrada es mapeada a una longitud de onda DWDM. Las longitudes de onda DWDM del transpondedor son multiplexadas en una sola señal óptica y enviada por la fibra. El sistema también puede incluir la posibilidad de aceptar señales ópticas directas al multiplexador; tales señales pueden venir, por ejemplo, de un satélite. Un post-amplificador refuerza la señal óptica a la salida del sistema, este puede ser opcional, los amplificadores ópticos se usan a lo largo del enlace óptico según necesidades. Un pre-amplificador refuerza la señal antes de que entre en un extremo del sistema (opcional), la señal de entrada es demultiplexada en longitudes de onda DWDM individuales. Cada λ individual DWDM es mapeada según el tipo de salida requerido (por ejemplo, fibra monomodo OC-48) y enviada a través del transpondedor. El sistema realiza las siguientes funciones principales:

- Generación de la señal. La fuente, un láser de estado sólido, debe suministrar luz estable dentro de un ancho de banda específico y estrecho, que transporta los datos digitales modulados como una señal analógica.
- Combinación de señales. Los modernos sistemas DWDM emplean multiplexadores para combinar las señales. Hay alguna pérdida inherente asociada a la multiplexación y demultiplexación. Esta pérdida depende del número de canales pero se puede mitigar con amplificadores ópticos que amplifican todas las λ a la vez sin conversión eléctrica.
- Transmisión de señales. Los efectos de diafonía y la degradación o pérdida de la señal óptica deben ser tenidos en consideración en la transmisión por fibra óptica. Estos efectos pueden ser minimizados mediante el control de las variables tales como el espaciado entre canales, la tolerancia de la longitud de onda, y los niveles de potencia del láser.
- Separación de las señales recibidas. En el lado del receptor, las señales multiplexadas deben ser separadas.
- Recepción de señales. La señal demultiplexada es recibida por un fotodetector.

Además de estas funciones, un sistema DWDM también debe estar equipado con interfaces en el lado cliente para recibir la señal de entrada. Esta función la realizan los transpondedores. En el lado DWDM son las interfaces a la fibra óptica que enlazan a los

sistemas DWDM. Los dispositivos utilizados en un sistema DWDM se estudian en el anexo 1. “Dispositivos DWDM”

2.2 EMISORES ÓPTICOS EN UN SISTEMA DWDM

Dependiendo de la clase de emisión utilizada se tienen dos tipos de emisores: espontánea o estimulada. En el primer caso reciben el nombre de diodos luminiscentes (LED) y en el segundo de diodos láser (LD). Los dispositivos emisores de luz usados en la transmisión óptica deben ser compactos, monocromáticos, estables y de larga duración. La estabilidad de la fuente de luz es una medida de que tan constante es su intensidad y longitud de onda. Son dispositivos lentos, útiles para velocidades inferiores a 1 Gbps, tienen un espectro relativamente grande, y transmiten la luz en un cono ancho. Características como linealidad, estabilidad del valor de la potencia emitida, tiempo de vida y precio, los hacen óptimos para velocidades de conmutación moderadas y medias y en sistemas de medio alcance. Se usan a menudo en comunicaciones con fibra multimodo.

Los diodos láser están constituidos por una unión p-n especialmente diseñada para fomentar la creación de una emisión estimulada durante el funcionamiento, la cual dará origen a la radiación láser. Los dispositivos LD presentan grandes ventajas inherentes al mecanismo de emisión estimulada, que los hacen insustituibles en los sistemas de mayor capacidad y cuando se necesitan largos tramos de repetición, son de destacar:

- Potencia óptica emitida diez veces más grande a la correspondiente a un LED. Ello se debe al efecto de amplificación de la radiación en la cámara resonante.
- Lóbulo de emisión más agudo.
- Espectro de radiación más monocromático. Mientras en un buen LED el valor de la banda espectral está en torno a 50nm. En un LD no supera 1 ó 2 nm.
- Velocidad de respuesta mayor, la emisión estimulada se desencadena casi instantáneamente (teóricamente a la velocidad de la luz) una vez aparecen los fotones inductores.
- Se pueden utilizar en aplicaciones con fibra monomodo.

Los tipos de láseres semiconductores habituales son: láseres monolíticos Fabry- Perot, y láseres con realimentación distribuida (DFB). El segundo tipo se adapta bien a las

aplicaciones DWDM, emitiendo una luz casi monocromática, que es capaz de funcionar a altas velocidades, tiene una favorable relación señal / ruido, y tiene una linealidad superior.

2.2.1 Características de los dispositivos láser en sistemas DWDM

En sistemas DWDM los dispositivos láser comúnmente utilizados son los de tipo sintonizables, debido a que en redes DWDM se requiere con frecuencia la capacidad de sintonizar diferentes longitudes de onda. Algunas características que presentan estos dispositivos son:

- Ancho de Línea del Láser. Se define como el ancho espectral de la luz generada por el láser. Afecta el espaciamiento entre canales y también el valor de la dispersión ocurrida al propagarse la luz a lo largo de la fibra.
- Estabilidad de Frecuencia. Se define como la capacidad del dispositivo láser para mantener estable la frecuencia de operación asignada por el diseñador del sistema, durante el tiempo de vida del dispositivo. En sistemas DWDM las inestabilidades de frecuencia pueden limitar la ubicación y el espaciamiento de los canales. Los tipos más comunes son: Inestabilidad por Salto de Modo, Inestabilidad por Alternación de Modo e Inestabilidad por Desviación de longitud de Onda. La inestabilidad por salto de modo ocurre principalmente en los dispositivos láser de corriente de inyección y consiste en un salto repentino en la frecuencia del láser causada por un cambio en la corriente de inyección con respecto a un umbral dado. La inestabilidad por alternación de modo consiste en cambios en la frecuencia debido a los cambios de temperatura. Finalmente, la inestabilidad por desviación de λ consiste en una variación en la frecuencia debido a las variaciones en la corriente de inyección. A fin de evitar grandes fluctuaciones de frecuencia, se deben utilizar métodos de compensación de las variaciones de temperatura o de la corriente de inyección.
- Numero de modos longitudinales. Numero de longitudes de onda que son amplificadas por el láser. En los dispositivos láser que consisten de una cavidad simple, la potencia de cada canal es amplificada, si un múltiplo entero de la longitud de onda es igual a dos veces la longitud de la cavidad, es decir, longitudes de onda para las cuales se cumple la siguiente expresión matemática:

$$N \lambda = 2L$$

Donde n es un entero positivo, λ es la longitud de onda del canal y L es la longitud de la cavidad. Los modos longitudinales no deseados producidos por un láser pueden generar valores significativos de Dispersión Cromática y de Dispersión de Modo de polarización. Por esta razón, es conveniente implementar dispositivos láser que produzcan un modo longitudinal simple.

- Rango de sintonización. Se refiere al rango de longitudes de onda sobre las cuales el láser puede ser operado, y está limitado por el espectro de ganancia del dispositivo y el rango de λ s que pueden procesar los demás componentes ópticos del sistema.
- Tiempo de sintonización. Es el tiempo requerido por el láser para sintonizar una λ a partir de una longitud de onda inicial de operación.
- Continuidad de la sintonización. Se presenta cuando el láser puede sintonizar cualquier longitud de onda dentro del rango de sintonización. Si solo puede sintonizar longitudes de onda preseleccionadas, se denomina láser discretamente sintonizable.

2.2.2 Tipos de dispositivos láser sintonizables

2.2.2.1 Dispositivo láser de Realimentación Distribuida (DFB, Distributed feedback)

Conocido también como dispositivo láser sintonizado con corriente de inyección, conforma una familia de transmisores que permiten seleccionar la longitud de onda deseada por medio de una rejilla de difracción. El DFB emplea una rejilla de difracción ubicada en el medio de emisión estimulada. Los láseres DFB enfriados son útiles en longitudes de ondas seleccionadas y precisas. El borrador estándar G.692 de ITU define una tabla para láser en sistemas WDM punto a punto basados en un espaciado de 100 GHz por longitud de onda con una longitud de onda central de 1553,52 nm.

| FRECUENCIA (THz) | LONGITUD DE ONDA (nm) | FRECUENCIA (THz) | LONGITUD DE ONDA (nm) | FRECUENCIA (THz) | LONGITUD DE ONDA (nm) |
|---------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|
| 196.1 | 1528.77 | 194.6 | 1540.56 | 193.1 | 1552.52 |
| 196.0 | 1529.55 | 194.5 | 1541.35 | 193.0 | 1553.33 |
| 195.9 | 1530.33 | 194.4 | 1542.14 | 192.9 | 1554.13 |
| 195.8 | 1531.12 | 194.3 | 1542.94 | 192.8 | 1554.94 |
| 195.7 | 1531.9 | 194.2 | 1543.73 | 192.7 | 1555.75 |
| 195.6 | 1532.68 | 194.1 | 1544.53 | 192.6 | 1556.56 |
| 195.5 | 1533.47 | 194.0 | 1545.32 | 192.5 | 1557.36 |
| 195.4 | 1534.25 | 193.9 | 1546.12 | 192.4 | 1558.17 |
| 195.3 | 1535.04 | 193.8 | 1546.92 | 192.3 | 1558.98 |
| 195.2 | 1535.82 | 193.7 | 1547.72 | 192.2 | 1559.79 |
| 195.1 | 1536.61 | 193.6 | 1548.51 | 192.1 | 1560.61 |
| 195.0 | 1537.40 | 193.5 | 1549.32 | 192.0 | 1561.42 |
| 194.9 | 1538.19 | 193.4 | 1550.12 | 191.9 | 1562.23 |
| 194.8 | 1538.98 | 193.3 | 1550.92 | 191.8 | 1563.05 |
| 194.7 | 1539.77 | 193.2 | 1551.72 | 191.7 | 1563.86 |

Tabla 2.1 Recomendaciones ITU para láser en sistemas DWDM. Conversión: $c = n \cdot \lambda$ (c: velocidad luz en vacío, n: frecuencia, λ : long. onda

Sin embargo los fabricantes se pueden desviar de la tabla ampliando sus límites superior e inferior o espaciando menos las longitudes de onda, siendo el valor típico 50 Ghz, para doblar el número de canales. Cuanto menor sea el espaciado, mayor será la diafonía. Además el impacto de algunas no linealidades de la fibra, tales como la mezcla de cuatro ondas FWM, las incrementa. El espaciado de 50 Ghz también limita la máxima velocidad de datos por longitud de onda a 10 Gbps. Los láseres DFB tienen frecuencias centradas en la región de los 1310 nm y de 1520 a 1565 nm. En los láseres sintonizables de espectro estrecho su rango de sintonización está limitado de 100-200 Ghz aproximadamente.

2.2.2.2 Dispositivo láser sintonizable mecánicamente Fabry- Perot

Este dispositivo usa una cavidad Fabry-Perot, conformada por dos espejos de reflexión ubicados a una distancia variable. Esta cavidad externa es adyacente al medio de emisión

estimulada del láser, con el fin de filtrar longitudes de onda específicas. La sintonización se lleva a cabo al ajustar físicamente la distancia entre los dos espejos en cualquier extremo de la cavidad, de tal forma que solo la longitud de onda deseada interfiera constructivamente con sus múltiples reflexiones.

2.3 MODULACION OPTICA

Los emisores de luz, son dispositivos en el lado transmisor que convierten las señales eléctricas a pulsos de luz. El proceso de esta conversión, o modulación, se puede llevar a cabo mediante modulación externa de una onda continua de luz o usando un dispositivo que puede generar luz modulada directamente. Los detectores de luz son dispositivos opto-eléctricos en el lado receptor que convierten los pulsos de luz en señales eléctricas.

2.3.1 Ejemplo de moduladores

Interferómetro de Mach-Zehnder (MZI). Es un dispositivo óptico integrado, se construye a partir de dos guías de onda que conforman los brazos del interferómetro los cuales presentan una diferencia de fase entre si. El modulador MZI es un modulador de intensidad conformado por dos acopladores de 3 dB, llamados brazos del MZI, conectados por medio de dos guías de onda de igual longitud. En cada brazo del MZI se aplica externamente un voltaje de conmutación que puede ser usado para forzar una variación del índice de refracción de las dos guías. Si este voltaje es seleccionado apropiadamente, las constantes de propagación de las diferentes ramas generan interferencia constructiva o destructiva en el acoplador de 3 dB en la salida del dispositivo, Debido a que las señales en cualquiera de los brazos del MZI se encuentran en fase o en contrafase, lo que permite controlar el paso de la luz proveniente del láser a través del modulador. Así, la intensidad de salida puede variar entre 0 y la potencia de entrada,(disminuida por las perdidas de inserción) obteniéndose un dispositivo que puede configurarse como modulador de amplitud óptica. Debido a que MZI es un componente óptico integrado, el dispositivo láser de transmisión y el modulador pueden ser ensamblados en una estructura única, lo cual puede representar un beneficio económico.

2.3.2 Multiplexación

2.3.2.1 Adaptación de Longitud de Onda

Antes de multiplexar los canales de información en la fibra óptica, se debe realizar el proceso de adaptación de las señales entrantes a las longitudes de onda de operación estandarizadas por la UIT-T. Un bloque importante en un sistema DWDM es la unidad de acoplamiento de los diferentes canales entrantes; Para tal fin se usa un conjunto de acopladores de fibra con la cantidad apropiada de puertos de entrada. Estos acopladores se denominan Adaptadores de λ de transmisión (TWA), los cuales retransmiten las señales ópticas procedentes de los terminales de entrada que corresponden a canales simples de información, por medio de interfaces que emiten señales ópticas en la región de 1200 a 1600 nm. Esto se lleva a cabo mediante la conversión óptica en el interior de dichas unidades de adaptación. El objetivo principal es realizar la conversión de la longitud de onda desconocida de la señal entrante, a una longitud de onda fija dentro de las ventanas ópticas de transmisión que cumple con el plan de λ según la normalización de la UIT-T Recomendación G.692. En esta recomendación se ha estandarizado la asignación de la longitud de onda en la ventana de 1550 nm. Para realizar la adaptación el TWA recibe el tráfico de la señal entrante por medio de un láser que opera en forma estable en una longitud de onda preseleccionada. Se requiere un TWA para cada señal óptica a multiplexar, cada señal óptica de entrada cuya longitud de onda ha sido adaptada por medio del TWA, conforma un canal DWDM.

2.3.2.2. Conversión de Longitud de onda.

La conversión de longitud de onda es una función importante en redes ópticas DWDM. Una red que emplea conversores de longitud de onda resulta más fácil de gestionar puesto que la asignación de longitudes de onda puede determinarse de forma local. Por otro lado, el bloqueo de longitud de onda en los nodos ópticos puede reducirse cuando se conmuta en el dominio de la frecuencia. Por ello la red resulta más flexible y fácil de configurar. En general, los recursos de la red se utilizan de forma más eficiente bajo patrones de tráfico dinámicos. Un conversor de longitud de onda es un dispositivo capaz de cambiar los datos

de un puerto de entrada a una longitud de onda en un puerto de salida en otra longitud de onda. los conversores son muy útiles ya que reducen la probabilidad de bloqueo de la red. Si los conversores de longitud de onda son incluidos en el conector en las redes DWDM, las conexiones, pueden establecerse entre la fuente y el destino cuando la misma longitud de onda no esta disponible en todos los eslabones en el camino.

Dependiendo de la estructura de la red, se imponen diferentes requisitos a los conversores de longitud de onda, entre los cuales se encuentran:

- Transparencia de tasa de bit, formatos y protocolos de señal.
- Rápido tiempo de establecimiento de la longitud de onda del sistema.
- Conversión a longitudes de onda cortas y largas.
- Moderados niveles de potencia de entrada y bajas pérdidas de inserción.
- Insensibilidad a la polarización de la señal de entrada.
- Longitud de onda de salida sintonizable
- Bajo consumo de potencia
- Gran ancho de banda óptico
- Implementación simple.

En la Figura 2.3 se establecen caminos entre los nodos 1 y 2 con longitud de onda λ_1 y entre los nodos 2 y 3 con longitud de onda λ_2 . Si una demanda llega al Nodo 1 con destinado al Nodo 3, la demanda no se puede aceptar debido al constreñimiento de la continuidad de la λ . Si existe un conversor de longitud de onda en el Nodo 2 este puede convertir la longitud de onda λ_2 a λ_1 . Los conversores de longitud de onda pueden ayudar a mejorar la actuación cuando las longitudes de onda libres están disponibles en los eslabones, y una λ común no está disponible.

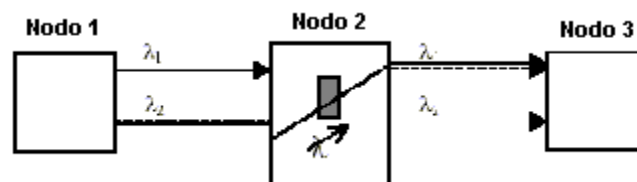


Figura 2.3 Uso de un conversor de longitud de onda.

Los conversores de longitud de onda se pueden dividir en dos tipos basados en la cantidad de conversión posible: conversor de longitud de onda completa, el cual puede convertir una longitud de onda de entrada en cualquiera de las longitudes de onda salientes y un conversor de longitud de onda limitado que sólo puede convertir una longitud de onda de entrada en un subconjunto de las longitudes de onda de salida. Una red que tiene conversores de longitud de onda completa tiende a minimizar la probabilidad del bloqueo de la red, este tipo de conversor tiene alto costo y también limitaciones tecnológicas, en una red en que los nodos están provistos con longitud de onda completa o limitada la capacidad de conversión es más práctica. Para la conversión de la longitud de onda se aplican técnicas que pueden ser clasificadas en dos tipos:

- La conversión de la longitud de onda Opto-eléctrica: En este método, la señal óptica se convierte primero en el dominio eléctrica que usa un foto detector y esta cadena de bit eléctricos se almacenan. La señal eléctrica se utiliza en la entrada de un láser sintonizado en la longitud de onda de salida deseada. Este método no es conveniente para velocidades altas, mayores a 10 Gbps. Uno de los inconvenientes de este método es el consumo de más potencia y un procedimiento complejo, además, el proceso de conversión opto-eléctrica afecta la transparencia de la señal incidente por lo que toda la información contenida en la fase, frecuencia y amplitud analógica se pierde durante el proceso de conversión. El mayor grado de transparencia alcanzado con este conversor es la transparencia digital, en la que las señales digitales de cualquier velocidad de bit, hasta cierto limite, se pueden convertir.
- La conversión de longitud de onda totalmente óptica: En este método, la señal óptica es procesada en el dominio óptico. Los métodos totalmente ópticos pueden ser extensos y se clasifican en las categorías siguientes:
 - a) Conversor de Longitud de onda de efectos coherentes: Este método se basa en los efectos de la mezcla de ondas, que surge desde una respuesta óptica no lineal de un medio cuando más de una onda esta presente en la fibra. Produce la generación de otra onda cuya intensidad es proporcional al producto de las intensidades de la ondas entrelazadas. La mezcla de ondas conserva la fase y la amplitud de la señal ofreciendo una estricta transparencia. También es el único acercamiento que permite conversión

simultánea de múltiples longitudes de onda de entrada a múltiples longitudes de onda de salida y puede potencialmente proporcionar velocidades que exceden 100 Gbps. Las técnicas que se usan en esta categoría son:

- Mezcla de Cuatro Ondas (FWM): Es un método de tercer orden no lineal. Se basa en el uso de fibras de silicio, que genera tres ondas ópticas de frecuencias f_a , f_b y f_c ($a \neq b, c$) para actuar recíprocamente en un sistema multicanal para generar una cuarta onda de frecuencia dada por $f_{abc} = f_a + f_b - f_c$. Esta técnica proporciona independencia del formato de modulación y altas capacidades de velocidad de bit. Su eficiencia en la conversión de la energía de bombeo a energía de señal no es muy alta y decrece velozmente ante aumentos en el intervalo de conversión, el cual se define como la diferencia entre las longitudes de onda de la señal de bombeo y de la señal de entrada. La conversión basada en FWM es el único principio mencionado que provee completa transparencia y se puede convertir la longitud de onda de varias señales en forma simultánea.
 - Generación de Frecuencia de Diferencia (DFG): DFG es un método de segundo orden no lineal. Se basa en la interacción de un medio con dos ondas ópticas: la onda de bombeo y la onda de señal. Esta técnica ofrece un rango completo de transparencia sin agregar ruido a la señal y provee capacidades de inversión del espectro, pero la eficacia es baja. La principal dificultad al implementar esta técnica radica en lograr una correspondencia adecuada de las fases de las ondas que interactúan y en la fabricación de una guía de onda de bajas pérdidas que provea alta eficiencia de conversión.
- b) Conversión de Longitud de onda con modulación cruzada: Esta técnica utiliza dispositivo semiconductores como los amplificadores ópticos y láseres. Esta técnica conocida como Conversión de longitud de onda de Compuerta Óptica, emplea dispositivos ópticos semiconductores activos tales como los amplificadores ópticos semiconductores y dispositivos de láser semiconductor que operan en los modos de modulación de ganancia cruzada (XGM) y Modulación de Fase Cruzada (XPM). El principio de usar un amplificador óptico con modulación de ganancia cruzada (XGM) se resume así: La señal de entrada modulada en intensidad modula la ganancia del amplificador debido a la saturación de ganancia. Una onda continua (CW) que opera en

la longitud de onda de salida deseada (λ_c) se modula por la variación de ganancia para que lleve la misma información que la señal de entrada original. La señal de entrada y la señal CW pueden introducirse en un contador direccional en el amplificador.

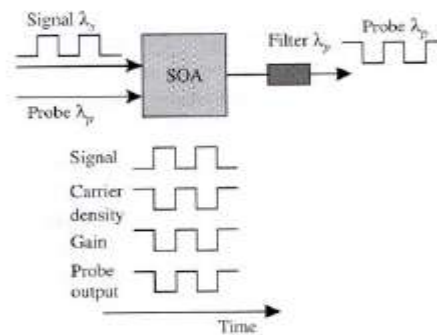


Figura 2.4 Modulación de ganancia cruzada

El esquema de la modulación de ganancia cruzada, XGM produce una señal convertida en longitud de onda comparada con la señal de entrada. Con XGM se logra la conversión de señales a 10 Gbps, pero se tiene la inversión de flujo de bits convertidos y la degradación de la señal de entrada al convertidor de subida en una señal de igual o mas longitud de onda.

- Semiconductor láseres: Usando láseres semiconductores de modo simple, la intensidad del medio es modulada por la señal de luz de entrada a través de la ganancia de saturación. La señal de salida obtenida es invertida comparada con la señal de entrada. Este mecanismo de supresión de ganancia se emplea en un láser reflector Bragg distribuido (DBR) para convertir señales a 10Gbps.

2.3.3 Multiplexores por división de longitud de onda densa

2.3.3.1 Técnicas de multiplexación óptica en sistemas DWDM

- Multiplexación y demultiplexación utilizando un prisma. En la figura siguiente se muestra un caso de demultiplexación. Un rayo paralelo de luz policromática incide en la superficie de un prisma; cada componente de longitud de onda es refractado de forma distinta conocido como el efecto arco iris. En la luz de salida, cada longitud de onda se distingue del siguiente mediante un ángulo. Una lente

enfoca cada longitud de onda a un punto donde entra en una fibra. Los mismos componentes se pueden usar de forma inversa para multiplexar diferentes longitudes de onda en una fibra.

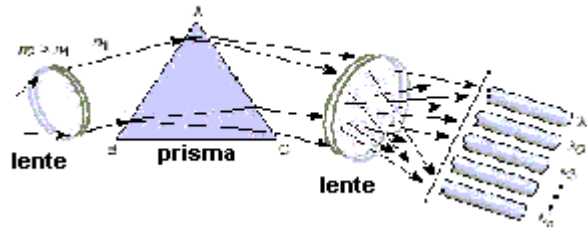


Figura 2.5 Demultiplexación mediante refracción en un prisma

- Tecnología de Dispersión Angular. está basada en los principios de la difracción e interferencia óptica, cuando una fuente de luz policromática incide en una rejilla de difracción, cada longitud de onda es difractada con un ángulo diferente y por tanto a un punto distinto del espacio. Usando una lente, estas longitudes de onda se pueden enfocar en fibras individuales.

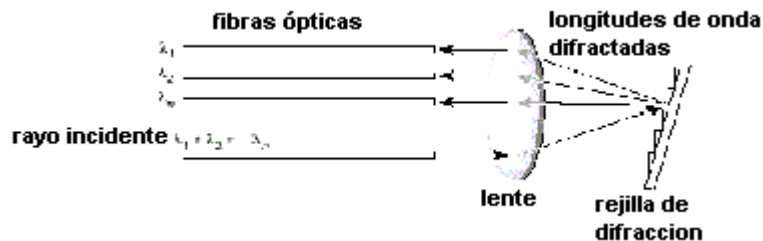


Figura 2.6 Dispersión angular

- Las AWGs (matriz de rejillas de guía de onda) también se basan en los principios de la difracción. Un dispositivo AWG, a veces llamado enrutador óptico de guía de onda o enrutador rejilla de guía de onda, consiste en una matriz de guías de onda curvadas con una diferencia fija en la longitud del camino entre canales adyacentes. Las guías de onda están conectadas a cavidades en la entrada y la salida. Cuando la luz llega a la cavidad de entrada, es difractada y entra en la matriz de guías de onda. Allí la diferente longitud

óptica de cada guía de onda introduce un desfase en la cavidad de salida, donde un conjunto de fibras está acoplado. El proceso consigue que diferentes longitudes de onda tengan la máxima interferencia en diferentes ubicaciones, que corresponden a los puertos de salida. Una AWG construida simétricamente con tantas guías de entrada como de salida, es capaz de procesar simultáneamente N^2 canales ópticos en N longitudes de onda diferentes.

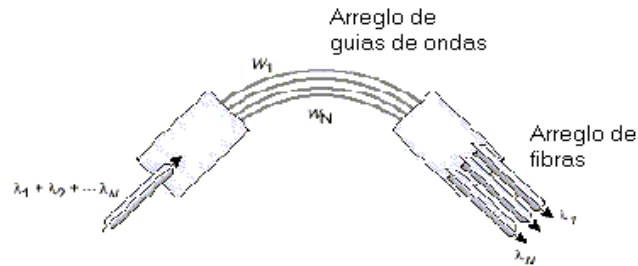


Figura 2.7 Arreglo de Guías de ondas

- Tecnología de filtrado óptico. Usa dispositivos con filtros de interferencia, llamados filtros de película delgada o filtros de interferencia multicapa. Mediante el empleo de varios filtros de película delgada en el camino óptico se pueden demultiplexar las longitudes de onda. La propiedad de cada filtro es tal que transmite una longitud de onda mientras refleja las demás. Colocando en cascada varios filtros, se pueden demultiplexar muchas longitudes de onda. De estos diseños, el AWG y los filtros de interferencia de película delgada tienen una ganancia mayor. Los filtros ofrecen buena estabilidad y aislamiento entre canales a un precio moderado pero con una alta pérdida de inserción. Los AWGs dependen de la polarización (que se puede compensar), y exhiben una respuesta espectral plana y de baja pérdida de inserción. Un inconveniente potencial es que son sensibles a las temperaturas de forma que no se pueden emplear en todos los ambientes. Su gran ventaja es que se pueden diseñar para realizar operaciones de multiplexación y demultiplexación simultáneamente.

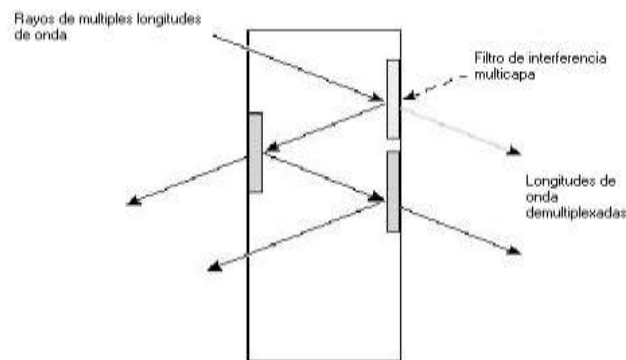


Figura 2.8 Tecnología de filtrado óptico

2.4 AMPLIFICACION OPTICA EN SISTEMAS DWDM

Existen 3 tipos de amplificación óptica: 1R, 2R y 3R. La amplificación 1R (Regeneración), consiste en la estimulación del nivel de la señal óptica de entrada. Provee transparencia total de datos, ya que es independiente del formato de modulación de la señal y de la temporización. En la amplificación 2R (Regeneración y Recuperación de la forma de la señal), las señales ópticas son amplificadas mediante una conversión inicial del flujo de información a una señal de datos eléctrica, realizando luego la retransmisión óptica de la señal, cuya forma ha sido recuperada. El proceso de recuperación de la forma de la señal reproduce la forma original del pulso de cada bit. La recuperación de la forma se aplica principalmente a señales moduladas digitalmente.

En la amplificación 3R (Regeneración, Recuperación de la forma de la señal y resincronización), la resincronización de la señal, sincroniza la señal a su modelo inicial de tiempo y de velocidad de bit. La resincronización se aplica únicamente a señales moduladas digitalmente. En los sistemas DWDM las técnicas 3R y 2R proveen menos transparencia que la técnica 1R, ya que cada longitud de onda necesita ser separada antes de ser amplificada electrónicamente y luego recombinada antes de ser retransmitida. Por esta razón la transparencia óptica esta limitada a los sistemas con amplificación 1R. Sin embargo, una desventaja de este tipo de amplificación consiste en que las señales ópticas son amplificadas sin recuperar su forma original. Debido a la atenuación, hay límites en cuanto a la longitud de un segmento de fibra, si se sobrepasan es necesaria una regeneración de la señal. Antes de la presencia de los amplificadores ópticos (OA), existía

un repetidor por cada señal transmitida. El OA ha hecho posible el hecho de poder amplificar todas las longitudes de onda a la vez y sin conversión OEO (Óptica-Eléctrica-Óptica). Los amplificadores ópticos se puede usar para aumentar la potencia de la señal después de la multiplexación o antes de la demultiplexación, dado que ambos procesos introducen pérdidas en el sistema.

2.4.1 Parámetros básicos de los amplificadores ópticos

- **Ganancia.** Mide la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada de la señal óptica. Los amplificadores están caracterizados por la eficiencia de ganancia como una función de la potencia de entrada en dB/mW.
- **Ancho de banda de la ganancia.** Se refiere al rango de frecuencias o longitudes de onda sobre las cuales el amplificador es efectivo. En una red DWDM, la ganancia de ancho de banda define el número de longitudes de onda disponibles para un espaciamiento de canales dado.
- **Punto de ganancia de saturación.** Se refiere al valor de la potencia de salida a partir del cual esta no se incrementa con un aumento en la potencia de entrada. Cuando se incrementa la potencia de entrada más allá de cierto valor, los electrones en el amplificador no pueden emitir energía lumínica adicional alguna.
- **Sensibilidad de polarización.** Se refiere al efecto de la polarización de la señal en la ganancia del OA. La sensibilidad es medida en Decibeles y se refiere a la diferencia de ganancia entre las polarizaciones en modo Transversal Eléctrico (TE) y Transversal Magnético (TM).
- **Ruido de Amplificador.** En amplificadores ópticos, la fuente dominante de ruido es la emisión Espontánea Amplificada (ASE), la cual surge de la emisión espontánea de fotones en la región activa del OA. La cantidad de ruido generada depende de factores tales como el espectro de ganancia del OA, el ancho de banda de ruido y la población de parámetros de inversión, los cuales especifican el grado de población que ha sido logrado entre los dos niveles de energía.

2.4.2 Amplificador de fibra dopado con erbio (EDFA)

El EDFA es una tecnología clave para hacer posible el transporte de gran cantidad de información que soporta DWDM a largas distancias. El erbio es un raro elemento que cuando se excita, emite luz alrededor de $1,54 \mu\text{m}$ – la longitud de onda de menor pérdida para las fibras ópticas usadas en DWDM. Opera en el rango de 1530nm a 1560nm.

En la figura siguiente se ve un diagrama simplificado de un EDFA. Una señal débil entra en una fibra dopada con erbio, en que la luz a 980 nm o 1480 nm es inyectada mediante una bomba láser. De esta manera la luz inyectada estimula los átomos de erbio que liberan su energía almacenada como luz adicional de 1550 nm. Como este proceso continua por la fibra, la señal se refuerza. Las emisiones espontáneas en el EDFA también añaden ruido a la señal como se ve en la figura.



Figura 2.9 Amplificador de Fibra Dopada con Erblio

Los parámetros claves de los amplificadores ópticos son la ganancia, la igualdad de ganancia, el nivel de ruido y la potencia de salida. Típicamente los EDFAs tiene ganancias de hasta 30 dB o más y potencias de salida de +17 dB o más. Sin embargo los parámetros clave cuando se selecciona un EDFA son el bajo ruido y la igualdad de la ganancia. La ganancia es plana porque todas las señales deben ser amplificadas uniformemente. Mientras la ganancia de señal suministrada por la tecnología EDFA depende inherentemente de la longitud de onda, se puede corregir con filtros de ganancia plana. El bajo ruido es un requerimiento porque el ruido es amplificado con la señal. Dado que su efecto es acumulativo, y no se puede filtrar, la relación señal /ruido es un factor limitativo en el número de amplificadores que se pueden concatenar y, por tanto, la longitud del enlace de una sola fibra. En la práctica las señales pueden viajar hasta 120 Km. entre amplificadores.

A distancias superiores de 600 a 1000 Km. la señal se debe regenerar. Esto es porque el amplificador óptico solo amplifica las señales y no realiza las funciones 3R. Los EDFA's se pueden emplear en las bandas C a 1550 nm y en la banda L a 1625 nm.

Dependiendo de su ubicación en el sistema DWDM, los EDFA's se clasifican como Amplificadores de potencia, Amplificadores en Línea y Pre-amplificadores, cada uno de ellos desempeña la siguiente función:

Amplificador en Línea: Periódicamente amplifica las señales ópticas atenuadas por la transmisión en la fibra

Amplificador de potencia: Estimula la potencia óptica durante la transmisión en la fibra.

Pre-amplificador: Estimula la potencia de la señal en el receptor.

Algunas ventajas asociadas al uso del amplificador EDFA son:

- No necesita circuitos electrónicos de alta velocidad y permite realizar amplificación 1R, produce alta ganancia, alta potencia y baja figura de ruido.
- Todas las señales óptica pueden ser amplificadas simultáneamente en una fibra simple.
- Permite duplicar la cantidad de canales amplificados mediante la utilización de la banda C y la banda L alrededor de la ventana óptica de 1550 nm.
- Permite conmutación óptica de paquetes de información porque su tiempo de amplificación espontánea es mucho mayor que las velocidades de bit de los formatos correspondientes a los servicios multiplexados en la fibra.

Como desventajas se pueden considerar las siguientes:

- En redes ópticas conformadas por varios EDFA's ubicados en cascada, se presentan transientes rápidos de potencia, los cuales desmejoran el desempeño de los canales de propagación en el caso de una falla de canal o reconfiguración de la red, debido a los efectos de saturación cruzada en el EDFA que se presentan al variar la potencia de los canales sobrevivientes o añadidos en el sistema.
- Presenta espectro de ganancia no uniforme, debido al fenómeno de la Emisión Espontánea Amplificada que puede producir saturación de ganancia en la etapa de

amplificación. Aunque un EDFA provee ganancia en un rango dado de longitudes de onda, no necesariamente las amplificara a todas en forma igual.

- Amplifica el ruido junto con la señal y su región activa puede emitir fotones espontáneos lo cual también origina ruido. Así, la señal óptica compuesta de múltiples longitudes de onda que pasan a través de una serie de amplificadores eventualmente resultará en canales con niveles de potencia desiguales.

2.5 TRANSMISION DE LAS SEÑALES OPTICAS

El medio físico por donde se propaga y transmite la señal luminosa es la fibra óptica, el principal trabajo de las fibras ópticas es guiar la luz con atenuación mínima. Las fibras ópticas están compuestas de finos hilos de cristal en capas llamadas núcleo y revestimiento, que pueden transmitir luz a $2/3$ de la velocidad de la luz en el vacío. La transmisión de luz en fibra óptica se explica con el principio de la reflexión interna total. Con este fenómeno, el 100% de la luz que llega una superficie es reflejada, un espejo refleja el 90% de la luz que le llega. La luz o es reflejada (rebota) o es refractada (el ángulo de salida es distinto del de entrada según el medio de que se trate) dependiendo del ángulo de incidencia. La diferencia entre los índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento es la causa de que la transmisión de la luz no atravesase el revestimiento y permanezca dentro del núcleo.

2.5.1 Características generales de las fibras ópticas

- **Apertura Numérica.** Es un parámetro que define la facultad de captación de energía por parte de la fibra. Para las fibras comerciales se utiliza un factor entre 0.15 y 0.3.
- **Atenuación.** La atenuación en las fibras ópticas es causa de los factores intrínsecos, primariamente dispersión y absorción, y de factores extrínsecos, incluyendo defectos del proceso de fabricación, el entorno y la torcedura física.
- **Dispersión Modal.** La dispersión es el esparcimiento de pulsos de luz mientras viajan a través de la fibra. El resultado de la dispersión es una distorsión de la señal que limita el ancho de banda de la fibra.
- **Dispersión Cromática.** Es el efecto derivado de la diferente velocidad de cada componente de distinta longitud de onda de una radiación cuando se propaga a través

de un medio. El resultado es como si cada longitud de onda viese un índice de refracción diferente y consecuentemente su velocidad dependerá del valor de este parámetro.

- **Dispersión en modo no polarizado.** La mayoría de las fibras monomodo soportan dos modos de polarización perpendiculares, uno vertical y otro horizontal. Debido a que los estados de polarización no se mantienen, hay una interacción entre los pulsos y como consecuencia un ensanche de la señal. La dispersión en modo polarización (PMD) es causada por la ovalidad de la forma de la fibra como resultado del proceso de fabricación o de tensiones externas. Debido a que las tensiones pueden variar con el tiempo, la PMD, a diferencia de la dispersión cromática, puede variar con el tiempo.
- **Otros efectos no lineales.** Debido a que los efectos no lineales tienden a manifestarse cuando la potencia óptica es muy alta, llegan a ser importantes en DWDM. Los efectos lineales tales como la atenuación y la dispersión pueden ser compensados, pero los efectos no lineales son acumulativos. Son mecanismos fundamentales que limitan la cantidad de datos que pueden ser transmitidos por la fibra óptica. Los tipos más importantes de efectos no lineales están estimulados por la dispersión Brillouin, la dispersión Raman estimulada, la modulación de autofase, y el efecto FWM. Siendo este último el más crítico En DWDM.

Para tratar de neutralizar los efectos causados en la señal debidos a la dispersión cromática y al dispersión no lineal se utiliza un impulso muy breve llamado Soliton, que conjuga idealmente estos tipos de dispersión neutralizándolas. El solitón es una señal cuya intensidad y longitud de onda media se han calculado de forma que los efectos de dispersión se compensan. La utilización de solitones implica algunos desarrollos técnicos, relativos por ejemplo a los dispositivos de emisión y al filtrado necesario para controlar exactamente la frecuencia central del solitón, muy sensible al ruido introducido por los amplificadores. En los sistemas multiplexados en longitud de onda, una ventaja decisiva de los solitones sobre el NVC sigue siendo la velocidad básica: con una sola longitud de onda es mucho más elevado ya que alcanza 10 Gbit/s e incluso 40 Gbit/s. Estos valores son directamente compatibles con las velocidades estándar de las transmisiones terrestres. Para gran capacidad de transmisión y bajas pérdidas, la fibra monomodo se prefiere en

aplicaciones de larga distancia y mayor ancho de banda incluido DWDM. Existen 3 tipos de fibra monomodo que se especifican a continuación con sus respectivas especificaciones ITU-T.

2.5.2 NDSF (Non-Dispersion-Shifted Fiber), G 652. Las fibras NDSF, comúnmente llamada fibra monomodo estándar, se diseñó para usarla en la segunda ventana, cerca de los 1310 nm. Para optimizar el rendimiento de la fibra óptica en esta ventana, la fibra fue diseñada de forma que la dispersión cromática fuera cercana a cero para una longitud de onda de 1310 nm. Esta fibra óptica es considerada fibra óptica convencional, presenta una dispersión en torno a los 18 ps/nm. Km. El fundamento físico de la dispersión consiste en la dependencia de la potencia óptica de la señal luminosa con el índice de refracción del material por donde se propaga la luz . El tipo de dispersión que aparece mayoritariamente en esta fibra es la dispersión cromática. La fibra G . 652 se adapta bien al entorno DWDM, en el sentido de que no aparecen problemas mayores para alojar simultáneamente diferentes longitudes de onda debido a que no aparece el efecto FWM (Mezcla de cuatro ondas) que constituye el efecto no lineal que determina de forma directa la viabilidad de DWDM . Esta fibra por estar diseñada para sistemas OC-48 (de 2,5 Gbps) no se adaptan bien a los requerimientos de 10 Gbps asociados a OC-192, que constituyen el futuro más prometedor debido a la cada vez mayor demanda de ancho de banda por parte del mercado. La fibra G. 652 se ve perjudicada por efectos no lineales como la modulación de fase cruzada (XPM) y Automodulación de fase (SPM) que generan un nivel de distorsión apreciable.

2.5.3 DSF (Dispersion-Shifted Fiber), G 653. Esta segunda generación de fibra óptica, constituye un avance y mejora de las técnicas de compensación de la dispersión . A estas fibras, se les conoce mediante las siglas DSF, debido a que su diseño se basa en un desplazamiento de la longitud de onda de dispersión cero. La dispersión en una fibra óptica toma el valor cero en una longitud de onda determinada, que en el caso de la fibra G.652 es de 1.3 micrómetros. La dispersión toma valores negativos para longitudes de onda menores que la correspondiente a ese punto de dispersión cero. Si esa longitud de onda para la cual se tiene dispersión cero se desplaza desde 1,3 a 1,55 micrómetros, lo cual se puede conseguir modificando el perfil del índice de refracción de la fibra, para hacerla coincidir

con la atenuación mínima de la fibra y con la mayor ganancia del amplificador, es decir, cuando la región de dispersión cero se desplaza al margen del ancho de banda del EDFA, se tiene la fibra DSF. El nivel de dispersión que aparece es bajo, menor que $3 \text{ ps/nm} \cdot \text{Km}$. La fibra G. 653 se adapta bien a entornos de velocidades de hasta 10 Gbps, pero resulta poco eficaz en el entorno DWDM debido a la importancia que presenta en este tipo de fibras el efecto FWM, lo cual significa una importante limitación para la transmisión multicanal o de múltiples longitudes de onda en fibras DSF debido a que se generan importantes interferencias entre canales, un efecto conocido normalmente como crosstalk. Para que se produzca FWM las fases de las dos ondas iniciales no pueden cambiar una con respecto a la otra a lo largo de todo el camino de transmisión. FWM, muy ligado a la acción del EDFA, se potencia a través del acoplador de fase de la señal con las frecuencias asociadas al ruido de emisión espontánea amplificado en la región de dispersión cero. El ruido de emisión espontánea se refiere al ruido generado por los fotones emitidos (a causa de la transición espontánea de los iones de erbio del estado excitado al estado base) en el margen de longitud de onda de 1,53-1,56 micrómetros (el margen del EDFA) con fase y dirección aleatoria. De esta forma se obtiene una radiación incoherente que actúa como una amplificación adicional a la del propio EDFA. Este efecto FWM se puede controlar mediante una monitorización suficientemente precisa de los niveles de potencia, así como de la relación señal-ruido en el amplificador óptico EDFA. El efecto FWM es causado por la naturaleza no lineal del índice de refracción de la fibra óptica. Interacciones no lineales entre diferentes canales DWDM crean bandas laterales que pueden causar interferencia entre canales. El efecto FWM es limitar la capacidad del canal del sistema DWDM, este efecto no se puede filtrar, ni ópticamente ni eléctricamente, y aumenta con la longitud de la fibra. Debido a la propensión del efecto FWM, no se puede emplear el tipo DSF para aplicaciones DWDM.

2.5.4 NZ-DSF (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber), G 655. Las fibras G.65X, permiten velocidades por encima de los 10 Gbps en el entorno DWDM y donde los niveles de dispersión se mantienen entre 1 y 6 ps/nm.km . De momento estas fibras aparecen como la tecnología de medio de transmisión idóneo para DWDM como una forma de evitar efectos

no lineales indeseables al mismo tiempo que se obtienen elevadas velocidades de transmisión y una clara potencialidad para aumentar esas velocidades de transmisión . El diseño de estas fibras se basa en técnicas de gestión de la dispersión, de forma que la dispersión total acumulada a lo largo de todo el camino de transmisión sea cero, con lo cual se evita el ensanchamiento del pulso al mismo tiempo que se utiliza la propia dispersión para compensar los efectos no lineales asociados a las elevadas potencias que se manejan en los EDFAs .El efecto FWM aparece eliminado en la tercera y última

2.6 RECEPTORES OPTICOS

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

2.6.1 Fotodetectores

Se utilizan fundamentalmente dos tipos de fotodetectores, el fotodiodo PIN (Positivo-Intrínseco-Negativo) y el fotodiodo de avalancha (APD).

- Fotodiodo PIN es un dispositivo que emplea detección directa, es decir, el fotodetector convierte el flujo de luz de entrada en un flujo de electrones, el cual es amplificado y transferido a través de un dispositivo de umbral, el valor lógico de la señal de entrada en un instante de tiempo dado, depende del valor de la magnitud del flujo con respecto a cierto umbral establecido para la duración de un bit, la decisión se toma con base en la presencia o ausencia de luz durante la duración del bit. Existe una región intrínseca entre las regiones p y n, este fotodiodo es básicamente una juntura p-n inversamente polarizada. Por medio del efecto foto-eléctrico, la luz incidente en la juntura crea pares de electrón-hueco en las regiones n y p del fotodiodo. Los electrones liberados en la región p cruzan a la región n y viceversa, creando un flujo de corriente. Estos fotodetectores son soluciones adecuadas para receptores ópticos en aplicaciones de gran ancho de banda.
- Los APDs son dispositivos similares a los fotodiodos PIN, pero su ganancia se obtiene a través de un proceso de amplificación. Un fotón actuando en el dispositivo libera

muchos electrones. Su estructura contiene una región de campo eléctrico o una capa de multiplicación que acelera un portador simple lo suficiente para generar un par electrón-hueco adicional. Los portadores recién generados son acelerados similarmente, a fin de que un portador simple pueda desencadenar un efecto avalancha. Esto provee una ganancia interna que resulta en numerosos pares electrón-hueco generados por cada fotón absorbido. Los fotodiodos PIN tienen muchas ventajas, incluido su costo y su fiabilidad, pero los APDs tienen mayor sensibilidad de recepción y mayor exactitud. Sin embargo los APDs son más caros que los fotodiodos PIN, y pueden tener requerimientos de intensidad mayores y más sensibles a la temperatura.

2.6.2 Filtros

La viabilidad de los sistemas DWDM es dependiente de la velocidad y del rango de los filtros utilizados para recuperar los canales de información. Existen dos tipos de filtros:

- Filtros fijos. Permiten recuperar canales en longitudes de onda pre seleccionadas, las cuales no pueden ser modificadas durante su funcionamiento. A este tipo pertenecen los filtros de rejilla y fibras de rejillas de Bragg entre otros.
- Filtros sintonizables en longitud de onda. En sistemas DWDM se utilizan los siguientes: Filtro Etalón, Cadena Mach-Zehnder, filtro acusto-óptico sintonizable, filtro electro-óptico sintonizable, filtros Fabry-Perot de cristal líquido y rejilla de arreglo de guía de onda.

2.6.3 Multiplexores y demultiplexores ópticos

Los sistemas DWDM envían señales de varias fuentes sobre una sola fibra, por lo tanto se deben incluir algunos dispositivos para combinar las señales de entrada. Esto lo hace un multiplexador, que toma las longitudes de onda ópticas de múltiples fibras y las convierte en un solo rayo. En el extremo receptor, el sistema debe poder separar los componentes de luz así que puedan ser discretamente detectados. Los demultiplexores realizan esta función desglosando el rayo receptor en sus componentes de longitud de onda y acoplándolos a la fibra individual. La demultiplexación se debe hacer antes de la detección de la luz, porque los fotodetectores inherentemente son dispositivos de banda ancha y no pueden selectivamente detectar una sola longitud de onda. En un sistema unidireccional,

hay un multiplexor en el lado emisor y un demultiplexor en el lado receptor. Se requerirían dos sistemas en cada extremo en las comunicaciones bidireccionales, y se necesitarían dos fibras separadas. En un sistema bidireccional, hay un multiplexador/demultiplexador en cada extremo y la comunicación es sobre un solo par de fibras. Los multiplexadores y los demultiplexadores pueden ser de diseño pasivo o activo. El diseño pasivo se basa en prismas, rejillas de difracción, o filtros mientras que el diseño activo combina dispositivos pasivos y filtros sintonizables. Los principales retos en estos dispositivos es minimizar la diafonía y maximizar la separación de canal. La diafonía es una medida de cuanto están separados los canales, mientras que la separación de canales se refiere a la posibilidad de distinguir cada longitud de onda.

2.6.3.1 Multiplexor óptico de inserción-extracción (OADM)

Entre puntos de multiplexación y demultiplexación de los sistemas DWDM, hay un área en la que existen múltiples longitudes de onda. Un multiplexor óptico add/drop (OADM) realiza la función de remover o insertar una o más longitudes de onda en algún punto del enlace. Mas que combinar o separar todas las longitudes de onda, los OADM pueden remover algunas longitudes de onda, mientras dejan pasar las restantes. Los OADMs son similares en muchos aspectos a los ADM de SONET, excepto que solamente las longitudes de onda ópticas son añadidas o removidas, y no hay conversión de la señal de óptico a eléctrico.

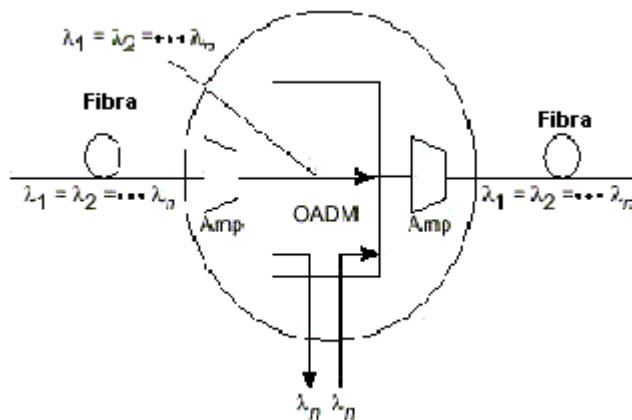


Figura 2.10 Multiplexor de longitud de onda de inserción extracción

Hay dos tipos de OADMs: La primera generación es un dispositivo fijo que se configura físicamente para extraer una longitud de onda determinada mientras se añaden otras. La segunda generación es reconfigurable y capaz de seleccionar dinámicamente que longitudes de onda se añaden y cuales se remueven. Los filtros de película delgada han emergido como la tecnología elegida para los OADMs en los sistemas DWDM actuales porque son menos caros y más estables. En cuanto a la segunda generación de OADMs, se prefieren otras tecnologías tales como las rejillas de fibra sintonizables y circuladores. La utilización de OADM en un entorno DWDM en una red de anillo permite que las longitudes de onda puedan asignarse (drop) y añadirse (add) en los puntos donde se necesita más ancho de banda y solamente cuando se necesita. Los ADOMs actuales, soportan una extracción/inserción de 4 y 8 canales, siendo esta tecnología una de las más activas en el desarrollo de la red DWDM.

2.6.3.2 CrosConectores ópticos (OXC)

Es un conmutador matricial de fibras ópticas de dimensión $M \times N$, donde M es el número de fibras de entrada que conmutan a/desde N fibras de salida, en base a un proceso completamente óptico. La función del OXC consiste en conmutar longitudes de onda a gran velocidad de una fibra a otra en base a las necesidades de tráfico. Esta configuración matricial no debe presentar bloqueo, en el sentido de que cualquier fibra a la entrada de las M totales debe poder proyectarse sobre cualquier fibra de las N que conforman la salida, en configuración de una a una o de una hacia muchas. La primera aplicación que aparece definida es la restauración del tráfico y enlace en caso de cortes en la fibra y fallos en el nodo. Esta aplicación de restauración aparece definida en base al gradual desplazamiento, en un mayor o menor plazo de tiempo, de las funcionalidades referentes a restauración desde SONET a la capa óptica. Para lograr la flexibilidad completa de las redes están los crosconectores ópticos (OXC)¹, que redireccionan los canales entre varias fibras de entrada y salida en función de la longitud de onda. Estos componentes permiten implementar redes

¹ En el anexo 1. "Dispositivos DWDM" se estudia en detalle este dispositivo.

totalmente reconfigurables en las que las distintas longitudes de onda puedan ser encaminadas y trasladadas. Utilizando OXC, la tecnología DWDM ofrece un servicio de transporte universal y transparente a las capas superiores electrónicas, ya sea JDS/SONET o ATM.

2.7 PROTOCOLOS UTILIZADOS EN LA TRANSMISIÓN ÓPTICA

Para simplificar el proceso de envío de paquetes dentro de los nodos ópticos se usa el protocolo MPLS en los nodos centrales y los nodos del borde.

2.7.1 Características y funcionamiento de MPLS

MPLS es un método de envío de paquetes que combina la velocidad de la capa 2 y la escalabilidad y la inteligencia de IP. Algunas características de MPLS son:

- MPLS funciona con cualquier tecnología de la capa de enlace de datos, no sólo con ATM.
- Las tecnologías MPLS soportan el envío de tráfico multicast y unicast.
- MPLS es escalable para soportar el constante crecimiento de Internet.
- MPLS soporta operaciones, administración y facilidades en el mantenimiento que por lo menos son como las soportadas por las actuales.
- MPLS trabaja con múltiples protocolos.

El funcionamiento del MPLS es el siguiente: Los enrutadores de acceso a la red pegan etiquetas los paquetes basadas en lo que se llama Clase de equivalencia (FEC). Un FEC puede ser visto como un conjunto de paquetes que sigue el mismo camino a través de la red. Los paquetes deben ser enviados a través de la red MPLS mediante el intercambio de etiquetas en los enrutadores o en los conmutadores del núcleo de la red llamados enrutadores de conmutación de etiquetas (LSR) hasta su destino. Una etiqueta es una versión compacta de una cabecera que tiene dentro toda la información necesaria para ir desde la fuente al destino. La etiqueta es un identificador corto, y de tamaño fijo que se utiliza para identificar al FEC al que el paquete es asignado. Esta etiqueta es un índice a una tabla de encaminamiento de entrada y salida, llamada base de información de etiqueta LIB.

Los paquetes destinados a un enrutador F que provienen de un enrutador A siguen un LSP (camino de conmutación de etiquetas) que es básicamente la ruta predeterminada que un conjunto de paquetes pertenecientes a un FEC atraviesa a través de la red MPLS para alcanzar su destino. Cada LSP es unidireccional, por lo tanto el tráfico de vuelta tiene que usar un LSP distinto. Para que un LSR cambie la etiqueta de un paquete que ha llegado y sea enviado a otro LSR debe tener un método para aprender qué valor de etiqueta está esperando este último. Actualmente varios protocolos se pueden usar para la distribución de etiquetas similares, como LDP (protocolo de distribución de etiquetas), CR-LDP, RSVP y BGP. Para elegir el modo de transferencia de paquetes más apropiado dentro de la AON se debe tener en cuenta el compromiso entre la eficiencia requerida y la capacidad de la actual tecnología óptica. Se tienen dos métodos de transferencia para ser implementados en la AON: OTPN (red Óptica Transparente con Conmutación de Paquetes) y OBS (Conmutación óptica a ráfagas). La diferencia básica entre los dos es que OTPN está basado en paquetes de longitud fija y modo de transferencia síncrono, mientras que en OBS los paquetes tienen longitud variable y el modo de transferencia es asíncrono.

2.7.2 Red Óptica Transparente con Conmutación de Paquetes (OPTN)

La red 100% Óptica con Conmutación de Paquetes (OTPN) es una solución para el futuro que tiene en cuenta el crecimiento de la red IP y la evolución de los servicios y la tecnología. Se propone una capa de transporte y conmutación de paquetes en una infraestructura DWDM. La combinación del gran ancho de banda de la tecnología DWDM en provecho de la transparencia de los paquetes ópticos se aplica a la tasa de bit y a los servicios. Una propiedad significativa de OTPN es la separación de la capacidad de transferencia de los datos (que tienen una duración fija y una tasa de bit variable) de la función de control (cabecera con una baja y fija tasa de bit). El paquete óptico se transporta y conmuta como una entidad completa sin tener en cuenta el formato de la información transportada. El funcionamiento de la capa OTPN depende sólo del tráfico de los paquetes ópticos, cualquiera que sea su contenido, reduciendo la sensibilidad de la red al crecimiento del ancho de banda del enlace. Esto hace de OTPN un protocolo de transporte y conmutación flexible y potente, capaz de avanzar con respecto a los incrementos de la

capacidad de transmisión óptica y de proveer la gran demanda de ancho de banda, mientras se mantienen la capacidad de control y procesamiento.

2.7.2.1 Formato de los paquetes ópticos

Un paquete OTPN tiene una duración fija de 1.7 us. Está formado por tres campos:

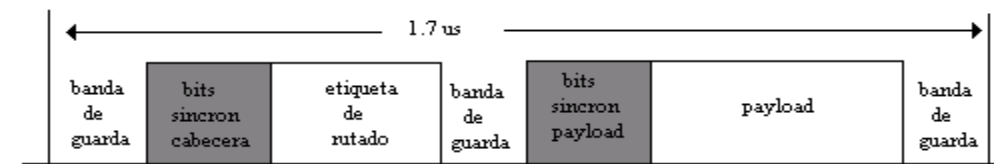


Figura 2.11 Formato del paquete óptico OTPN

- Una cabecera con una tasa de bit baja y fija (622 Mb/s) para poder ser procesada electrónicamente. La información de enrutado se obtiene de ella después de la conversión opto-eléctrica.
- La carga útil del paquete con duración fija y tasa de bit variable (desde unos cientos de Mb/s a 10 Gb/s). Tanto la cabecera como el payload se transmiten a la misma longitud de onda. Se produce una separación entre los datos, que son procesados en el dominio óptico y la cabecera, que se procesa en el dominio eléctrico.
- Dos bandas de guarda insertadas antes y después del payload para tener en cuenta los tiempos de conmutación de los dispositivos, el retardo experimentado por la carga útil dentro del nodo y la no-linealidad de las unidades de sincronización de las interfaces de entrada / salida del nodo.

Un nodo óptico tiene incorporadas una serie de funciones, algunas realizadas en el dominio óptico y otras en el dominio eléctrico. En la estructura de un nodo óptico se distinguen cuatro bloques principales:

- La interfaz de entrada, que recupera el contenido de la cabecera y realiza las funciones de alineación y sincronización por medio de un alineador y un sincronizador óptico.
- La matriz de conmutación óptica, que tiene la tarea de realizar el encaminamiento de los paquetes ópticos hacia los puertos de salida y resolver la contienda de los paquetes.

- Una unidad de control, que controla la matriz de conmutación usando la información proporcionada por la cabecera.
- La interfaz de salida, que realiza la sincronización a la salida, la reescritura de las cabeceras y la regeneración de la señal óptica requerida para compensar la degradación de la relación de extinción y de la relación señal a ruido introducida por la matriz de conmutación.

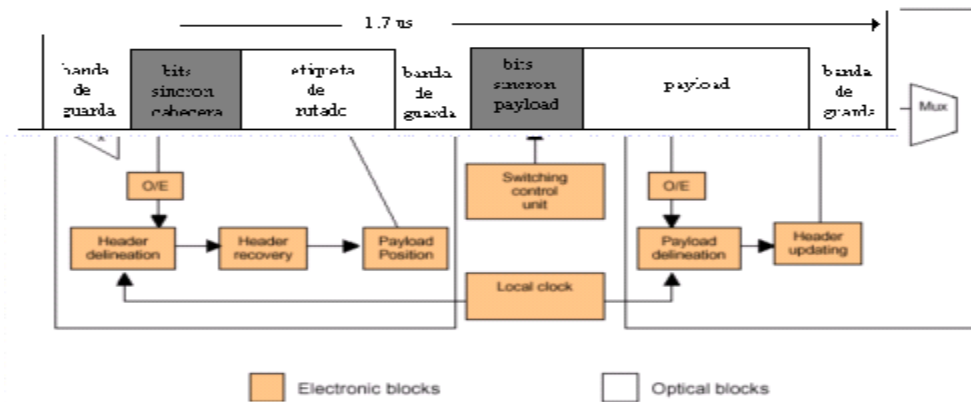


Figura 2.12 Estructura de un nodo óptico

Hay que destacar que la carga útil nunca pasa por el dominio eléctrico, por lo que se necesitan dos sincronizadores ópticos para alinearlos con el slot y así mantener la transparencia.

2.7.2.2 Alineación de paquetes

Su función es alinear los paquetes de las diferentes entradas con el time slot de referencia y garantizar la transparencia en el conmutador. La alineación sirve para la sincronización, reconocimiento y reescritura de cabeceras y detección del payload. Para hacer la alineación, los bits entrantes deben estar en fase con el reloj local. El tradicional PLL no es aplicable por su lentitud, se propone un circuito alineador basado en un arreglo de puertas de GaAs que proporciona la recuperación de la cabecera en tiempo real. Otras soluciones están basadas en el reconocimiento de patrones, comparándose la secuencia de los datos de entrada con una clave incluida en la cabecera del paquete. Se utilizan diferentes claves en

los paquetes posteriores para reducir la probabilidad de una falsa sincronización. Si la clave 1 se detecta en un paquete, entonces la clave 2 se espera en el siguiente. Como OTPN usa un modo de transferencia síncrono y los paquetes tienen una duración fija, es necesaria la sincronización entre la cabecera y la carga útil. Para mantener la transparencia la sincronización debe realizarse en el dominio óptico. Son necesarios dos sincronizadores:

- Un sincronizador a la entrada para compensar las variaciones de retardo, conocidas como slow jitter, de los paquetes que llegan a la misma entrada. Este jitter es debido a las variaciones de temperatura y la dispersión cromática resultando diferentes velocidades de propagación sobre diferentes longitudes de onda.
- Un sincronizador a la salida para compensar el retardo de los paquetes dentro de la matriz de conmutación. Esto se debe a que los paquetes pueden seguir diferentes caminos de distintas longitudes dentro de la estructura de conmutación, resultando un fast jitter de los paquetes que se dirigen al mismo puerto de salida.

Un sincronizador típico consiste en una serie de líneas de fibra de longitud determinada (FDLs) interconectadas con conmutadores 2x2. Una vez el paquete ha entrado en ella debe salir un determinado espacio de tiempo más tarde. En el sincronizador de la figura las longitudes de las FDLs siguen una secuencia exponencial, la primera línea debe proporcionar un retardo de la mitad de la duración del time slot, la segunda un cuarto de tiempo del time slot y así hasta el final. Una vez ha sido identificado el tiempo en el que comienza a transferirse el paquete, la unidad de control calcula el retardo necesario y decide el camino a seguir por las líneas. Se deben utilizar amplificadores ópticos para reducir las pérdidas de inserción acumuladas y el crosstalk (diafonía lineal entre canales) en los conmutadores en cascada.

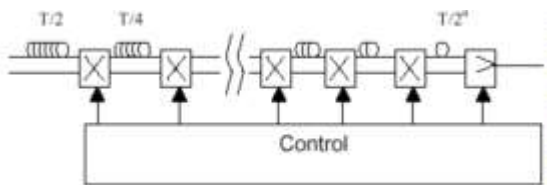


Figura 2.13 Sincronizador

Las desventajas del uso de este tipo de sincronizadores son el aumento de la complejidad del hardware debido al uso de FDLs y de conmutadores, así como el crosstalk y la atenuación debida a las pérdidas de inserción, las cuales introducen una degradación de la calidad de la señal creciente con el número de nodos en cascada. La explicación de la aparición de bandas de guarda antes y después del payload está en que el jitter del paquete sólo puede ser parcialmente compensado por los sincronizadores, por lo que es necesario mantener bandas de guarda en el paquete óptico para prevenir un posible daño del payload durante la inserción o borrado de cabeceras. Las bandas de guarda también se introducen para tener en cuenta el tiempo de conmutación de los dispositivos opto-electrónicos y la precisión finita de las FDLs. Uno de los problemas de la conmutación de paquetes en el dominio óptico es la contienda que se produce cuando dos o más paquetes entrantes se dirigen al mismo puerto de salida. Cuando ocurre esto, sólo un paquete es conmutado a la salida correcta. Para resolver la contienda se han propuesto varias técnicas:

- **Almacenamiento.** El almacenamiento óptico sólo puede ser realizado con FDLs de longitudes iguales a múltiplos de la duración del paquete. Por lo tanto la capacidad de un buffer de un conmutador óptico no puede exceder unas pocas unidades. El número de FDLs es un parámetro de diseño crítico ya que incrementa el hardware, el volumen del conmutador y el ruido. Entre las técnicas de almacenamiento tenemos:

Almacenamiento compartido. Si más de un paquete se dirige a la misma salida, todos los paquetes menos uno recirculan hacia el puerto de entrada mediante líneas de fibra diferentes longitudes. Se deben usar amplificadores ópticos para reponer la atenuación que sufre la señal al hacerse la recirculación. La desventaja de esta técnica es que cuando el tráfico es a ráfagas y la carga alta se requieren muchas recirculaciones, causando la acumulación de ruido ASE (emisión espontánea amplificada) introducido por los amplificadores.

Cola de salida. Esta técnica consiste en un conmutador espacial con un buffer en cada salida. El buffer consiste en FDLs de diferentes longitudes. La ventaja de esta técnica es

que no introduce ruido ASE pero como desventaja se requiere más hardware (longitud total de las FDLs) que el necesario en las arquitecturas con técnicas de recirculación.

Almacenamiento Parcialmente Compartido: esta técnica dedica un almacenamiento óptico a cada salida e incorpora un almacenamiento común compartido a todas las líneas de salida. Los paquetes que encuentran su lugar de almacenamiento ocupado son enviados al almacenamiento compartido temporalmente, y recirculan al puerto de entrada. Ésta técnica combina las ventajas de las dos mencionadas anteriormente ya que se limita el hardware y se soluciona parcialmente el problema de la atenuación de la señal. La gran desventaja del almacenamiento es que el número de líneas de fibra crece mucho cuando la carga es alta o el tráfico es a ráfagas, por lo que se proponen otras técnicas como son el desviación de enrutamiento y el de dimensión de λ .

- **Dimensión de longitud de onda.** Una solución que se propone para eliminar los almacenamientos ópticos es transmitir cada paquete que se dirige a una misma salida en una longitud de onda diferente. Esto se realiza por medio de TOWCs (convertidores ópticos sintonizables de longitud de onda). Con esta técnica, se tiene la ventaja de que no se usa almacenamiento y además se suprime el ruido y la regeneración de la señal, pero por otra parte implica un mayor número de TOWCs, ya que se necesita un TOWC por cada longitud de onda.

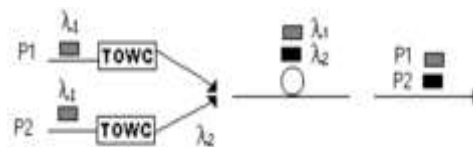


Figura 2.14 TOWCs (convertidores ópticos sintonizables de longitud de onda).

Las figuras muestran el funcionamiento del dimensionamiento de longitud de onda. Dos paquetes (P1,P2) con la misma longitud de onda llegan simultáneamente a la entrada del conmutador y son destinados a la misma salida. Sin convertidores de longitud de onda, se necesitan dos FDLs para almacenar los paquetes, mientras que con TOWCs uno de los

paquetes puede ser transmitido en otra longitud de onda y almacenado en la misma fibra. Con este esquema, cuantas más longitudes de onda haya, más paquetes pueden ser almacenados en cada fibra.

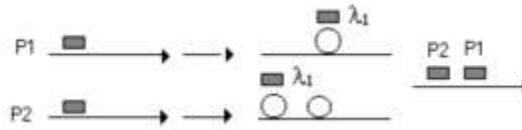


Figura 2.15 Almacenamiento de paquetes

- **Desviación de enrutamiento.** Los paquetes que realizan la contienda son desviados a una salida errónea y se intenta que alcancen su destino por una ruta alternativa. Esta técnica proporciona una implementación muy simple del hardware comparado con el buffering. Las desventajas son un alto retardo y bajo comportamiento. Para resolver esto, se usan pequeños buffers, la desviación de enrutamiento presenta muchas posibilidades en el diseño de las redes, pero introduce problemas como la reordenación de los paquetes y tiene gran dependencia de la topología de la red. Por ejemplo, en una red en malla con un gran número de interconexiones esta técnica tiene una gran efectividad mientras que se obtienen menos ventajas en topologías más simples.

2.7.3 Conmutación óptica a ráfagas (OBS)

Los problemas principales de OTPN son la transmisión ineficiente debida a la utilización de un paquete de tamaño constante y por otro lado la dificultad de realizar sincronizadores de paquetes ópticos y buffers, ya que necesitan que la tecnología madure. También se necesitan soluciones para la alineación y la reescritura de paquetes. Se espera que OBS sea una tecnología viable comercialmente, ya que promete beneficios similares con mucha menos complejidad y por lo tanto se puede implementar en un espacio de tiempo razonable. Las principales características de OBS son:

- Capacidad para la conmutación de circuitos y conmutación de paquetes.

- Separación entre la información de control y los datos; muchas veces la información cabecera/control se envía en un canal separado, y siempre con algún tiempo de separación.
- Las ráfagas pueden ser de longitud variable.
- OBS no necesita almacenamiento (aunque algunas propuestas utilizan algunos buffers para conseguir un mejor resultado en algunas situaciones).

OBS logra un balance entre conmutación de circuitos y conmutación de paquetes; es más eficiente que el primero y más factible que el segundo. Evita la larga espera que provoca el establecimiento de la conexión en la conmutación de circuitos y además puede evitar o reducir la complejidad de muchos de los difíciles problemas que ocurren en la conmutación de paquetes ópticos como la sincronización y el buffering realizado mediante FDLs. OBS realiza también un procesamiento sofisticado de los datos de control y un manejo simple de los datos ópticos.

2.7.3.1 Arquitectura

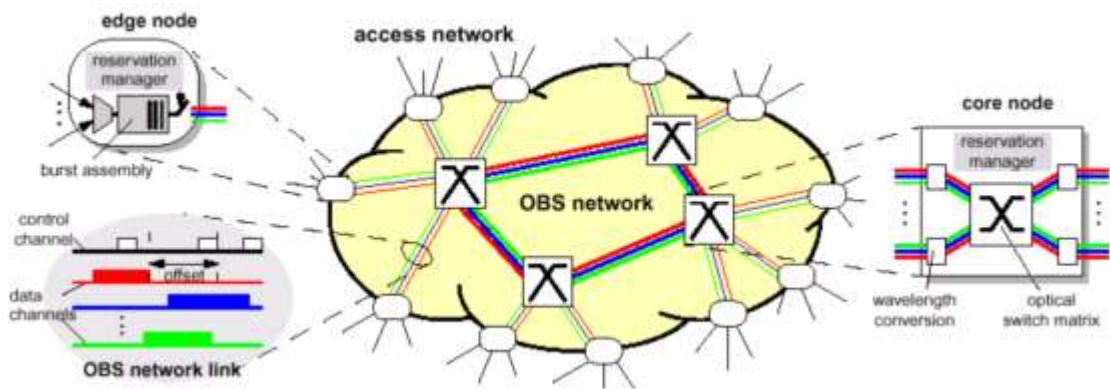


Figura 2.16 Arquitectura OBS

La figura 2.16 muestra la estructura de una red OBS. En ella se observan dos tipos de nodos. En los nodos del borde (EN), se recoge el tráfico de las redes de acceso y se empaqueta/une en largas unidades de datos llamadas bursts. Los nodos del centro (CN) sirven de nodos de tránsito en el núcleo de la red. Su función principal es conmutar los

bursts sin un procesado extenso. Para lograr esto es necesario que delante de cada transmisión de un burst haya alguna información de control que contenga los requerimientos de reserva de recursos. Cuando un EN tiene una ráfaga que enviar, éste emite un burst de control (burst control packet, BCP) a una longitud de onda prefijada, seguido de la ráfaga de datos en una longitud de onda que no se esta usando. A lo largo del recorrido desde el EN fuente al EN destino el BCP se procesa electrónicamente y se reservan los recursos necesarios para la transmisión de la ráfaga de datos. En la figura 2.17 se ve un nodo con N fibras de entrada y salida; cada fibra tiene W longitudes de onda para los canales de datos y 1 para el canal de control.

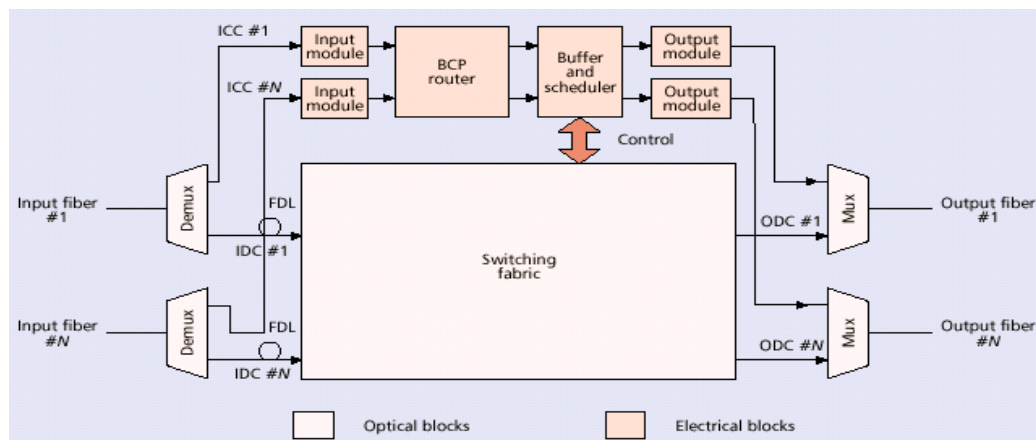


Figura 2.17 Esquema de un nodo de red utilizando conmutador OBS

El demultiplexor es el primer componente del conmutador OBS; su función es separar el canal de control de entrada (ICC) usado por los burst de control (BCP) y los Cuando un BCP alcanza un CN es inmediatamente convertido al dominio electrónico por el módulo de entrada (IM) y enviado al enrutador BCP que determina a qué fibra de salida se ha de enviar el BCP y su canales de datos de entrada (IDC) usados por los bursts de datos asociado. Una FDL se usa para retrasar el burst de datos mientras se procesa el BCP. Una vez que el BCP ha sido procesado se envía al módulo de salida / transmisión (OM/TX) que actualiza el campo de control contenido en el BCP y transmite el burst de datos a la longitud de onda determinada por el planeador. Finalmente el multiplexor inserta el canal de control en la fibra de salida. Para usar eficientemente los recursos de conmutación el

planeador del BCP no se realiza cuando llega el BCP sino un instante antes de que llegue su burst de datos asociado. Para retrasar el procesado del BCP se utiliza un buffer de reordenación cuya cola se ordena según los tiempos de llegada de los bursts de datos y envía el BCP al planeador Δ s antes de que llegue la ráfaga, donde Δ es la suma del tiempo de procesado y el tiempo de establecimiento de la conmutación óptica. El planeador procesa el BCP y reserva los recursos necesarios para enviar la ráfaga de datos; además avisa de cualquier problema de contienda en los canales de longitud de onda de salida.

2.7.3.2 Control y señalización en OBS

La idea general de la conmutación de ráfagas y sus metodologías asociadas de control y señalización se derivan de un estándar de la ITU-T para ATM; se trata del concepto de Bloque de Transferencia ATM (ABT). En ese estándar se describen dos esquemas de control:

ABT con transmisión retardada: el nodo de acceso transmite el paquete de control y espera una confirmación. Si se recibe confirmación del camino extremo a extremo, la fuente procede a la transmisión, y si no debe eliminar el bloque de datos.

ABT con transmisión inmediata: el nodo de acceso envía un paquete de control similar, pero no espera tener la confirmación de todos los nodos de que realmente tienen recursos disponibles, sino que envía el bloque de datos inmediatamente después de lanzar el paquete de control a la red. Si un conmutador dado no estuviera preparado para ofrecer los recursos especificados en el paquete de control, simplemente lo que haría sería eliminar los datos cuando llegaran.

Los esquemas que se corresponden con OBS generalmente se llaman tell-and-wait (TAW) y tell-and-go (TAG) respectivamente. Se asume inicialmente que el paquete de control se transmitirá en un medio de señalización fuera de banda, donde se procesará eléctricamente; entonces los elementos ópticos podrán establecer los recursos pedidos.

Hay muchas consideraciones en la señalización que son comunes a todo el medio óptico. Una de ellas es la dificultad del almacenamiento óptico. Puede ser una ventaja *significativa*

que la metodología de control de OBS pudiera eliminar la necesidad de FDLs dentro del núcleo de la red óptica. El almacenamiento se podría hacer entonces electrónicamente sólo en los nodos de acceso. Obviamente TAW acoge este criterio, ya que la admisión del paquete se hace en el nodo de acceso esperando la confirmación del establecimiento de la ruta. Sin embargo, el retardo que aparece es indeseable, y bastante significativo en redes de muy alta velocidad en proporción al tiempo de transmisión. Para el TAG, como los datos se transmitirán inmediatamente después de la información de control, es posible que se necesite almacenamiento en los nodos intermedios para almacenar la ráfaga de datos hasta que sea procesada la información de control. La cantidad de almacenamiento que se necesita puede ser inmanejable. Sin embargo, TAG usa de modo más eficiente los recursos en el sentido de que los datos llegan virtualmente a la misma vez que los recursos se asignan para que puedan ser transmitidos los datos.

2.8 DESVENTAJAS DEL ENCAMINAMIENTO POR LONGITUD DE ONDA

El encaminamiento por longitud de onda puede ser descrito como un modelo de conmutación de circuitos sobre la infraestructura de una red óptica. Como la asignación de los canales significa usar al menos una longitud de onda por cada camino, se necesitan herramientas para realizar la agregación del tráfico muy sofisticadas para usar efectivamente la capacidad asignada. Además si tenemos muchos nodos, la conmutación de circuitos debe permitir la conexión de un nodo con cualquier otro. En este tipo de topología, si hay demasiados nodos podría no haber suficientes longitudes de onda para todas las conexiones. Y además, aunque hubiera suficientes, los croscnectores ópticos tienen limitaciones de tamaño. Adicionalmente, el control y la configuración para hacer la red óptima son muy complejos.

Estas desventajas han orientado las investigaciones hacia métodos de conmutación de paquetes en las redes ópticas, ya que se corresponden mejor con la naturaleza del tráfico, maximizan el comportamiento y incrementan la utilización de la red.

3 CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO DE UN SISTEMA DWDM.

3.1 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE UNA RED ÓPTICA

- **Alta capacidad:** La red tiene que enfrentarse con aplicaciones y servicios en el futuro, los cuales probablemente tengan diferentes anchos de banda. El volumen total de tráfico se espera que sea grande y aumente cuando las aplicaciones y los servicios lleguen a ser a mas bajo precio y fáciles de usar. Así, la red debe tener gran capacidad y ser capaz de manejarla.
- **Transparencia:** Para tomar en cuenta la mayoría de las ventajas de las funciones ópticas y reducir la complejidad de los equipos, la señal no debería convertirse al dominio eléctrico donde quiera que sea posible. Varios niveles de transparencia se podrían especificar tales como formato de la señal, tasa de bits, modo de transferencia y servicios. La transparencia total no existe, las limitaciones físicas siempre causan limitaciones de transparencia.
- **Flexibilidad:** Se refiere a la habilidad de la red para acomodarse a los cambios en los patrones de tráfico. En redes ópticas esto seria mas fácil, puesto que la capacidad de manejar señales es mas alta.
- **Conectividad:** Es la habilidad de la red para establecer conexiones independientemente del estado actual de la red. En redes ópticas, la disponibilidad de longitudes de onda, los OXC que bloquean longitudes de onda o un número limitado de OADMs, son las principales barreras para una conectividad óptica total.
- **Escalabilidad:** Es la posibilidad de capacidad de actualizar una red añadiendo nuevas facilidades en pasos uniformes. En redes ópticas el incremento gradual de longitudes de onda disponibles sin cambiar el terminal DWDM completo es una característica clave para la escalabilidad.

3.2 ARQUITECTURAS DE LAS REDES 100% ÓPTICAS (AON)

Las arquitecturas de redes ópticas se pueden clasificar en arquitectura funcional y arquitectura de red. La Recomendación UIT-T G.872, "Arquitectura de las redes de transporte ópticas", incluye entre otras características, la posibilidad de multiplexar por división en el tiempo señales transmitidas por la OTN. La arquitectura de transporte describe las funcionalidades de la AON desde un punto de vista a nivel de red. Se considera una estructura de red óptica dividida en capas, la característica de la información del cliente, asociaciones de las capas cliente / servidor, topología de interconexión, y la funcionalidad de la capa de la red. La funcionalidad de las capas de red cubre la transmisión de la señal óptica, multiplexación, enrutamiento, supervisión, funcionamiento, y protección de la red. Debido a que la capa óptica actúa como capa servidora de las capas cliente (SDH, ATM, IP), es necesario definir una interfaz de servicios entre la capa óptica y las cliente (servicio de caminos ópticos), estos caminos ópticos deben establecerse y liberarse a petición de las capas cliente y de las operaciones de mantenimiento. El ancho de banda debe negociarse entre la capa cliente y la capa óptica. Puede requerirse una función de adaptación de las señales de la capa cliente al formato de la capa óptica. Los caminos ópticos pueden ser unidireccionales o bidireccionales y deben garantizar un determinado nivel de prestaciones (BER). La gestión de red² debe verificar su funcionamiento, y también soportar diversos niveles de protección y tiempos de reconfiguración. Deben proporcionar la posibilidad de multicasting (opción insertar, extraer y continuar), de regeneración 2R o 3R, proporcionar retardos acotados por un valor máximo, gestión intensiva de fallos incluyendo informes de alarma y aislamiento de la porción afectada. Para proporcionar estos servicios se requiere una interfaz de control y gestión entre la capa cliente y la capa óptica, esta interfaz le permite al cliente especificar los caminos ópticos que hay que establecer y liberar, como también parámetros de servicio asociados a cada camino óptico. A la capa óptica le permite proporcionar datos sobre prestaciones y gestión de fallos a la capa cliente.

² Anexo 3. "Gestión de Redes 100% Ópticas"

3.2.1 Tipos de arquitecturas ópticas

Desde el punto de vista de enrutamiento del tráfico el núcleo de las redes ópticas se divide en niveles jerárquicos. Esta división se puede traducir a un dominio topológico interconectado apropiadamente, resultando topologías más complejas. Se tienen los siguientes tipos de arquitecturas ópticas:

- Sección de anillo coloreado: es considerado como un buen primer paso para introducir funcionalidades ópticas en redes SDH, ya que esta arquitectura combina funcionalidades SDH de los equipos existentes (Enrutamiento y protección lineal MS) con enrutamiento óptico para el pedido de nodos lógicos.
- Anillo OMS-SP (protección compartida en la sección de multiplexación óptica) es una arquitectura óptica total muy avanzada, donde se implementan el enrutamiento y la protección ópticamente.
- Malla basada en crosconectores ópticos se ve como una arquitectura óptica avanzada, donde la introducción del enrutamiento y restauración óptica deberían contribuir a simplificar la complejidad del equipo electrónico en redes en malla de alta capacidad.

Las configuraciones de redes jerárquicas se ven como posibilidades para partición de redes reales en dominios mas manejables. Se espera que estas configuraciones sean útiles en diferentes escenarios de red y posiblemente será desplegado en diferentes etapas en la evolución de las redes existentes a redes basadas en la nueva arquitectura de red óptica.

En términos generales, las arquitecturas de redes WDM pueden dividirse en dos grandes grupos:

1. Redes WDM de difusión y Selección las cuales pueden ser usadas principalmente para el diseño de redes MAN y LAN
2. Redes DWM de enrutamiento de longitud de onda, las cuales proveen cobertura nacional e internacional.

En un nivel superior, también se puede distinguir entre redes WDM de salto simple, las cuales transmiten la información directamente de la fuente al destino y redes WDM de salto múltiple, las cuales emplean nodos intermedios para transmitir la información.

3.2.2 Diseño de arquitecturas de redes DWDM

Los criterios más importantes para el diseño de la arquitectura en una red DWDM son los siguientes:

- Minimización del número de λ s y de la potencia de transmisión en trayectos de larga distancia para mitigar los efectos no lineales de la fibra óptica.
- Utilización de Amplificadores Ópticos (OA's) de alta potencia de saturación para superar los efectos de la Emisión Espontánea Amplificada (ASE).
- Minimización de las pérdidas de inserción de los componentes ópticos para disminuir los requerimientos de ganancia de las etapas de amplificación intermedias en la red.

La topología de la fibra óptica física instalada influye en la selección de los transceptores y en la asignación de sus longitudes de onda de operación. La necesidad de la tolerancia a fallos y confiabilidad afecta la selección de las arquitecturas de red. También se requiere una permanente revisión de los trabajos de estandarización en cuanto a la asignación de las longitudes de onda ópticas de operación, espaciamiento de canales, consideraciones de potencia y especialmente lo relacionado con topologías basadas en procesos de conmutación óptica.

3.2.3 Parámetros de calidad óptica relacionados con el diseño de arquitecturas de redes DWDM

- **Número de portadoras.** Mediante el análisis del espectro el sistema de gestión puede determinar si en el punto de medida se encuentran las portadoras que deben estar, y que por lo tanto no ha habido corte en la planta entre el origen de la portadora y el punto de medida. Además, la resolución del análisis debe ser lo suficientemente fina como para determinar que en la ventana espectral asignada a una longitud de onda hay únicamente una portadora.
- **Potencia óptica y rizado.** Un análisis espectral correcto proporciona la potencia óptica de cada portadora. El sistema de gestión debe comprobar si se encuentran dentro del margen permitido.

- **Relación portadora-ruido.** Para una recepción correcta se requiere que la potencia de cada portadora sea superior a un umbral determinado, y también que sea superior a un umbral mínimo de la relación portadora a ruido (C/N). Por ruido se entiende el de emisión espontánea de los amplificadores del enlace óptico, que en una traza de un analizador de espectros se manifiesta como un fondo de ruido variable lentamente con la longitud de onda.
- **Identificación de portadora.** En las rutas que incluyen conmutadores, la señal presente en una longitud de onda puede proceder de un enlace entre varios posibles, y el operador debe poder identificar de cual de ellos procede. La identificación se lleva a cabo utilizando, como marcadores que diferencian unas portadoras de otras, parámetros tales como deriva en longitud de onda o desviación de la potencia con respecto a su valor nominal. En caso de ser necesario, el operador puede marcar las portadoras, actuando sobre los elementos de red que sean necesarios. Por ejemplo, los puertos de entrada de las matrices de conmutación van precedidos de amplificadores ópticos y el operador puede variar levemente su ganancia para marcar las portadoras de ese puerto.

A estos parámetros de calidad se les puede denominar primarios; su cumplimiento es condición necesaria para un correcto funcionamiento de la red. Existen otros, que se pueden considerar como secundarios, aportan información sobre el funcionamiento de la red, pero su incumplimiento se traduce de forma indirecta sobre los primarios, por lo que su medida podría en principio no ser estrictamente necesaria (aunque sí se recomienda). Son los siguientes:

- **Deriva en longitud de onda.** Es la diferencia entre la λ central de una portadora y su valor nominal. Este parámetro se considera secundario, porque un valor de la deriva superior al ancho de banda de un canal se traduce en una atenuación de la portadora al pasar por un filtro óptico, o un multiplexor en longitud de onda.
- **Emisiones espurias.** Una emisión espuria indica una degradación en el funcionamiento de un láser, que puede llegar a generar una alarma en su transpondedor asociado. En cualquier caso, dado que los transmisores van seguidos de un multiplexor, el espúreo queda muy atenuado antes de interferir sobre un canal adyacente.

- **Potencia óptica total.** Por potencia óptica total se entiende la del conjunto de señales más la del ruido. En algunos casos esta medida puede ser conveniente, sobre todo si el nivel de ruido es significativo, y puede sacar de su zona de funcionamiento algún elemento de red, como un amplificador óptico.

3.3 CRITERIOS GENERALES PARA EL DISEÑO DE REDES 100% OPTICAS

En el diseño de una red DWDM es importante considerar no solo la funcionalidad requerida en la red sino también las capacidades y limitaciones de los componentes ópticos de red disponibles y de la planta de fibra óptica instalada, con el fin de realizar la mejor utilización posible de los recursos, facilitando así la prestación eficiente de servicios de telecomunicaciones sobre redes ópticas DWDM. El procedimiento general de diseño de una red con encaminamiento por longitud de onda comprende los siguientes pasos:

1. Se especifica la topología de fibra (física) y los requisitos de tráfico, generalmente una matriz de tráfico.
2. Se diseña la topología de caminos ópticos que permita la interconexión con las capas superiores.
3. Se realiza dicha topología en el seno de la capa óptica, es decir, se resuelve el problema de enrutamiento y asignación de la longitud de onda.
4. Se debe tener en cuenta la solución de problemas adicionales como agrupamiento de tráfico.

Algunas consideraciones que se deben tener en cuenta son:

- El costo de los equipos de la capa óptica está determinado por el número de longitudes de onda que se emplean en un enlace.
- Por motivos de normalización, la capacidad de una longitud de onda es 1 unidad de tráfico.

El problema de diseño de la topología física óptima puede ser referido como el problema de diseño de la planta de cable para determinar si se satisface el cálculo de potencia requerida, lo cual determina la ubicación de las etapas de amplificación óptica en la red.

Dadas varias topologías físicas de red de difusión y selección, el hecho de que los dispositivos láser de entrada y los filtros de salida, o ambos, sean sintonizables, permite una amplia gama de posibilidades para el trabajo en la red. En una red de salto simple se debe considerar la latencia de sintonización de los transmisores y receptores sintonizables, la cual puede ser un factor importante en la selección de los componentes ópticos, dependiendo del tipo de red a ser implementada.

En una red de salto múltiple, un nodo tiene asignado uno o más canales a los cuales se sintonizan sus transceptores. La conectividad entre cualquier par de puntos en la red es lograda mediante la configuración de los nodos intermedios de enrutamiento.

En las redes de salto simple y de salto múltiple es importante tener en cuenta que cualquier diseño no solo debe ser sencillo de implementar sino también escalable para acomodarse a la gran densidad de usuarios. Sin embargo en el diseño de un sistema de salto múltiple apropiado existen dos aspectos importantes que deben ser considerados en la arquitectura del sistema:

- La estructura virtual escogida debe estar cerca de ser óptima en algún sentido, la distancia de salto promedio de la estructura entre los nodos debe ser pequeña, el retardo de paquete promedio debe ser mínimo.
- La complejidad del procesamiento nodal debe ser pequeña debido a que el entorno de alta velocidad de la óptica permite muy poco tiempo para efectuar procesamiento.

3.3.1 Enrutamiento a nivel óptico

El enrutamiento de los caminos ópticos puede ser iniciado por el operador, cuando se desea introducir cambios en la configuración de red, o bien de forma automática por algún sistema de gestión, como consecuencia de fallos en la planta. Independientemente de su origen, la implementación del enrutamiento involucra, entre otros, al sistema de gestión de la capa óptica, que debe ser capaz de encontrar rutas posibles y analizar su viabilidad. El procedimiento de enrutamiento comprende los pasos siguientes:

Paso 1. Encontrar el camino más corto entre dos nodos. Este es un problema topológico clásico. Dados dos nodos de red y un mapa de capacidad óptica disponible, el sistema de gestión de la red óptica ha de encontrar la ruta más corta entre ellos. En el caso de que los

nodos sean los puertos de acceso a los elementos terminales de red origen y destino de la ruta óptica, se deberán encontrar al menos dos rutas disjuntas, una activa y otra de reserva.

Paso 2. Analizar la viabilidad de la ruta para cada una de las portadoras. Este paso consiste en analizar y comprobar que el ruido acumulado a lo largo de la ruta, la dispersión, la relación C/N final, la carga de los amplificadores ópticos, etc., se encuentra dentro de los márgenes de calidad exigidos.

Paso 3. Activar la ruta en régimen de pruebas y medir la calidad de señal extremo a extremo. La ruta se activa inicialmente con tráfico simulado. La calidad se mide tanto a nivel de capa óptica, mediante análisis espectral y comprobando que no se ha generado ninguna alarma, como a nivel de redes de transporte, para asegurar la calidad de servicio completo extremo a extremo.

Paso 4. Puesta en servicio. Una vez comprobada la calidad de la ruta o rutas, pueden ser puestas en servicio con tráfico real. El enrutamiento es un procedimiento que se debe llevar a cabo para todas las portadoras. Puede que diferentes grupos de portadoras se encaminen por rutas diferentes cuando no sea posible agruparlas todas sobre el mismo camino óptico.

3.3.2 Número de longitudes de onda.

En algunos casos, es conveniente diseñar la red con el máximo número de canales alcanzables con la tecnología disponible en los dispositivos opto-electrónicos y 100% ópticos, sujeto a los requerimientos de tiempo de sintonización y restricciones de costos y del tendido de fibra óptica instalada. Otra estrategia para determinar el número de canales DWDM consiste en asignar una longitud de onda diferente a cada nodo, pero una red así no es muy escalable. El máximo número de λ s está limitado por la tecnología de los dispositivos ópticos, el ancho de banda disponible total, el rango espectral de los componentes y el espaciamiento entre canales. Sin embargo las redes ópticas no necesariamente son capaces de aprovechar todo el ancho de banda que una fibra óptica puede proveer, debido a las limitaciones de ancho de banda de los componentes ópticos y de la capacidad de procesamiento y conmutación óptica de información. Entre los factores que afectan el espaciamiento entre canales se encuentran las altas velocidades de bit requeridas, el cálculo de potencia óptica por cada canal multiplexado, las no linealidades en

la fibra, el tiempo de sintonización y el rango de sintonización de los transmisores y receptores.

3.3.3 Criterios de diseño relacionados con la potencia.

En una red DWDM , la necesidad de mantener una adecuada Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR), la cual en estos sistemas se define como el valor mínimo de la relación señal a ruido para obtener una BER de 10^{-12} , limita las distancias de tramos de fibra y el número de nodos que puedan ser recorridos por una señal óptica. Con el fin de diseñar un sistema DWDM práctico, se debe considerar el tipo de fibra instalada en la red ya que la potencia óptica en cada tipo de fibra presenta un comportamiento diferente. En la recomendación G. 692 UIT-T se definen los parámetros de las interfaces de los sistemas DWDM sobre fibras ópticas monomodo, fibras ópticas monomodo con dispersión desplazada y fibras ópticas monomodo con dispersión no nula, descritas en las recomendaciones G.652, G.653 Y G.655 respectivamente.

3.3.3.1 Atenuación. Se suponen pérdidas en la fibra instalada de 0.28 dB/Km (incluidos los empalmes y el margen del cable) en la región de 1530 – 1565 nm. En la practica estos valores pueden no ser aplicables a todos los cables de fibra, en cuyo caso las distancias reales alcanzables pueden ser más cortas. Se pueden contrarrestar las degradaciones de potencia óptica producidas por la atenuación óptica y efectos no lineales en transmisiones de larga distancia y por las pérdidas de inserción introducidas por los componentes opto-electrónicos, mediante el uso de etapas de amplificación óptica intermedia. Sin embargo, la amplificación introduce problemas significativos, los cuales deben ser considerados cuidadosamente en el diseño del sistema DWDM :

- Ruido de Emisión Espontánea Amplificada (ASE) el cual puede crear problemas al saturar amplificadores en cascada. La acumulación del ruido ASE en una cascada de amplificadores puede degradar seriamente la OSNR. Si la potencia de la señal de entrada es muy baja, el ruido ASE puede causar que la OSNR caiga por debajo de niveles detectables; si la potencia de señal es muy grande, la señal combinada con el ruido ASE puede saturar los amplificadores.

- La banda de paso del Amplificador Óptico (OA) no es plana. Debido a esto en un sistema extenso de OA's en cascada, el ancho de banda de extremo a extremo del trayecto multiplexado puede ser reducido significativamente comparado con un OA simple. Algunas aplicaciones de redes de transporte pueden abarcar trayectos de más de 1000 Km. de longitud, lo cual requiere un gran número de OA's. La concatenación de las bandas de paso de amplificación no ecualizadas conducirá por lo tanto a un ancho de banda de extremo a extremo mucho mas reducido que los 30 nm que ofrece un solo OA.

3.3.3.2 Potencia mínima de canal. A fin de relacionar la OSNR con la BER, debe tenerse en cuenta el proceso de detección de las señales ópticas, el cual es diferente en sistemas con y sin amplificadores ópticos. La potencia óptica mínima resultante es independiente del número de canales DWDM. Los efectos del ASE limitan la potencia óptica mínima de canal para sistemas DWDM con OA's. En un OA la potencia ASE por unidad de frecuencia está dada por:

$$P_{ASE} = 2N_{SP}(G - 1)hv \quad (\text{ecuación 3.3})$$

Donde $N_{SP} > 1$, es el factor de ruido espontáneo, G es la ganancia interna, h es la constante de Planck y v es la frecuencia óptica. La Figura de Ruido (NF) en dB, viene dada por:

$$NF = 10 \log [2N_{sp} - (2N_{sp} - 1)/G] + \eta_{IN} \quad (\text{ecuación 3.4})$$

Donde η_{IN} es la pérdida de entrada por acoplamiento en dB. Si se asume la hipótesis de simplificación de que la potencia total de salida (incluida la potencia ASE acumulada) tiene un valor uniforme después de cada OA y que la ganancia $G \gg 1$, la OSNR es aproximadamente:

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10 \log [hv \Delta v_o] \quad (\text{ecuación 3.5})$$

Donde P_{out} es la potencia de salida por canal en dBm, L es la atenuación del tramo de fibra entre OA's en dB, NF es la figura de ruido externa en dB, Δv_o es el ancho de banda óptico, N es el número de tramos de fibra de la cadena de amplificadores bajo la suposición de que todos los tramos tienen la misma atenuación. En la banda de 1550 nm, $10 \log (hv \Delta v_o) = -58$ dBm, con un ancho de banda óptico normalizado de 0.1nm.

La ecuación anterior muestra que es posible realizar intercambios entre el número de canales y el número de intervalos de fibra en el diseño de un sistema DWDM. Estos intercambios no son directamente aplicables en un sistema práctico debido a la mutua dependencia de algunos de los parámetros de diseño. Este análisis de potencia puede aplicarse a un sistema en que las atenuaciones de los diferentes tramos de fibra difieren, siempre que todas las atenuaciones sean menores o iguales que L , obteniéndose así el caso más desfavorable de OSNR. Esta relación es útil debido a que la OSNR a la entrada del receptor es el promedio del valor cuadrático medio de N fuentes de ruido efectivas, de forma que las pequeñas diferencias entre la atenuación que sufre la potencia de salida en los diferentes tramos de fibra tienden a un valor promedio. La hipótesis de $G \gg 1$ es válida para la mayoría de los OA's.

En una red óptica con amplificadores ópticos conectados en cascada y crosconectores ópticos entre la fuente y los nodos destino el análisis de OSNR es un poco diferente al anterior. La figura 3.1 muestra que la señal óptica puede pasar a través de un número de crosconectores ópticos, de segmentos de fibra, y de amplificadores ópticos. Así, mientras que la señal se propaga a través de la red, se degrada en calidad debido a que pierde energía causada por la atenuación en la fibra, interferencia en el OXC y también por el ruido de emisión espontánea estimulado (ASE) en los amplificadores ópticos.

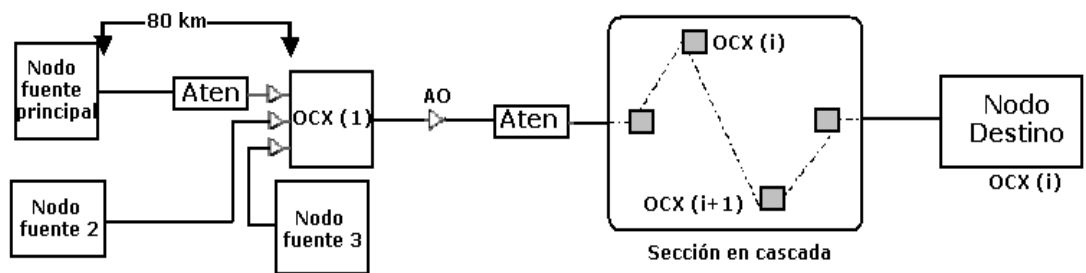


Fig. 3.1 Red óptica con amplificadores ópticos en cascada y OXC entre los nodos fuente y destino

El enlace mostrado en la Fig. 3.2, incluye la conexión en cascada de amplificadores ópticos. Se puede observar como diversas longitudes de onda se multiplexan, son amplificadas por el amplificador de potencia en el transmisor, luego amplificadas por el amplificador de

línea después de cada palmo, amplificadas por el pre-amplificador del receptor, y finalmente demultiplexadas y enviadas a los receptores.

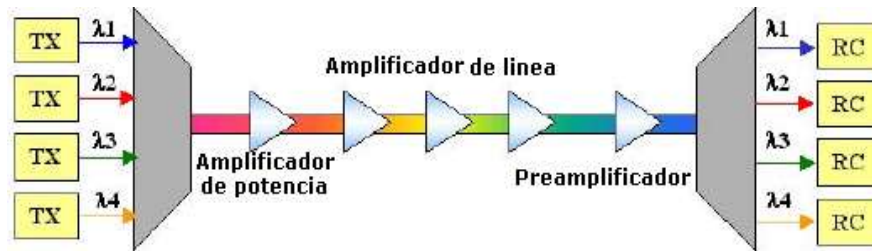


Figura 3.2 Enlace DWDM punto a punto

La OSNR normalizada para un sistema WDM de 1550 nm con varios transmisores ópticos sin nodo intermedio está dada por:

$$OSNR_{nom} = G_{preamplificador} - (P_{rec} - NF_{rec}) + 10\log(M_{ch}) - LOSS_{sp} - NF_{ASE} - 10\log(Num_{span} + 1)$$

(ecuación 3.6)

Donde OSNR se normaliza al ancho de banda de 0.1nm.

P_{rec} : sensibilidad del receptor en dBm relacionada con la tasa de error de bit y la tasa de datos para el receptor fotónico típico.

NF_{rec} : Figura del ruido del receptor en dB.

P_{out} : Potencia de salida del amplificador óptico en línea

$G_{preamplificador}$: Ganancia del pre-amplificador en dB

M_{ch} : Longitud de onda de los canales en la fibra de transmisión.

$LOSS_{sp}$: Pérdida de potencia óptica en la distancia de un palmo (span) en dB.

NF_{ASE} : Figura de ruido del amplificador óptico en dB.

Num_{span} : Número de palmos.

De esta ecuación se puede decir que tanto la ganancia óptica como la figura de ruido son uniformes para todos los canales, el espacio entre canales adyacentes es bastante ancho para mantener el cross-talk bajo y se debe escoger la potencia de la señal de transmisión para evitar el efecto no lineal en la fibra óptica.

3.3.3.3 Potencia Máxima de Canal. Las limitaciones de los niveles de potencia óptica máxima pueden deberse a los efectos no lineales de la fibra o a consideraciones relativas de la seguridad de los dispositivos láser. Si la máxima potencia de salida total (incluida la ASE) se fija al valor límite del láser, P_{laser} , la potencia nominal máxima de cada canal, P_{CHMAX} , está relacionada con el número de canales según la formula:

$$P_{\text{CHMAX}} = P_{\text{laser}} - 10\log(M) \quad (\text{ecuación 3.7})$$

Donde M es el número de canales en funcionamiento. Esta ecuación tiene una función ilustrativa ya que la potencia de salida puede ser diferente en cada canal, siempre que la potencia de salida sea inferior a la potencia del láser. Esta limitación es básica para sistemas con y sin OA's. En algunos casos las no linealidades de la fibra imponen límites más restrictivos sobre el nivel de potencia de salida que las consideraciones de seguridad de los dispositivos láser. Específicamente la Modulación de Auto-Fase (SPM), la Modulación de Fase Cruzada (XPM) y la dispersión de Brillouin Estimulada (SBS) limitan la potencia máxima de canal. Los límites que sobre la potencia óptica imponen SPM y SBS no dependen del número de canales presentes, y en el caso de SPM, solo se ven afectados los sistemas basados en las fibras descritas en las Recomendaciones G.652 y G.655 de la UIT-T. Sin embargo, la XPM solo afecta sistemas multi-canal y se hace mas relevante en sistemas de separación reducida entre canales. Las degradaciones producidas por la XPM son mas significativas en sistemas que emplean las fibras ópticas descritas en la recomendación G.652. La máxima potencia de salida permitida para cada canal debido a las limitaciones derivadas de la XPM y SPM varía en función del código de aplicación empleado y depende del número de tramos de fibra y de la longitud objetivo de los mismos. La FWM solo afecta sistemas multi-canal y no presenta una limitación practica en sistemas que emplean las fibras ópticas descritas en las recomendaciones G.652 y G.655. Tampoco la Dispersión Estimulada de Raman presenta una limitación práctica en las fibras ópticas descritas en la recomendación G.652 en sistemas multi-canal.

3.3.3.4 Gama para la Potencia de Canal. La potencia mínima de canal no depende del número de canales presentes mientras que la potencia máxima de canal si depende del número de canales presentes. Solo es posible obtener una potencia de canal relativamente

alta cuando existen pocos canales, produciéndose una reducción en el nivel de potencia cuando se añaden canales.

3.3.3.5 Potencia Total Máxima. La potencia total de salida requerida por los OA's puede estimarse mediante la ecuación:

$$P_{\text{tot}} = \sum P_{\text{out}} + NBW_{\text{eff}} \cdot h\nu \cdot 10^{((NF+L)/10)} \quad (\text{ecuación 3.8})$$

Donde NF y L viene dados en dB y los demás términos en unidades lineales. El último término es la potencia ASE total acumulada y BW_{eff} es el ancho de banda ASE efectivo definido como la potencia ASE total dividida por la densidad de potencia ASE. Esta aproximación es suficiente siempre que la potencia total esté determinada por la potencia de la señal. Aunque el análisis matemático de la potencia provee una valiosa guía para el diseño de las etapas de amplificación, siempre es necesario simular computacionalmente la evolución de la OSNR en una cascada de OA's cuando se diseña un sistema DWDM práctico. Una consideración importante en el diseño de una red DWDM es la apropiada ubicación de los amplificadores ópticos intermedios. Para obtener ecualización de ganancia, los amplificadores necesitan ser ubicados estratégicamente a lo largo de la red en una forma tal que se garantice que todas las señales sean correctamente amplificadas, asignando la potencia de emisión adecuada a los dispositivos láser y realizando un ajuste automático de la ganancia por medio del uso de los Atenuadores Ópticos Variables (VOA's). También se puede contar con algoritmos de cálculo de potencia y dimensionamiento de la red, con el fin de minimizar el número total de OA's requeridos, disminuyendo los costos de inversión y facilitando la gestión del sistema. La localización del OA se basa en el cálculo de la potencia de señal en cada punto de la red. De esta forma se ubican amplificadores cuando el nivel de señal es menor que el umbral de sensibilidad de los receptores ópticos utilizados. La ganancia óptica del OA es estimada para asegurar que la potencia total de señal no produzca saturación. Debido a que el ancho de banda del EDFA es limitado, se ha propuesto usar longitudes de onda fuera de su ancho de banda, para enviar aquellos mensajes que no requieran amplificación. Esta propuesta crea nuevas restricciones en el diseño de los protocolos de enrutamiento de longitudes de onda. Sin embargo, en la ubicación de los OA's en la red se deben considerar las especificaciones de la

Recomendación G.692 de la UIT-T con respecto a los sistemas de referencia establecidos. Según esta Recomendación, en sistemas sin OA's las distancias objetivo son de 80 Km., 120 Km. y 160 Km. Sobre fibras ópticas descritas en las Recomendaciones G.652, G.653 y G.655. se establece un código de aplicación en el cual se especifican las longitudes del tramo de fibra, clasificadas en longitudes largas (L = 80 Km.), Muy Largas (V = 120 Km.) y ultra largas (U = 160 Km.), así como el número de canales DWDM y la velocidad binaria máxima (STM_4 ó STM_16). En sistemas con OA's, las separaciones objetivos entre ellos son de 80 Km. y 120 Km. y la distancia total a partir de la cual se necesita regeneración varía de 360 Km. a 640 Km. Sobre fibras descritas en las Recomendaciones G.652, G.653 y G.655 de la UIT-T. Cada pérdida por inserción del OXC se compensa por los amplificadores ópticos, y la pérdida debido al cross-talk coherente es suficientemente baja. Los OXCs se localizan en los nodos, que tienen más de 2 direcciones de conmutación en red con topología en malla o que conectan subconjuntos de anillos juntos. La función del OXC es flexibilizar la conmutación de las longitudes de onda entre diversas fibras de entrada-salida. Debido al funcionamiento imperfecto del OXC, se inducen la pérdida por inserción y el cross-talk. En la figura se muestra una estructura típica del OXC y de las contribuciones del cross-talk introducidas, la figura muestra que hay N fibras en el OXC, y cada fibra contiene M λ s, la línea continua representa la señal y las líneas punteadas representa el ruido del cross-talk.

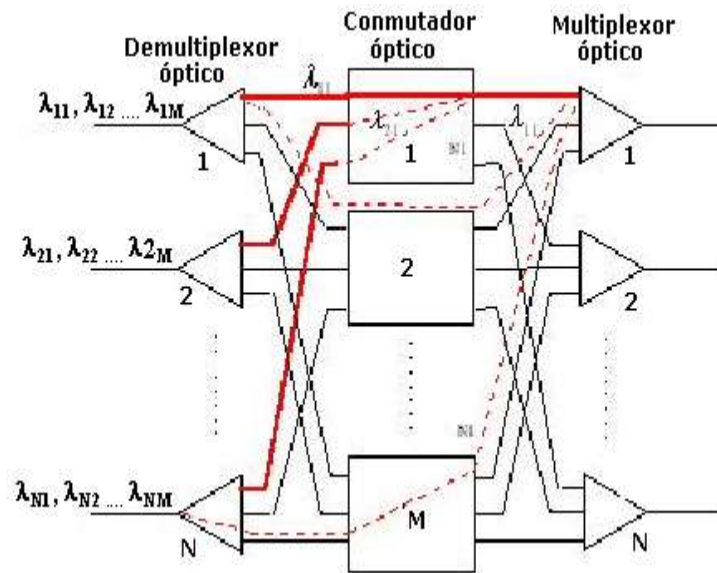


figura 3.3 OXC y de las contribuciones del cross-talk introducidas

Una medida conveniente del cross-talk, es la pérdida de potencia de la señal. Indica que tanta señal adicional se requiere para mantener una tasa de error de bit (BER) específico en presencia de pérdida particular. Se expresa en decibeles, y se define como:

Pérdida de potencia = $10 \text{ Log } [P_i/P_o]$, donde:

P_i es la Potencia requerida a la entrada de la señal

P_o es la potencia requerida a la señal de salida

3.3.4 Monitoreo de Desempeño y localización de Fallas en el EDFA. Con el fin de mantener la calidad en un sistema DWDM amplificado ópticamente, es esencial efectuar el control de los parámetros del sistema, localizar y aislar fallas rápidamente. Para lograr esto el sistema debe ser monitoreado continuamente y la información recogida debe ser transmitida en forma oportuna a los puntos terminales. En un sistema regenerado tradicional un canal de telemetría utiliza bits de encabezamiento en un canal simple para transmitir los datos de mantenimiento y localización de fallas al extremo terminal y proveer comunicación a sitios repetidores remotos. En un sistema amplificado ópticamente, no hay acceso a bits de encabezamiento, en reemplazo otros métodos han sido desarrollados para transportar información de telemetría. El uso de un canal óptico separado especial para telemetría ha sido ampliamente adoptado en sistemas prácticos con OA's. El canal óptico

de supervisión (OSC) consiste en una λ adicional dedicada exclusivamente al transporte de información de gestión entre los diferentes nodos de la red. Esta información esta compuesta por el canal de datos, hilo de ordenes de ingeniería, canal de servicio, servicio de mantenimiento y comandos. El canal OSC viaja lo largo de la fibra simultáneamente con las señales DWDM. Normalmente es operado a 1510 nm o a una de las otras longitudes de onda recomendadas por la UIT-T, con capacidad de 1.5 Mbps, una velocidad de datos baja para tecnología óptica. La señal de telemetría es insertada y extraída en cada sitio de un amplificador repetidor para ofrecer las funciones de recolección, procesamiento, e información de mantenimiento y gestión. Se han desarrollado OA's que contiene filtros ópticos para la extracción e inserción del canal OSC. El OA permite el acceso entre etapas para insertar funciones ópticas adicionales en la línea (como la compensación de la dispersión cromática) sin afectar el margen de potencia entre OA's. En las etapas de amplificación basadas en EDFA's, el OSC puede ubicarse fuera del ancho de banda de ganancia utilizable por el EDFA (OSC fuera de banda) o dentro del ancho de banda de ganancia utilizable por el EDFA (OSC dentro de banda). Actualmente los componentes ópticos que operan en la longitud de onda 1.510 nm son de disponibilidad limitada. Hasta que dichos componentes alcancen su madurez y este ampliamente disponibles, pueden utilizarse las longitudes de onda alternativas de 1.480 nm o 1.310 nm para el OSC. La selección de la banda de 1.310 nm puede impedir la utilización de dicho ancho de banda para trafico alternativo. Dos OA's que funcionen con un OSC de diferentes λ s no son compatibles, por lo cual se deben usar equipos de adaptación de longitud de onda. Aunque los recientes desarrollos en la tecnología de la OA's han resuelto muchos de los problemas de pérdida de potencia y de generación de ruido de redes ópticas, los diseñadores de red no se deben basar solamente en uso de los OA's para resolver los problemas, sino que también deben considerar otras opciones, por ejemplo, para minimizar las pérdidas de inserción introducidas por los divisores y acopladores ópticos en las interconexiones de red, debe ser importante considerar el uso de dispositivos de enrutamiento de λ , tales como el conmutador de Enrutamiento de Longitud de Onda (WRS) o el Enrutador de Rejilla de Guía de Onda, tales como el conmutador de compuerta amplificadora o el Acoplador de Estrella Pasivo.

3.3.5 Diafonía

La diafonía es otro aspecto importante que requiere ser tratado en el diseño de redes ópticas. Puede ser causado tanto por interferencia de las señales en diferentes longitudes de onda (diafonía Inter-banda), o por interferencia de señales en la misma longitud de onda en diferentes fibras (diafonía intra-banda). La diafonía Inter-banda debe ser considerada cuando se determina el espaciamiento entre los canales DWDM.

En algunos casos la diafonía Inter-banda puede ser removida a través del uso de filtros apropiados de banda estrecha. La diafonía intra-banda normalmente ocurre en nodos de conmutación en los que múltiples señales en la misma longitud de onda están siendo conmutadas desde diferentes entradas hacia diferentes salidas. Este tipo de diafonía es más preocupante que la diafonía de Inter-banda debido a que la diafonía de intra-banda no puede ser fácilmente removida por medio de filtros y se puede acumular sobre un número determinado de nodos. El grado de diafonía intra-banda depende en parte de las características del conmutador en los nodos de la arquitectura y una estrategia para reducirla consiste en introducir filtros selectivos de longitud de onda adicionales en los nodos.

3.3.6 Dispersión

La dispersión en sistemas de comunicación ópticas origina que un pulso se ensanche a medida que se propaga a lo largo de la fibra. El ensanchamiento de los pulsos limita el espaciamiento entre los bits, limitando la máxima velocidad de transmisión para una distancia dada de propagación. También limita la distancia máxima de fibra para una velocidad de bit dada. En ausencia de técnicas de compensación, la distancia que una señal óptica puede recorrer en una fibra está limitada por la dispersión lineal. La dispersión incluye efectos de dispersión cromática y Dispersión de Modo de Polarización (PMD). En sistemas DWDM que soportan tráfico STM-16 y que presentan valores de dispersión superiores a 10.000 ps/nm, se requieren técnicas de compensación.

3.3.7 Desviación de la frecuencia central

Se define como la diferencia entre la frecuencia central nominal y la frecuencia central real. En la desviación de frecuencia central se consideran todos los procesos que afectan al valor instantáneo de la frecuencia central de la fuente en un intervalo de medida apropiado a la velocidad binaria de canal. Estos procesos incluyen la velocidad de la fuente, el ancho de banda de la información, el ensanchamiento debido a la Modulación de Auto-Fase (SPM) y efectos debidos a la temperatura y al envejecimiento de los componentes ópticos.

3.3.8 Sensibilidad del receptor

Se define como el valor mínimo de la potencia recibida en la entrada de los receptores para lograr una BER de 10^{-12} . Tiene en cuenta la disminución de potencia causadas por la utilización del transmisor en condiciones de funcionamiento normalizado con los valores del caso mas desfavorable de la relación de extinción, de los tiempos de establecimiento y caída del impulso óptico, de las pérdidas de retorno ópticas en los canales DWDM, de las degradaciones en el conector del receptor, la diafonía, el ruido del amplificador óptico y la tolerancia de las medidas. La sensibilidad del receptor no incluye la disminución de potencia asociada con la dispersión, la fluctuación de fase o las reflexiones del trayecto óptico; estos efectos se especifican por separado en la asignación de la máxima atenuación del trayecto óptico. Los efectos debidos al envejecimiento no se especifican por separado ya que normalmente estos se perciben en función de la relación existente entre el momento de inicio de la vida del equipo, su temperatura nominal de trabajo y el final de su vida útil, siendo deseable que en el caso mas desfavorable su impacto esté comprendido entre 2 y 4 dB.

3.3.9 Plan de longitudes de onda

En el diseño de un sistema DWDM , se deben definir las longitudes de onda de operación de los canales a multiplexar, la frecuencia central (la cual usualmente es 193.1 Thz) y la separación entre canales (25 Ghz, 50 Ghz, 100 Ghz, 200 Ghz, etc.). Esta separación puede ser regular e irregular. La separación irregular entre canales puede usarse para mitigar los

efectos de la Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) en el tipo de fibras descritas en la Recomendación G.653 de la UIT-T.

Para realizar la selección de la separación mínima de canales y de la frecuencia de referencia de la rejilla del plan de λ_s , el diseñador dispone del estudio de la asignación de frecuencias con separación de 100 Ghz y de 50 Ghz, así como de la información relacionada con la elección de la Referencia Absoluta de Frecuencia (AFR), detallado en la Recomendación G.692. El valor de 193.1 Thz es el mas común. Se ha elegido una separación mínima de canales de 100 Ghz y posteriormente de 50 Ghz, con base en las siguientes consideraciones:

- Se ha acordado que la separación entre canales sea múltiplo de 25 Ghz.
- Se ha determinado que una separación de 100 Ghz y posteriormente de 50 Ghz, proporciona la flexibilidad necesaria para satisfacer varios requisitos de aplicación de la Recomendación G. 692.
- Se han discutido las limitaciones tecnológicas (tolerancia de filtros y de fuentes) para determinar una separación mínima de canales.

La relación absoluta de frecuencia (AFR) puede utilizarse en las siguientes aplicaciones:

- Para calibrar equipos de prueba DWDM
- Para proporcionar una frecuencia de referencia en la fabricación y calibración de dispositivos DWDM.
- Para proporcionar directamente una frecuencia de referencia a sistemas multicanal
- Para controlar y/o mantener frecuencias de fuentes ópticas.

3.4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE DWDM BIDIRECCIONAL

DWDM bidireccional consiste en la transmisión de todos los canales ópticos de una fibra simultáneamente en ambas direcciones, mediante la discriminación correspondiente de las λ_s de operación de los dos rayos ópticos compuestos que viajan en direcciones opuestas sobre la misma fibra óptica, por medio de la asignación del plan de longitudes de onda. En

general, DWDM bidireccional puede reducir el número de fibras y de amplificadores de línea que se necesitan en comparación con los sistemas que utilizan DWDM unidireccional. Un beneficio adicional de DWDM bidireccional es la posible mejora en la calidad en relación con la FWM, en particular cuando se implementa sobre el tipo de fibra óptica descrita en la Recomendación G.653. El diseño de una red basada en DWDM bidireccional debe tener en cuenta varios aspectos fundamentales de los sistemas. Debe tomarse precauciones sobre las reflexiones ópticas a fin de evitar la interferencia por Trayectos Múltiples (MPI). Algunas consideraciones adicionales en DWDM bidireccional se relacionan con los tipos y valores de diafonía, los valores e interdependencia de los niveles de potencia para ambos sentidos de transmisión y la transmisión del OSC. Además, la especificación completa de DWDM bidireccional requiere que se definan nuevos códigos de aplicación, así como la modificación de algunos de los existentes y la incorporación de nuevas definiciones de parámetros.

3.5 PARÁMETROS DE DISEÑO RELACIONADOS CON LA TOPOLOGÍA DE LA RED

Entre las topologías de caminos ópticos se tienen las siguientes:

- Anillo con enlaces DWDM punto a punto: Es un anillo en el que los enlaces de fibra DWDM entre nodos son punto a punto, la topología física y de caminos ópticos coinciden, salvo que entre nodos adyacentes pueda haber múltiples caminos ópticos.
- Operación con Hub: Todos los enrutadores se conectan a uno central a través de uno o más caminos ópticos. Todos los paquetes atraviesan al menos dos caminos ópticos; uno del enrutador fuente al hub, y otro del hub al enrutador destino.
- Diseño totalmente óptico: Se establecen caminos ópticos directos entre cada pareja de enrutadores o equipos terminales. Los paquetes solo atraviesan un único camino óptico desde el enrutador fuente al enrutador destino.

Algunos de los parámetros importantes de la red relacionados con la topología son:

- El número de nodos (N), un nodo ya sea una fuente de tráfico (canal óptico) o un nodo de tránsito.

- El grado del nodo (D), definido como el promedio de nodos conectados directamente (sin ningún tránsito) a un nodo a través de una o mas fibras.
- La longitud del enlace (LF) normalizado por el espaciamiento del nodo.
- El número de fibras por enlace (F)
- La forma de la red
- La densidad de la red.

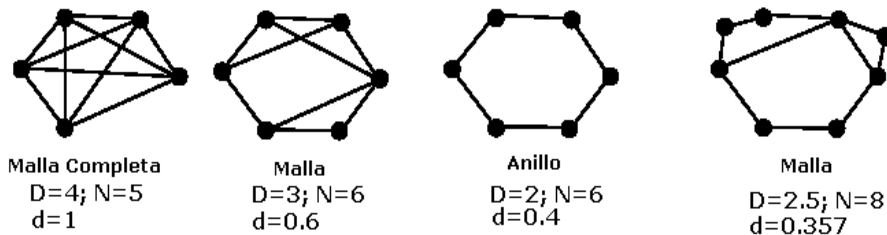
De estos parámetros, se ha estimado que el número de longitudes de onda requeridas para encontrar la capacidad de tráfico, se puede expresar como:

$$W = \frac{N^{3/2} \cdot T}{2FDL_f (1 - 2/\sqrt{\pi N})} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Siendo T, el número de canales por conexión. La densidad de la red d, esta definida por la formula:

$$d = \frac{D}{N - 1} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Este parámetro refleja la profundidad de la malla en la red. Dado un número fijo de nodos en la red, se obtienen los valores extremos con una malla completa (d=1) y anillo (d=2/(N-1)). La figura ilustra varias situaciones para topologías de red con una densidad de enlace dada.



3.5.1 Identificación de la limitación de los parámetros físicos de la red.

La limitación de los parámetros físicos de la red incluye las limitaciones de los componentes y subsistemas ópticos reales existentes, la obtención de la funcionalidad total esperada y su impacto en la red óptica. Estas limitaciones se pueden agrupar en dos conjuntos teniendo en cuenta su origen: las limitaciones intrínsecas y las limitaciones de

inmadurez tecnológica. El primer conjunto incluye las limitaciones impuestas por la naturaleza óptica de la tecnología utilizada, lo cual a pesar del grado de perfección de los componentes o sistemas usados no se pueden eliminar. El segundo conjunto agrupa principalmente las limitaciones debido a la inmadurez tecnológica, la cual resulta en un comportamiento no ideal de los componentes; estas limitaciones se espera que sean altamente reducidas con el mejoramiento de los aspectos tecnológicos. Entre los diversos mecanismos que originan limitaciones tenemos:

- **Cross-talk:** El cross-talk en sistemas DWDM se genera debido a las imperfecciones de los filtros y demultiplexores y debido a los efectos no lineales de la fibra. Ambos se pueden mantener suficientemente pequeños para un diseño apropiado del sistema, así que no se esperan problemas significantes. Existen dos tipos de cross-talk inducido: cross-talk no lineal que es debido a los efectos no lineales de la fibra, el efecto FWM, que es el mecanismo no lineal mas relevante en las redes consideradas. La FWM genera el cross-talk dependiendo de la potencia óptica, del espaciamiento de las longitudes de onda de los canales ópticos, valores de dispersión de la fibra y distancia de la transmisión, es una limitación en el número de canales para HD-WDM, cuando llega a ser mayor para canales mas apretadamente separados y para valores menores de dispersión.

El cross-talk no lineal debido a la imperfección de los componentes tales como filtros y conmutadores, pueden limitar la conexión en cascada. Hay dos tipos de cross-talk lineal: cross-talk interbanda y cross-talk intrabanda. El cross-talk interbanda es inducido por la longitud de onda de otro canal óptico debido a las imperfecciones del proceso de filtración. El cross-talk intrabanda es debido a la presencia de niveles residuales de potencia óptica en otras longitudes de onda del conjunto utilizado, la cual se añadirá a la señal en esas longitudes de onda. Así que este tipo de cross-talk es consecuencia de la conmutación. El cross-talk inducido por este proceso no se puede remover después, cuando tiene la misma longitud de onda del canal óptico al cual fue añadido, por lo tanto esto constituye una limitación de la conexión en cascada de nodos con funcionalidad de cross-conexión-conmutación.

- **Degradación del BER:** Los mecanismos físicos que producen ensanchamiento del pulso con la distancia recorrida conduce a la degradación del BER y limita el ancho de banda y rango del sistema.
- **Dispersión:** La primera causa del ensanchamiento del pulso y el consecuente inconveniente del BER es el coeficiente de dispersión de la fibra cromática. Esto es debido a que la velocidad de propagación depende de la longitud de onda. Para la fibra monomodo, en la tercera ventana aun para la fuente óptica con ancho de línea mas angosta, este efecto llega a ser importante.
- **Dispersión del modo de polarización (PMD):** La dispersión del modo de polarización resulta del hecho que debido a la geometría no perfecta de la fibra y el mecanismo de tensión inducido, la fibra presenta birrefringencia y por lo tanto los dos estados de polarización tienen velocidades ligeramente diferentes. Esta birrefringencia varia aleatoriamente a través de la fibra. Las fibras especiales como DCF (Fibra de compensación de dispersión) y EDF (Fibras dopadas con erbio), presentan valores mayores de PMD que las fibras monomodo. Así que para enlaces largos utilizando DCF y EDFAs, el PMD total puede resultar en una significativa degradación del BER.
- **Auto modulación de fase (SPM):** Este es un mecanismo no lineal, debido que la intensidad del campo de propagación óptico depende del índice de refracción de la fibra. La modulación de la intensidad resulta en la modulación del índice de refracción y por lo tanto la modulación de la fase (y la frecuencia) de la señal óptica. Esto causa ensanchamiento del ancho de la línea y por lo tanto la degradación del BER.

3.5.2 Parámetros de diseño relacionados con las limitaciones físicas

La calidad de la señal a través de la red dicta las reglas de ingeniería para la planeación de redes. En redes 100% ópticas, los datos transmitidos permanecen como señales ópticas a través de todo el trayecto en la capa óptica. Sin embargo, cada trayectoria no puede considerarse como un enlace DWDM punto a punto porque las señales sobre diferentes trayectos pueden viajar a través de un número diferente de dispositivos ópticos y también porque el número de longitudes de onda y características de la señal sobre la fibra pueden diferir con los enlaces. Las limitaciones físicas conducen a la degradación de la calidad de señal a través del cross-talk, la distorsión de la señal y acumulación de ruido. El diseño de

los OXC y la definición de la arquitectura de los nodos debe asegurar que los nodos proporcionen la calidad de señal necesaria a un nivel adecuado. Mientras la regeneración de la señal tenga que ser realizada por la capa eléctrica, se debe tener en cuenta una limitación en la longitud de la trayectoria óptica. El número limitado de longitudes de onda por fibra, es debido a los problemas de cross-talk y el ancho de banda limitado de los amplificadores. El problema se puede suavizar con la reutilización de longitudes de onda, lo cual complica el problema de asignación y enrutamiento de longitud de onda. En resumen se deben considerar los siguientes parámetros, los cuales están estrechamente relacionados con la calidad de la señal:

- La longitud promedio y máxima en un enlace en la red.
- El máximo número de nodos ópticos que se pueden atravesar sin regeneración
- La longitud máxima de trayectoria óptica permitida sin ninguna regeneración.
- El número de conversiones de longitudes de onda a través de la trayectoria.
- El número de longitudes de onda, canales ópticos, por fibra que estén siendo utilizados.
- La degradación del BER y ancho de banda del sistema.

Integridad individual del canal óptico (Nivel de potencia, estabilidad de la longitud de onda, etc)

3.5.3 Limitaciones debido a la conexión en cascada de elementos de red

- **Amplificadores ópticos (AO):** El amplificador óptico dispone de una potencia limitada que reparte entre cada uno de los canales, esto hace que cuando se agrega un canal, se modifican (disminuyen) las potencias de los otros canales, la solución a este comportamiento esta en modificar la potencia de bombeo del amplificador aumentando la potencia total de salida, otra forma de hacerlo es agregando atenuaciones individuales para cada λ . La Ganancia del amplificador por longitud de onda, no es constante. Esto hace que los canales de salida presentan niveles de potencia diferentes, este fenómeno se agrava todavía mas cuando se colocan amplificadores ópticos en cascada. Esto se soluciona mediante el uso de filtros ópticos ecualizadores o también ecualizando las señales con atenuadores individuales. si el amplificador óptico no controla su ganancia en forma automática considerando los canales presentes y/o no tiene una ganancia plana

para todas las longitud de onda, el agregado de canales o la intercalación de amplificadores, modifica las características de potencia en todos los otros canales presentes. De esta manera, un amplificador óptico simple soluciona el problema de la potencia, pero mantiene la dependencia óptica entre canales, es decir que la modificación de los parámetros en una λ , repercute en los otros canales. La limitación de la conexión en cascada de amplificadores ópticos es debido al ruido generado por el amplificador óptico. Este ruido se acumula con el número de AO's transversales y por lo tanto limita la conexión en cascada de los AO's. La limitación de la conexión en cascada debido a la ganancia no uniforme de los AO's, causa diferentes amplificaciones de la potencia de los canales ópticos individuales. En caso de cambio en el número de canales, el paso de la potencia transiente a través del AO puede causar degradación.

- **OXC's, Conmutadores ópticos:** La limitación de la conexión en cascada de los conmutadores ópticos es debido a la pérdida de potencia óptica, el cross-talk intrabanda y la reducción del ancho de banda a causa de la filtración.
- **Multiplexores ópticos:** La limitación de la conexión en cascada de los multiplexores ópticos es debido a la pérdida de potencia óptica y la reducción del ancho de banda a causa de la filtración.

3.5.4 Parámetros de diseño relacionados con la arquitectura de la red

Una red de capa simple se puede estructurar de dos maneras diferentes: plana o jerárquica. Una red plana no impone ninguna limitación sobre el enrutamiento de la capacidad, mientras que la jerárquica si lo permite; en principio una comunicación entre dos pares de nodos jerárquicos a través de uno o mas nodos de una jerarquía mas alta. Muy a menudo el tráfico en redes de telecomunicaciones grandes, se asigna a niveles jerárquicos. Se diseñan redes de 2, 3 ó en casos especiales 4 niveles.

Las principales ventajas de la jerarquización del tráfico, son las reglas de enrutamiento y fácil manejo. Sin embargo algunas veces esto resulta en trayectorias mas largas para demandas individuales. En el futuro cercano, las redes 100% ópticas con dos niveles de jerarquía probablemente serán comunes para aplicaciones del núcleo de la red. Muchos proyectos europeos consideraron una red 100% óptica de dos niveles, los cuales incluyen

un nivel superior con configuración en malla basado en OXCs y un nivel inferior basado en anillos DWDM. Tanto una red plana o jerárquica pueden dividirse en varias subredes. Generalmente una subred se define por la conectividad de los nodos y por la independencia de su propio mecanismo de supervivencia (esta es la razón por la que a menudo se les llama subredes supervivientes). En una red jerárquica, las interconexiones de las subredes en el mismo nivel de red se permiten solamente por medio del próximo nivel de jerarquía mas alto. El número de subredes en el nivel de red no es limitado, y depende solo del tamaño de la red actual. Una subred puede ser alguna partición de la red, que consiste en algunos tipos de redes con topologías básicas, como anillo o pequeñas mallas. En redes ópticas son candidatas para subredes los anillos DWDM y las mallas ópticas.

□ **Número de nodos de tránsito (Hub) por subred**

A menos que la distribución de la capacidad necesite atravesar mas de una subred, cada subred debe tener al menos un nodo especial donde transite el tráfico saliente. Estos nodos (llamados nodos hub) tienen funcionalidades especiales para interactuar con estas subredes.

3.5.5 Parámetros de diseño relacionados con la capacidad de la red

La matriz (o matrices) de capacidad tiene un papel importante en el proceso de planeación porque puede afectar la selección de la arquitectura y las características de la capa óptica.

- **Distribución de la capacidad:** La distribución de la capacidad entre nodos ópticos es una característica importante de la red. Diferentes distribuciones pueden conducir al diseñador hacia diferentes arquitecturas de redes y le permiten usar diferentes metodologías y algoritmos en el proceso de planeación
- **Capacidad de canal (Granularidad):** La capacidad de canal define la correspondencia entre la matriz de capacidad o tráfico en la capa óptica y la matriz de longitudes de onda. La elección de la capacidad de la red, esta dictada por la tecnología. La mayoría de los sistemas multi-longitudes de onda que están recientemente disponibles utilizan granularidad STM-16. Sin embargo ya se han hecho anuncios de granularidad STM-64, permitiendo granularidad mezclada en la misma fibra.
- **Capacidad por enlace:** Las limitaciones físicas conducen a un limite en el número de canales ópticos por la fibra. La potencia transmitida por longitud de ondas, debe ser lo

suficientemente grande para proporcionar una aceptable relación señal a ruido en el receptor. Sin embargo no es posible incrementar la potencia de la señal ya que la ganancia del amplificador óptico se puede saturar y los efectos no lineales como FWM degradan el funcionamiento de la señal de transmisión. Así que hay un compromiso entre los amplificadores y el número de amplificadores en cascada (longitud del enlace.)

- **Preparación de la capacidad y consolidación:** Dependiendo de los servicios ofrecidos por la red, se pueden transportar varios tipos de tráfico en la capa óptica: voz, señal de video, datos, líneas arrendadas, etc. La tasa de bit asignada para cada tipo de señal puede ser diferente. El proceso de planeación incluye la preparación y consolidación de esas señales hacia la capa óptica. Se debe tener en cuenta diferentes alternativas de preparación principalmente basados en la distribución de la capacidad, sus requerimientos y el valor de la utilización de la capa óptica.

3.6 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS EN UNA INSTALACIÓN DWDM

En la instalación de una red basada en DWDM, hay algunas consideraciones que afectarán a la misma y son tales como el fabricante, el tipo de equipo, el diseño, etc. Algunas de estas cuestiones son las siguientes:

- ✓ Compatibilidad de la fibra existente con el sistema DWDM. Algunos tipos viejos de fibra no se pueden usar con DWDM, mientras los tipos nuevos, tales como NZ-DSF, se optimizan con DWDM. La fibra estándar SM (G.652), que se encuentra en la mayoría de instalaciones de fibra, puede soportar DWDM en el área metropolitana. Si se tiende nueva fibra, se debería elegir un tipo que permita su futuro crecimiento, particularmente si los sistemas DWDM se amplían en nuevas regiones de longitud de onda y con mayores velocidades.

- ✓ Estrategia de migración y aprovisionamiento. Debido a que DWDM es capaz de soportar un crecimiento masivo en ancho de banda sobre la marcha sin necesidad de actualizaciones, se considera que su inversión es a largo plazo. Las topologías punto a punto y en anillo pueden servir como base de futuros crecimientos de redes con topología en malla. La planificación permitiría adiciones flexibles de nodos, tales como OADMs, para cubrir los cambios de capacidad de los usuarios y su uso.
- ✓ Herramientas de red que se pueden usar. Se necesitará una buena herramienta de gestión de red para aprovisionamiento, control del rendimiento, identificación del fallo y su aislamiento, y su solución. Así una herramienta que se base en estándares (por ejemplo, SNMP) y que pueda interoperar con el sistema operativo existente.
- ✓ Estrategia a seguir en cuanto a protección y restauración. El diseño de una estrategia de protección es un proceso complejo que debe tener en cuenta muchas variables. Hay fallos de hardware (fallos de equipos, tales como láseres o fotodetectores y roturas de fibra) y de software tales como degradación de la señal (por ejemplo, un BER inaceptable). En cuanto al hardware, es necesario redundancia a nivel de dispositivo, componente o fibra. En cuanto al software, es necesario una monitorización y gestión inteligente de la longitud de onda. Las estrategias de protección y supervivencia dependen del tipo de servicio, sistema y arquitectura de red. En muchas redes, también depende del protocolo de transporte.

Dos consideraciones adicionales e importantes son el cálculo de la potencia óptica necesaria y la interoperabilidad.

3.6.1 Previsión de la potencia óptica

La previsión de potencia óptica, o la previsión de pérdidas del enlace, es una parte crítica en la planificación de una red óptica. Los fabricantes deben suministrar pautas, o reglas de ingeniería, a emplear para sus equipos. En general hay muchos factores que pueden causar pérdidas de señal óptica. El más obvio es la distancia de la propia fibra, es el factor más importante en el transporte a larga distancia. En las MAN, el número de nodos de acceso, tales como OADMs, es generalmente el factor que más contribuye a las pérdidas ópticas. La clave para un cálculo preciso de la previsión de la potencia óptica es conseguir una

lectura exacta de la fibra usando un Reflectómetro Óptico de Dominio en el Tiempo (OTDR). Usando un OTDR, se puede obtener la siguiente información de un vano:

- longitud de la fibra
- atenuación en dB del enlace, así como la atenuación de cada una de las secciones del vano
- características de atenuación de la propia fibra
- ubicación de los conectores, empalmes y fallos en el cable.

El objetivo del cálculo de la pérdida óptica es asegurar que la pérdida total no exceda el previsto para el vano de fibra. Los valores típicos de un vano de fibra son:

- Pérdida por conector. Es de 0,2 dB si los conectores son modernos monomodo del mismo fabricante. Si los fabricantes de los dos conectores (mitades de cada conexión) son diferentes, entonces la pérdida media es de 0,35 dB.

- Pérdida de fibra. Es de 0,25 dB/Km debido a la atenuación.

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

Asumiendo una previsión de 25 dBm, se tiene lo siguiente:

pérdida total del sistema = (longitud de la fibra * .25) + margen de la edad de la fibra + pérdidas por conectores / empalmes. Si la suma es menor que 25, entonces estamos dentro de la previsión del vano. Si no, se deben hacer cambios. Esto puede incluir la adición de un amplificador o reducir el número de elementos que introducen pérdidas en el vano. El acondicionamiento de la fibra, que incluye su reconectorización, limpieza del conector, etc. también puede ser necesario para reducir pérdidas. También es importante asegurar que el lado cliente o equipo tributario no se superpone con el láser receptor local del equipo DWDM. Esto significa que el cliente o equipo tributario debe operar dentro de las especificaciones de la interfaz cliente DWDM.

3.6.2 Interoperabilidad

Debido a que DWDM usa longitudes de onda específicas para la transmisión, las longitudes de onda usadas deben ser las mismas en cada extremo de la conexión. Con esta finalidad el ITU ha establecido una tabla con los valores de longitud recomendados con un espaciado

de 100 GHz. Sin embargo los fabricantes puede usar otro espaciado, por ejemplo 200 GHz, o más estrecho.

Además diferentes fabricantes que usan la misma tabla, puede que no usen el mismo esquema de numeración lambda. Así la λ_1 del equipo del fabricante A puede tener asignada una longitud de onda diferente de la λ_1 del equipo del fabricante B. Por lo tanto es importante estar al corriente de los potenciales problemas de interoperabilidad como consecuencia de ello. Otras cuestiones de interoperabilidad son los niveles de potencia, el aislamiento inter- e intra-canal, las tolerancias PMD y los tipos de fibra.

3.7 TOPOLOGÍAS Y PRINCIPIOS DE DISEÑO PARA REDES WDM

El nivel óptico debe ser capaz de soportar muchas tecnologías y, porque hay desarrollos impredecibles en esta área, estas topologías deben ser flexibles, actualmente las topologías que se instalan son punto a punto y en anillo. Con los enlaces punto a punto sobre DWDM entre grandes centros empresariales, hay necesidad de convertir el tráfico de aplicación a longitudes de onda específicas y su multiplexación. Dado que cada vez los crosconectores y conmutadores ópticos son más configurables, estas redes punto a punto y en anillo se interconectarán en mallas, transformando las redes ópticas en plataformas plenamente flexibles.

3.7.1 Topologías punto a punto. Las topologías se pueden implementar con o sin OADM. Estas redes se caracterizan por velocidades altas por canal (10 a 40 Gbps), alta integridad, fiabilidad de la señal, y restauración rápida del camino. En las redes de larga distancia, la distancia entre el transmisor y el receptor puede ser de varios centenares de kilómetros, y el número necesario de amplificadores entre extremos puede ser menor de 10. Con equipo de primera generación, la redundancia es a nivel de sistema. Los enlaces paralelos conectan sistemas redundantes en cada extremo. La conmutación en caso de fallo es de responsabilidad del equipo del cliente (conmutador o enrutador), mientras que los sistemas DWDM suministran capacidad por ellos mismos. Con equipo de segunda generación, la redundancia es a nivel de tarjeta. Los enlaces paralelos conectan sistemas individuales en el

extremo que contiene transpondedores, multiplexadores y CPUs redundantes. La protección ha migrado a los equipos DWDM, con decisiones de conmutación bajo control local.

3.7.2 Topologías en anillo. El anillo de fibra puede tener canales de hasta cuatro longitudes de onda, y típicamente menos nodos que canales. El rango de velocidades es desde 622 Mbps hasta 10 Gbps por canal. Las configuraciones en anillo se pueden instalar con uno o más sistemas WDM, soportando cualquier tipo de tráfico, o pueden tener un concentrador y unos o más nodos OADMs. En el nodo del concentrador el tráfico se origina, se termina y se controla, y a su vez da conectividad con otras redes establecidas. En los nodos OADMs, las longitudes de onda seleccionadas son removidas o añadidas, mientras que las demás pasan de forma transparente. De esta manera, las arquitecturas en anillo permiten que los nodos en anillo suministren acceso a elementos de red como enrutadores, conmutadores o servidores con añadir o remover canales de longitud de onda en el dominio óptico. Sin embargo incrementando el número de OADMs, la señal tiene más pérdidas y se puede necesitar amplificación. Las redes para aplicaciones WDM en entorno metropolitano están basadas en estructuras en anillo SONET con protección de fibra 1+1. Así los esquemas como UPSR (Unidirectional Path Switched Ring) o BLSR (Bidirectional Line Switched Ring) se pueden reutilizar en implementaciones WDM. En el esquema UPSR con dos fibras, el concentrador y los nodos envían a través de dos anillos, pero la misma fibra normalmente se usa para todo el equipo para recibir la señal; de aquí el nombre de unidireccional. Si el anillo de trabajo falla, el equipo receptor conmuta al otro par. Aunque esto suministra redundancia completa del camino, no hay posibilidad de reutilizar el ancho de banda, ya que la fibra redundante siempre debe estar preparada para transportar el tráfico de trabajo. Comúnmente este esquema es el más utilizado en las redes de acceso. El esquema BLSR permiten al tráfico viajar del nodo transmisor al nodo receptor por la ruta más directa. Debido a esto, el BLSR es preferible en el corazón de las redes SONET, especialmente con implementaciones de cuatro fibras, que ofrecen redundancia completa.

3.7.3 Topología en malla. Este desarrollo se podrá hacer mediante la introducción de crosconectores y conmutadores ópticos configurables que en algunos casos sustituirán y en

otros complementarán los dispositivos fijos WDM. En enlaces punto a punto, equipados los nodos iniciales con OADM para tener flexibilidad, y a continuación interconectándolos, la red puede evolucionar en una malla sin un rediseño completo. Adicionalmente las topologías en malla y en anillo se pueden unir con enlaces punto a punto. Las redes en malla DWDM, que constan de nodos ópticos interconectados, requieren esquemas de protección que se basan en la redundancia del nivel de sistema, tarjeta o fibra, ahora la redundancia migrará a nivel de longitud de onda. Esto significa que un canal de datos puede cambiar las longitudes de onda y lo hace a través de la red, mediante el enrutamiento o la conmutación de la longitud de onda como consecuencia de un fallo. En las redes ópticas, este concepto se llama camino de luz. Por lo tanto las redes en malla requieren un alto grado de inteligencia para realizar funciones de protección y gestión del ancho de banda, incluidos la conmutación de la fibra y la longitud de onda. El uso de la fibra, que puede ser bajo en soluciones en anillo debido al requerimiento de protección de las fibras en cada anillo, se puede mejorar con un diseño en malla. La protección y la restauración se pueden basar en caminos compartidos, de este modo se requieren pares de fibras para la misma cantidad de tráfico y no se dispone de longitudes de onda sin utilizar.

3.7.4 Principios de diseño de Redes Locales DWDM (DWDM LAN)

Una red local DWDM se puede construir conectando nodos de red a través de fibras con transmisión full-duplex a una estrella pasiva. Un nodo envía su transmisión a la estrella por una longitud disponible utilizando un láser, el cual produce una corriente óptica de datos. Las corrientes de información de los distintos usuarios se combinan ópticamente en la estrella y la potencia de señal de cada corriente se divide a partes iguales y se envía a todos los nodos por sus fibras de recepción. Los nodos receptores utilizando un filtro óptico estarán sintonizados únicamente a una longitud de onda y por tanto podrá recibir la información. Cuando una fuente transmite en una longitud de onda particular, más de un receptor podrá estar sintonizado a esa longitud de onda, y todos esos usuarios podrán recibir la corriente de datos, por tanto se puede decir que la estrella pasiva soporta servicios multicast.

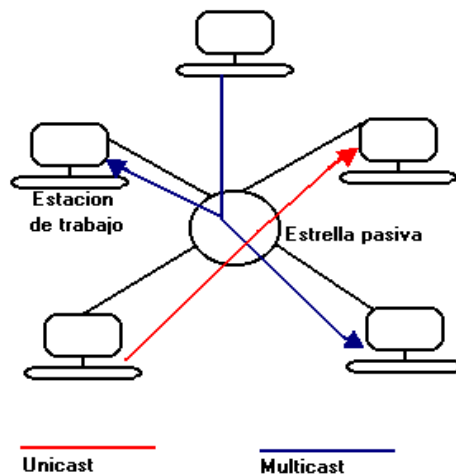


Figura 3.4 LAN DWDM

3.7.5 Principios de diseño de Redes ópticas conmutadas por longitud de onda (WAN DWDM)

Este tipo de red consta de un conjunto de conmutadores fotónicos (conmutadores activos) conectados por enlaces de fibra en una topología física arbitraria. Cada usuario final se conecta a un conmutador activo mediante un enlace de fibra. La combinación de un usuario final y su correspondiente conmutador se conoce como un nodo de red. Cada nodo (y su estación de acceso) está equipado con un conjunto de transmisores y receptores, ambos sintonizables en longitud de onda. El mecanismo base de comunicación se llama camino óptico, que es un canal de comunicación completamente óptico entre dos nodos en la red, y puede ocupar más de un enlace de fibra. Los nodos intermedios en el camino de fibra enrutan el camino óptico en el dominio óptico utilizando sus conmutadores activos. Los nodos finales del camino óptico acceden al camino óptico con transmisores y receptores que se sintonizan a la longitud de onda a la que opera el camino óptico. En ausencia de algún dispositivo de conversión de longitud de onda, es necesario que el camino óptico tenga la misma longitud de onda a través de todo su recorrido; esto se conoce como continuidad de longitud de onda. Esto no es necesario si hay conversores de longitud de onda en los nodos intermedios de red (en la figura, comunicación entre nodos D y E).

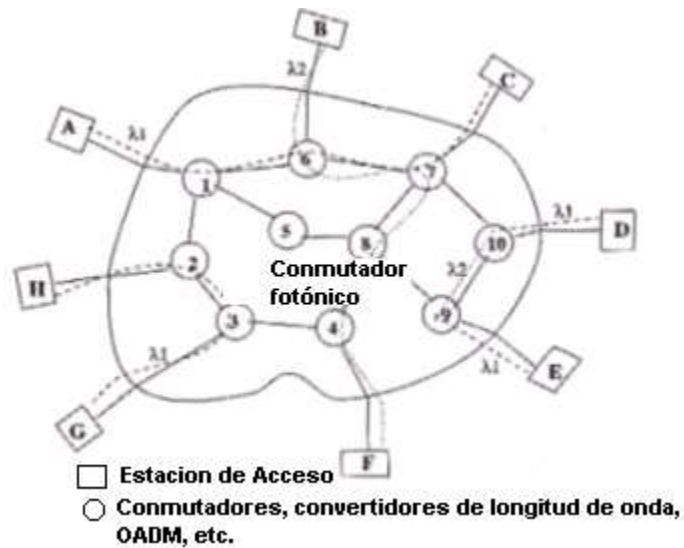


Figura 3.5 Red WAN

La arquitectura de red común utiliza multiplexores de longitud de onda y conmutadores ópticos en los nodos de enrutamiento, con el fin de que una topología virtual arbitraria pueda ser implementada en una red de fibra óptica existente. El problema de diseño de la topología virtual es un problema de optimización, cuya solución debe permitir la selección de la topología virtual más adecuada, sujeta a las características de los transceptores y a las posibles restricciones impuestas por el número de longitudes de onda disponibles. El problema de optimización tiene dos posibles funciones objetivo: para una matriz de tráfico dada, minimizar el retardo por paquetes promedio a lo ancho de la red, lo que corresponde a una solución para las demandas actuales de tráfico o maximizar el factor de escalamiento por el cual puede ser expandida la capacidad de la matriz de tráfico, con el fin de satisfacer las demandas futuras. Debido a la complejidad de la solución de estos problemas de optimización, se recurre a métodos heurísticos, los cuales se basan en el uso de simplificaciones de las consideraciones globales de diseño de la red. Se requiere profundizar en el análisis de las consideraciones de diseño que faciliten el desarrollo de redes ópticas de escala nacional, las cuales deben ser capaces de maximizar la utilización del ancho de banda total disponible en la fibra, así como explotar otras aplicaciones potenciales de la óptica. Estas redes también deben permitir mecanismos por medio de los cuales los usuarios finales que operan con componentes opto-electrónicos más lentos, la mayoría operando en el rango de los Gbps, puedan interactuar con la red. Mediante los

multiplexores de longitud de onda se provee la ventaja de capacidades superiores agregadas al sistema debidas a la reutilización espacial de las longitudes de onda, lo que da respaldo a un gran número de usuarios, a partir de un número limitado de longitudes de onda.

La conmutación óptica en un nodo puede ser lograda mediante el uso de un conmutador de enrutamiento de longitud de onda, el cual transfiere una señal óptica desde una fibra de entrada a una fibra de salida sin efectuar ningún procesamiento electrónico. Un requerimiento fundamental en una red óptica de enrutamiento en longitud de onda es que 2 ó más caminos ópticos que atraviesen la misma fibra deben operar en diferentes canales de longitud de onda para que no interfieran entre si. Esta arquitectura corresponde a una combinación de los métodos de salto simple y salto múltiple. Un camino óptico en esta arquitectura provee comunicación de salto simple, al emplear un número limitado de longitudes de onda, puede no ser posible acomodar los caminos ópticos entre todos los pares de usuarios. En este caso, se necesita el establecimiento de saltos múltiples entre los caminos ópticos. Además, al producirse cambios en el modelo de tráfico predominante, puede requerirse un conjunto diferente de caminos ópticos para que formen una nueva tecnología virtual de salto múltiple.

Otro concepto en el diseño de redes WAN DWDM es la reutilización de las longitudes de onda. Dado que cada longitud de onda puede ser utilizada en cualquier enlace de fibra en la red, múltiples caminos ópticos los cuales no comparten ningún enlace pueden usar la misma λ . Los aspectos relacionados con la configuración y el establecimiento de los caminos ópticos sobre las fibras y los nodos correspondientes en redes WAN DWDM conforman un problema de optimización en el cual el funcionamiento global de la red debe ser balanceado con respecto al consumo de los recursos de la red, tales como las longitudes de onda disponibles y los componentes opto-electrónicos instalados. El grado de libertad en el diseño de los caminos ópticos depende del tipo de elementos de conmutación o transconectores usados en los nodos de acceso o en los nodos de conmutación. Si se emplean dispositivos insensibles a la λ , como conmutadores ATM o enrutadores IP, entonces cada señal en una fibra óptica de entrada debe ser enrutada a la misma fibra óptica de salida. Los dispositivos de conmutación sensibles en longitud de onda ofrecen mas

flexibilidad, permitiendo que diferentes longitudes de onda en una fibra simple de entrada sean dirigidas independientemente a diferentes fibras de salida. Sin embargo, este método puede generar conflictos en los nodos si dos señales en la misma longitud de onda que llegan en diferentes puertos de entrada necesitan ser conmutados al mismo puerto de salida. Este conflicto puede ser resuelto incorporando conversores de longitud de onda en cada nodo. Otro método para resolver conflictos de contención consiste en encontrar una ruta alternativa en la red para uno de los dos caminos en conflicto y en algunos casos una longitud de onda alternativa. Los transconectores ópticos corrientes pueden ser capaces de conmutar información óptica basada en los puertos de entrada mediante la discriminación de las longitudes de onda, pero no pueden conmutar ópticamente datos multiplexados mediante división en el tiempo en un flujo de información. Además el tiempo requerido para reconfigurar un conmutador óptico es mayor que la velocidad de los datos que pasan a través de él.

3.7.6 Principios de diseño de Redes MAN DWDM

Los factores claves que determinan la factibilidad del despliegue de la técnica DWDM a través de una red de área metropolitana (MAN), incluyen:

- Bajos costos de nivel de sistema. En aplicaciones metropolitanas los proveedores de servicio deben ofrecer un conjunto amplio de formatos de datos y velocidad de bit a bajos costos.
- Bajo consumo de potencia en los componentes ópticos
- Habilidad de realizar el mapeo inmediato de diversos servicios a través del ambiente DWDM.
- Capacidades de configuración en tiempo real para aprovisionamiento rápido de servicio, lo cual requiere que la red se flexible.

El alcance exitoso de estos objetivos debe comenzar en el nivel de componentes ópticos y de semiconductores que forman el centro de la conectividad DWDM. Sin embargo, tanto operadores como proveedores tienen muchos obstáculos que superar antes de desplegar

ampliamente soluciones MAN DWDM. La mayoría de despliegues DWDM han utilizado enlaces de largo alcance empleando arquitecturas punto a punto, dependiendo de la infraestructura instalada previamente por el operador para asegurar protección (basada convencionalmente en esquemas SONET/SDH). En un ambiente metropolitano, con datos centralizados, deben ser combinados componentes ópticos menos costosos con un adecuado esquema de protección que pueda ofrecer verdadera protección óptica, mediante la migración del estándar SONET y su encabezamiento asociado con el fin de consolidar la capa óptica. Desde el punto de vista del operador, esto incluye todo lo concerniente a la gestión de un gran número de longitudes de onda en el área metropolitana. Asociado esto con la alta densidad de usuarios los cuales modifican rápidamente los requerimientos de datos, el operador metropolitano tiene un desafío mucho mayor que el de largo alcance. La mayoría de los operadores deben iniciar la migración hacia las redes 100% ópticas a partir de las redes existentes. Así, los usuarios centrales de tráfico de paquetes deben continuar transportando sus datos sobre operadores basados en TDM, lo que resulta en altos costos y menos opciones de aprovisionamiento de flexibilidad.

Debido a los modelos de tráfico y a las distancias entre empresas, se requieren anillos y transconectores ópticos. Las redes Inter-oficina no solo necesitan distribuir tráfico a través de una región, si no que también requieren conectarse a la red de largo alcance. Los servicios en el entorno MAN DWDM constituyen un área de actividad intensa donde los aspectos de tráfico entre oficinas y negocios con inserción-extracción de longitud de onda juegan un papel importante, mediante la construcción de anillos ópticos DWDM interconectados a través de transconectores digitales.

3.7.6.1 Tecnologías en las redes MAN DWDM

Hay numerosas tecnologías para el transporte y encapsulación de datos en las MAN. Una característica de estas redes es que están llamadas a soportar muchos tipos de tráfico y velocidades. Sin embargo y sobretodo hay una tendencia al uso de un nivel óptico común para el transporte digital de datos.

SONET/SDH ha sido la base de las MAN en la última década, y es utilizado como el nivel fundamental de transporte tanto para la red de conmutación de circuitos basada en TDM como de las redes de datos. Las inherentes ineficiencias en la adaptación de los servicios de datos a la jerarquía optimizada de voz y a la inflexible jerarquía de multiplexación, hacen de SONET una tecnología problemática. De forma más importante, las limitaciones en cuanto al escalado de la capacidad – OC-768 puede ser el límite práctico de SONET/SDH – y la insensibilidad al tráfico IP por ráfagas en una tecnología basada en TDM tiene un pobre futuro.

ATM. Muchos proveedores de servicios están a favor de ATM porque puede encapsular diferentes protocolos y tipos de tráfico en un formato común para la transmisión sobre una infraestructura SONET. Mientras tanto la red mundial de datos, que está orientada predominantemente a IP, se inclina a favor de paquetes sobre SONET (POS), que obvia el nivel intermedio del costoso ATM. Avances en IP, combinados con el aumento de capacidad de los enrutadores gigabit y multigigabit, hacen posible prever una red basada en IP que sirve perfectamente para transportar principalmente datos pero también voz. Sin embargo ATM permanece fuerte en las MAN. Puede acomodar interfaces de alta velocidad y suministrar la gestión de servicios de circuitos virtuales mientras ofrece capacidades de gestión de tráfico. Así los dispositivos finales ATM se usan comúnmente para terminar el tráfico, incluyendo VoIP, DSL y Frame Relay.

Gigabit Ethernet. Gigabit Ethernet (GE) es una tecnología que permite la migración desde Ethernet y la integración con la misma. Es relativamente cara comparada con otras tecnologías que ofrecen la misma velocidad de transmisión, pero no soporta calidad de servicio ni tolerancia a fallos. Cuando confinada a topologías punto a punto, las colisiones y el CSMA no son importante, se consigue un uso mejor en cuanto a la utilización del ancho de banda. Debido a que el nivel físico óptico puede soportar distancias más largas que el cable tradicional categoría 5, Gigabit Ethernet sobre fibra (1000BASE-LX) se puede emplear con DWDM.

Los últimos avances en la tecnología Ethernet, 10 Gigabit Ethernet, se dirigen a la necesidad de interconectar las LAN Ethernet que operan a 10, 100 y 1000 Mbps. 10 Gigabit Ethernet se puede usar para agregar enlaces de acceso más lentos, en las backbones de las

redes, y para accesos WAN. Usando láseres de 1550 nm, se alcanzan distancias de 40 a 80 Km. con 10 Gigabit Ethernet sobre la fibra monomodo estándar. Con esta tecnología, los proveedores de servicio pueden construir simples redes Ethernet sobre fibra sin SONET ni ATM y con servicios de alta velocidad 10/100/1000 Mbps a un costo muy bajo. Además la interfase OC-192 VSR (Very Short Reach) se puede usar para conectar 10 Gigabit Ethernet a equipos DWDM sobre fibra multimodo. Ethernet ofrece las ventajas técnicas de una tecnología comprobada, fiable y sencilla. Las implementaciones son estándar e interoperables, y a un costo muy inferior que SONET o ATM. Arquitecturalmente la ventaja de Ethernet es su potencial emergente para servir una solución escalable y extremo a extremo. La gestión de red también se puede mejorar con el uso de Ethernet en MAN y WAN.

IP. Hay la tendencia a que los servicios tradicionales de conmutación de circuitos migren a redes IP y que las redes cada vez transporten más datos que voz. Por ello es necesario que las redes evolucionen para acomodar el tráfico. Sin embargo IP puede necesitar llegar a ser tan complejo como ATM para sustituir sus funcionalidades. Así ATM e IP son los candidatos para transportar directamente sobre DWDM. En cualquier caso el resultado es simplificar la infraestructura de red con un menor costo como consecuencia de menos elementos y menos fibra, interfaces abiertas, más flexibilidad y estabilidad.

Fibre Channel. Es la tecnología predominante de enlace de datos utilizada en SANs (Red de Área de Almacenamiento Storage Area Network). Fibre Channel es una sustitución económica para el protocolo CSI como una interfaz de alta velocidad para aplicaciones tales como copias de seguridad y recuperación de datos. Las interfaces Fibre Channel funcionan a 100 Mbps y a 200 Mbps serán viables en un futuro y las de 400 Mbps está en pruebas. Fibre Channel viene sin las fuertes limitaciones de distancia de SCSI; también evita las restricciones de terminación de SCSI porque cada nodo actúa como un repetidor óptico. Fibre Channel se puede implementar en un enlace punto a punto, o en una topología en malla con un conmutador. Fibre Channel se puede transportar directamente sobre el nivel óptico con DWDM.

DPT (Transporte de Paquetes Dinámico). Es un protocolo de Cisco y es una alternativa de SONET para un transporte más eficiente de datos en arquitectura en anillo. DPT soporta

procesamiento básico de paquetes, igualdad, multicasting, IPS (Intelligent Protection Switching), descubrimiento de topología, ARP, enrutamiento y gestión de red. DPT puede correr directamente en fibra, SONET o WDM. La principal ventaja del DPT sobre SONET es su posibilidad de reutilización del ancho de banda. El ancho de banda se consume solamente en los segmentos atravesados y múltiples nodos pueden transmitir concurrentemente. DPT se basa en anillos bidireccionales. Los paquetes son transportados en ambos anillos de forma concatenada, los mensajes de control se transportan en la dirección contraria a los datos.

FDDI. Es una tecnología antigua. Ha sido reemplazada por tecnologías más avanzadas. Sin embargo FDDI es capaz de escalar a las MAN, es una tecnología que comparte el medio con una capacidad relativamente baja con los estándares actuales. Esta limitación, con la poca disponibilidad de interfaces FDDI en equipamiento de redes, está haciendo que FDDI se sustituya por Gigabit Ethernet, o ATM. Es un protocolo que se puede transportar transparentemente sobre el nivel óptico de DWDM.

A pesar del crecimiento desproporcionado del tráfico de datos respecto al de voz, el tráfico antiguo no va a desaparecer repentinamente. Las redes deben soportar diversas conexiones de baja velocidad además de las conexiones más nuevas y de mayor velocidad. Así DWDM debe estar complementado con multiplexación eléctrica (TDM/FDM) para asegurar el uso eficiente de las ondas de luz. Al mismo tiempo el tráfico antiguo aumentará en cuanto al transporte de alta velocidad de datos sin impactar en el eficiente transporte IP. Para los Proveedores de Internet, la situación es distinta: todo el tráfico es IP. Los ISPs necesitan redes de desarrollo rápido y por tanto están a favor del transporte sobre luz y Gigabit Ethernet más que ATM y SONET. Otros requerimientos de este mercado incluyen estrategias de compartición de cargas, empleo de fibra y una gestión más simple.

En la Recomendación UIT-T G.7041/Y.1303 "Procedimiento genérico de retransmisión de tramas (GFP), en la que se especifican las correspondencias de interfaz y funciones del equipo para transportar plataformas orientadas a paquetes, incluidas IP/PPP, Ethernet, Fibre Channel y ESCON (Conexión de Sistemas de Empresas), por las redes de transporte ópticas y otras redes de transporte. Esta Recomendación, junto con la Recomendación UIT-

T G.709 sobre Interfaces para redes de transporte ópticas aprobada a principios del año 2002 proporciona todo el conjunto de correspondencias necesarias para transportar tráfico IP por sistemas DWDM³.

3.7.6.2 Aplicaciones y servicios en las redes MAN

El mercado de la red metropolitana está dirigido por la demanda de los servicios de las nuevas aplicaciones y la introducción del acceso de alta velocidad. Ambas cosas están creando un cuello de botella en las MAN. Las nuevas aplicaciones incluyen el comercio electrónico, la voz en paquetes. Los nuevos servicios, primariamente empresariales, incluyen centros de interconexión y de datos consolidados, extensiones transparentes de la LAN a través de las MAN mediante la conexión geográfica de áreas separadas mediante el uso de longitudes de onda sobre fibra, una tendencia hacia la arquitectura SAN, oficina sin servidores, copias de seguridad en tiempo real, y recuperación de fallos de alta velocidad. Para los proveedores de servicios, los nuevos servicios incluyen soporte a las tecnologías de acceso tales como DSL, cable e inalámbrico (que necesita soporte de infraestructura con cable) y alquiler de longitud de onda o longitud de onda bajo demanda. Dos de las más importantes aplicaciones para la tecnología DWDM en las MAN son las áreas de SAN y la migración SONET.

SAN. Las SAN Redes de Área de Almacenamiento (Storage Area Network) representan el último paso en la evolución del almacenamiento masivo de datos en las empresas. En los entornos de host, el almacenamiento como aplicación, estaba centralizado y gestionado centralmente. Con los entornos cliente / servidor, la información que previamente estaba centralizada, se distribuyó por la red. Los problemas de gestión creados con la descentralización apuntan a dos direcciones básicas: la NAS (Network Attached Storage) donde los dispositivos de almacenamiento están directamente conectados a la LAN, y las SAN. Compuesto de servidores, dispositivos de almacenamiento (cintas y conjuntos de discos) y dispositivos de red (multiplexores, concentradores, enrutadores, conmutadores, etc.), una SAN consta de una red aparte de la LAN. Como red aparte, la SAN puede

³ En el Anexo: "Gestión de Redes Ópticas" se encuentra especificada la recomendación G.709.

resolver los cuellos de botella de la LAN empleando los recursos para aplicaciones tales como procesamiento de transacciones, copias de seguridad y su recuperación. Distintos tipos de interfaces han sido usados para conectar servidores a dispositivos en una SAN. El más usado es el ESCON de IBM, un protocolo half-duplex de 17 Mbps sobre fibra. Fibre Channel, en que se basa el FICON de IBM, es frecuentemente empleado en SAN y tiene una capacidad mayor que el ESCON. Sin embargo ambas tecnologías tienen importantes limitaciones en cuanto a distancias. Por ejemplo la máxima distancia estándar sin repetidores es de aproximadamente 3 Km. para half-duplex ESCON y aproximadamente 10 Km. para full-duplex Fibre Channel a 100 Mbps. Si las distancias son superiores a estos valores, hay una degradación en cuanto a rendimiento. La limitación de distancia se puede resolver transportando datos entre una o más localizaciones de la empresa y una o más SAN sobre nivel óptico usando DWDM. En la figura siguiente se ve la arquitectura de una red SAN.

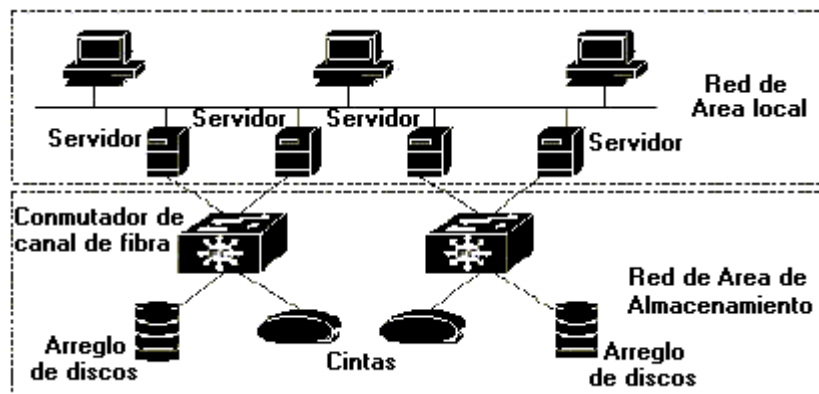


Figura 3.6 Arquitectura de una SAN

El ancho de banda, el punto principal en el mercado de la larga distancia, también lo es en MAN, las redes de acceso y las grandes redes empresariales. En estos tipos de redes, a medida que se implementan nuevas aplicaciones, se necesita un mayor ancho de banda, incluidas las SAN, que posibilitan trabajar sin servidores, la consolidación de los centros de datos y el procesamiento de las copias de seguridad en tiempo real. Otra razón por la cual hay un aumento importante de capacidad de ancho de banda es como consecuencia de la conexión de los usuarios finales a los POPs locales, ya sea mediante línea telefónica, DSL, redes inalámbricas, etc. Típicamente estas conexiones se agregan y transportan sobre

anillos SONET que conectan al POP local que sirve como de gateway a Internet para larga distancia. Ahora la creciente demanda de servicios de alta velocidad están llevando a los proveedores de servicios a transformar el POP en un centro de servicio dinámico de entrega. Como resultado de esto, ahora un usuario dispone de muchos servicios de alta velocidad directamente desde el POP, sin necesidad de tener una conexión directa a Internet. DWDM tiene grandes ventajas como su rápido y flexible aprovisionamiento de protocolos, transparente en cuanto a la velocidad, centralización de datos, servicios protegidos, junto a la posibilidad de ofrecer nuevas y más altas velocidades a menor costo. Una característica distintiva de las MAN es que provee servicios de diferentes tipos de una forma rápida y eficiente en respuesta a las cambiantes demandas de los usuarios. Con SONET, que es la base de la mayoría de las MAN actuales, esta provisión de servicios es larga y compleja. La planificación y el análisis de las redes, el aprovisionamiento ADM, la reconfiguración Sistema Digital de Crosconector (DCS), la verificación de caminos y circuitos, y la creación del servicio pueden tardar varias semanas. Con equipo DWDM instalado la provisión de un nuevo servicio puede ser tan simple como activar una nueva longitud de onda en la fibra ya existente.

Los requerimientos claves para los sistemas DWDM en la MAN son los siguientes:

- Soporte multi-protocolo
- Escalabilidad
- Fiabilidad y disponibilidad
- Sistema abierto (interfaces, gestión de red, tipos de fibra estándar, compatibilidad electromagnética)
- Facilidad de instalación y gestión.
- Tamaño y consumo
- Costo

3.8 SEGURIDAD EN REDES ÓPTICAS

La radiación láser, incluso en aplicaciones de baja potencia como lo son las comunicaciones puede generar daños de envergadura en la visión. Desde el punto de vista de seguridad los transmisores láser se clasifican en:

Para comunicaciones:

Clase I: Máximo de 10 dBm a 1550nm y a 1300nm. Aunque el láser pueda ser peligroso, se encuentra protegido para que no pueda dañar la visión.

Clase IIIa: Hasta 17 dBm a 1550nm. Puede ser peligroso porque no está protegido. Su manipulación debe realizarse por personal especializado.

En condiciones normales. Un enlace se encuentra protegido y la radiación confinada, por lo que no hay peligro. Las situaciones de riesgo se originan al instalar o reparar los enlaces.

4. MIGRACIÓN HACIA REDES 100% OPTICAS

4.1 INTRODUCCIÓN

Para aumentar el ancho de banda en las redes ópticas existentes, se tienen dos opciones posibles: instalar más fibras ópticas o aumentar el ancho de banda de la fibra existente.

El tendido de fibra adicional es la solución tradicional para los proveedores de servicio que deseen aumentar el ancho de banda en sus redes. Sin embargo esta solución no es la mas conveniente debido a su alto costo, en su mayor parte son los costos de los permisos y del tendido, ya que el costo de la fibra es pequeño comparada con los costos mencionados. El tendido de nueva fibra solo tiene sentido si se quiere ampliar la base instalada.

Para aumentar la capacidad efectiva de la fibra existente, se tienen dos opciones:

- Aumentar la velocidad de los sistemas existentes
- Aumentar el número de longitudes de onda por fibra.

Con TDM la velocidad de transmisión de los datos es de 2,5 Gbps (OC-48) y se puede llegar hasta los 10 Gbps (OC- 192), con los últimos avances llegan hasta 40 Gbps (OC-768). Los circuitos electrónicos que lo hacen posible, son complejos, costosos y de alto mantenimiento. La transmisión a OC-192 con fibra monomodo, por ejemplo, está afectada 16 veces más por dispersión cromática que la velocidad anterior OC-48. La mayor potencia de transmisión requerida para velocidades más altas también introduce efectos no lineales que pueden afectar la calidad de la forma de onda. Finalmente la dispersión por polarización es otra cuestión que limita la distancia a la que puede viajar un impulso de luz sin degradación.

En el aumento del número de longitudes de onda, se tiene en consideración el hecho de que en una fibra se combinan muchas longitudes de onda. Usando la tecnología DWDM, se pueden multiplexar simultáneamente varias longitudes de onda (colores de luz) desde 2,5 hasta 40 Gbps en una sola fibra, la capacidad efectiva de las fibras existentes se puede incrementar en un factor de 16 ó 32. En la actualidad existen sistemas con 128 y 160 longitudes de onda, con posibilidades de más longitudes de onda a un mediano plazo.

4.2 INTERACCIÓN ENTRE LA CAPA ÓPTICA Y LA CAPA CLIENTE

Actualmente, la preocupación que enfrentan las redes de comunicación es cómo combinar las ventajas de las técnicas de DWDM con la capacidad de la conmutación óptica de soportar todo el tráfico IP. Una dirección prometedora en la evolución de las redes conduce a la migración de la carga de conmutación al dominio óptico para explotar la escalabilidad dada por la tecnología óptica y soportar los progresivos incrementos de la capacidad del enlace de transmisión DWDM. Esta aproximación conlleva una separación efectiva entre la transmisión-conmutación y el enrutamiento. La transmisión-conmutación se debería manejar en el dominio óptico para disponer del gran ancho de banda de la fibra; el enrutamiento debería realizarse en el dominio eléctrico, donde se realizan las funciones de enrutamiento basadas en el procesamiento de cabeceras.

Se consideran dos capas funcionales: Una capa eléctrica externa que realiza la agregación del tráfico y las principales funciones de enrutamiento de paquetes; la capa interna es la capa óptica, llamada Red Óptica Conmutada (Switched Optical Network, SON), que se basa en la tecnología óptica y realiza las funciones de transmisión y de conmutación de la capa baja. Los edge switches (ES) se localizan en la frontera entre las dos capas. El tráfico IP se inyecta en los ES por redes eléctricas como LAN, MAN, WAN, etc. En el ES se realizan las funciones de agregación del tráfico (encapsulamiento de los paquetes IP entrantes en un paquete óptico) y enrutamiento (se determina a qué ES se debe enviar el paquete IP entrante). Después que el paquete óptico es ensamblado se entrega a la SON y ésta transporta los paquetes ópticos desde el ES fuente al ES destino. En el ES destino el tráfico es separado y enviado a la red de destino. Los conmutadores de la SON, llamados core switches (CS) están interconectados mediante una red de transporte DWDM. Los CS realizan el envío de los paquetes ópticos en el dominio óptico y tienen como objetivo manejar la multiplexación estadística sobre los enlaces DWDM.

La arquitectura de red estaría basada en dos capas: una capa de enrutamiento IP y una capa de transmisión óptica, como se muestra en la figura 4.1. En esta red los enrutadores toman decisiones sobre los paquetes, mientras que la capa de transmisión proporciona rutas de conexión flexibles entre estos enrutadores.

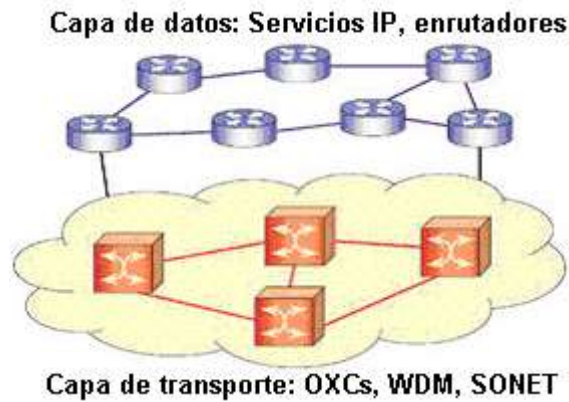


Figura 4.1 Modelo de red óptica basado en 2 capas

Los nodos de transmisión, como OXCs, se encargan de las labores de conmutación entre las fibras, es decir la conmutación de las longitudes de onda individuales. La conexión entre las capas IP y óptica se realizaría mediante GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching), sobre el cual se hace referencia en el anexo 2 (Gestión de Redes Ópticas). Este planteamiento de separar el enrutamiento y el transporte óptico resulta bastante lógico, aunque se espera que en un futuro la red se consolidará en una única capa completamente óptica. Para lograr una capa totalmente óptica, el primer paso es eliminar la capa ATM en favor de POS (packet over SONET), para posteriormente eliminar también la capa SONET. La tecnología SONET/SDH está diseñada para tráfico de voz y es bastante costosa en relación con Ethernet, que está diseñada para datos. Adicionalmente, resulta compleja y poco flexible en relación con la implantación de nuevos servicios y capacidades. La tecnología SONET/SDH se diseñó inicialmente para redes troncales, por lo que posee mecanismos de disponibilidad y fiabilidad robustos basados en un alto nivel de redundancia tanto dentro como fuera de los equipos. Las redes SONET proporcionan una disponibilidad del 99,999 %, que equivale a una caída de 5 minutos por año. Para reemplazar las capacidades de disponibilidad y fiabilidad de SONET, especialmente en el entorno metropolitano, existen técnicas como el desarrollo de múltiples rutas redundantes en topologías de malla o nuevos tipos de planos de control

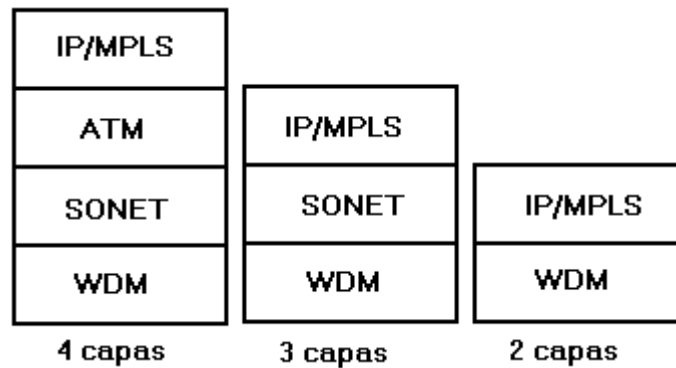


Figura 4.2 Migración de las Arquitecturas a nivel de capas

4.3 RECOMENDACIONES PARA LA MIGRACIÓN DE LA RED DE DATOS DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA A UNA RED CWDM

4.3.1 Descripción de la red Actual

La Red de Datos de la Universidad del Cauca tiene una estructura física basada en un campus universitario dividido en los siguientes sectores: sector de ingenierías, sector de medicina, sector de educación, sector del Carmen, sector de Santo Domingo y sector de la Vicerrectoría de Investigaciones; en cada sector se encuentran uno o más edificios, los cuales se conectan entre sí por un backbone de fibra óptica multimodo, que posee una topología física de doble estrella, cuyos centros son el edificio del Instituto de Posgrados (IPET) y El Carmen, como se muestra en la figura 4.3. El acceso WAN, o acceso a Internet se realiza a través de dos enlaces a 1024Kbps por Modems HDSL conectados a los proveedores de Internet: Telecom y Orbitel.

La infraestructura física dentro de cada edificio posee un cableado estructurado que utiliza par trenzado no-aptallado (UTP) categoría 5, y existe por lo menos un centro de cableado en cada edificio y sus respectivos puntos de red que se extienden hasta los puestos de trabajo dentro del edificio correspondiente.

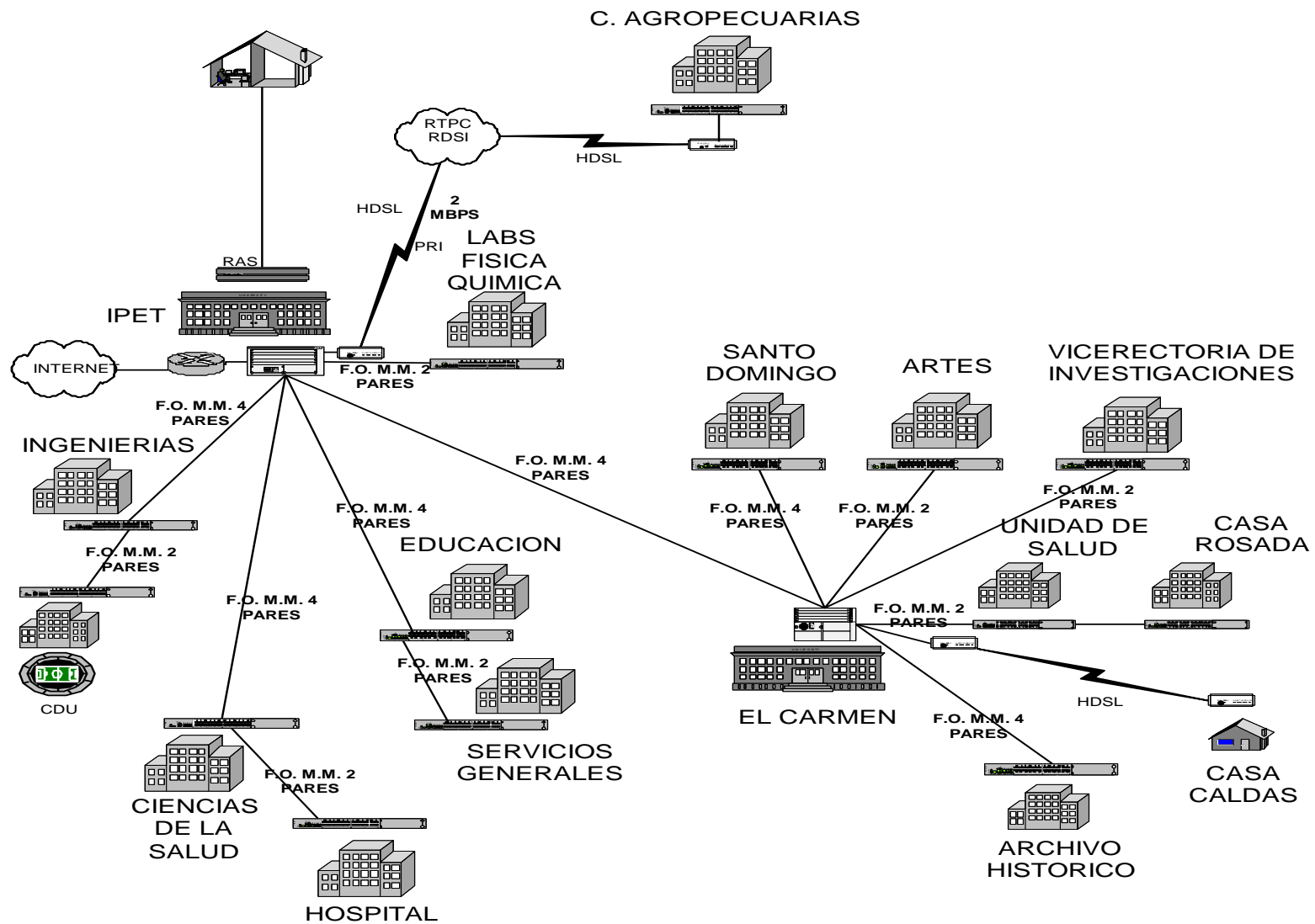


Figura 4.3: Estructura física de la red de datos.

La tecnología de acceso y transporte utilizada en la red de datos es Ethernet 10/100 Mbps.

La distancia entre los diferentes edificios junto con el número de equipos en cada edificio se lista en las tablas 4.1 y 4.2 respectivamente.

| Desde | Hasta | Distancia (m) |
|--------------|----------------------|----------------------|
| IPET | Educación-Sistemas | 320 |
| | Ingenierías | 160 |
| | Ciencias de la salud | 760 |
| | El carmen | 1500 |
| | Santo Domingo | 1886 |
| | VRI | 1120 |
| El Carmen | Santo Domingo | 350 (336) |
| | Artes | Fibra Monomodo |
| | Archivo Histórico | Fibra Monomodo |
| | VRI | 400 |

Tabla 4.1: Distancias entre edificios

| Edificio | Número de Equipos |
|---------------------------------------|--------------------------|
| Educación-Sistemas | 341 |
| Ingenierías | 901 |
| Ciencias de la salud | 93 |
| El carmen | 188 |
| Santo Domingo | 196 |
| VRI | 98 |
| Artes, Casa Caldas, Archivo Histórico | 92 |
| Ciencias Agropecuarias | 48 |

Tabla 4.2: Numero de Equipos

4.3.2 Análisis de algunos parámetros de diseño

- **Topología Física:** De acuerdo a la secuencia requerida para el diseño de una red 100% óptica descrita en el capítulo 3, el primer paso es la especificación de la topología física de la red, que para este caso es una topología en doble estrella, sin embargo los enlaces nodo a nodo se pueden considerar punto a punto. Las redes 100% ópticas en general están basadas en topologías en anillo o malla, pero en este caso existe una topología física ya instalada, por lo tanto la evolución comienza a partir de este modelo.
- **Longitud de onda:** Teniendo en cuenta que la red de datos manejara capacidades de canal de 1 Gigabit, inicialmente se tratara de cumplir con este requerimiento, por lo tanto en un principio se asignará 1 longitud de onda por fibra y dependiendo de un crecimiento futuro, podrán añadirse nuevos canales debido a las características de flexibilidad y escalabilidad de las tecnologías WDM.

Debido a que WDM es una tecnología en evolución el proceso de migración hacia una red basada en dicha tecnología debe ser gradual, además teniendo en cuenta que existen dispositivos de interfaz entre equipos WDM y equipos de otras tecnologías, durante algún tiempo estos pueden trabajar en conjunto. Es por esta razón que el proceso de migración de la red de datos se desarrollara en dos etapas como será descrito posteriormente.

Partiendo del hecho que próximamente la red de datos migrará a Gigabit Ethernet, las recomendaciones se harán bajo este supuesto, pues con canales Gigabit Ethernet se aprovecha de una manera mas eficiente la capacidad que puede ofrecer un sistema CWDM, ya que si se analiza la actual red, la máxima capacidad de canal es 100 Mbps, un valor mucho menor que los manejados por CWDM.

Para la migración de la red de datos de la universidad del Cauca se ha escogido CWDM debido a que además de ser una tecnología similar a DWDM y posee todas sus ventajas, CWDM es mas apropiada para redes pequeñas, debido a su costo considerablemente mas bajo comparado con los sistemas DWDM.

4.3.3 Primera etapa

La tecnología WDM a utilizar depende de la relación costo/beneficio. Una gran ventaja en cuanto a costo que se presenta es que esta red manejaría el tráfico interno de la red de datos de la Universidad del Cauca, lo cual debido a la distancia de cobertura no sería necesario la utilización de amplificadores ópticos reduciendo por tanto los costos de la red.

Teniendo en cuenta la topología actual de la red de datos de la Universidad del Cauca, una primera aproximación para la migración hacia una red CWDM es la migración de los nodos principales localizados en los edificios del IPET y el Carmen, ya que estos son los que manejan mayor cantidad de tráfico, debido a que varios nodos secundarios de menor capacidad están conectados a ellos. La figura 4.7 y 4.8 muestra la configuración actual de los nodos del IPET y el Carmen, respectivamente.

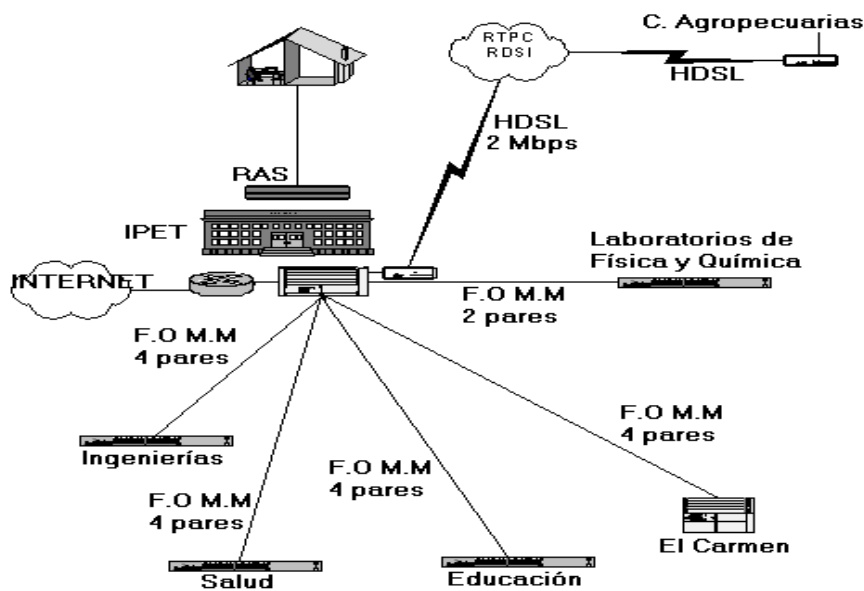


Figura 4.4: Configuración del actual nodo del edificio del IPET

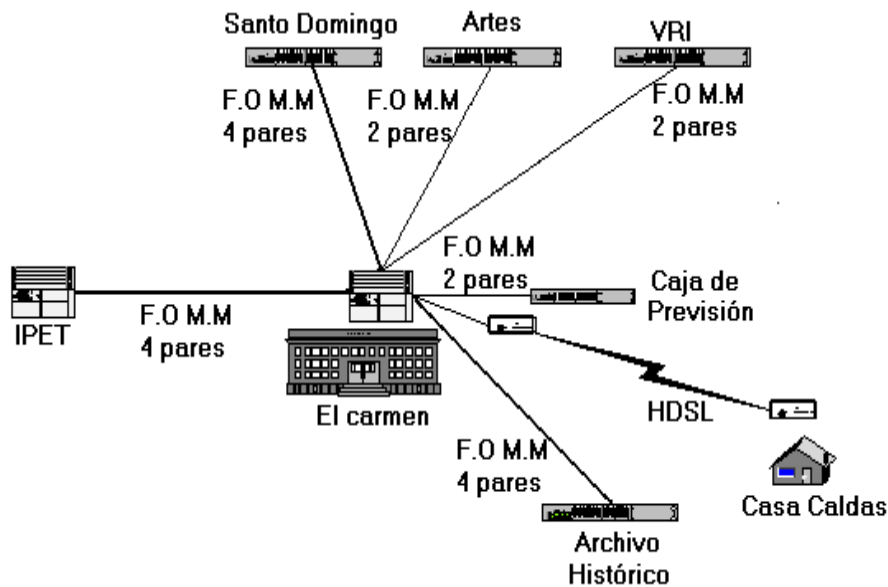


Figura 4.5: Configuración del actual nodo del edificio del Carmen

El nodo actual del edificio del Carmen contiene un switch que recibe las señales provenientes del edificio de Santo Domingo, La Vicerrectoría de Investigaciones, El Archivo Histórico, Artes, La caja de Previsión y la Casa Caldas, y este switch envía dichos enlaces hacia el IPET. El nodo actual del edificio del IPET consta de un switch principal Accelar 1200 de Nortel al cual llegan conexiones provenientes de toda la red, y es en este punto donde se establece si el tráfico es interno o externo a la red de datos.

Para un proceso de migración gradual de estos nodos, en una primera instancia es necesario cumplir con las características iniciales de la red, es decir, garantizar la capacidad de transmisión de Gigabit Ethernet. Luego aprovechando la flexibilidad de la tecnología CWDM, pueden añadirse nuevos canales, dependiendo del aumento del tráfico de la red.

Teniendo en cuenta estos requerimientos una posible solución es utilizar multiplexores/demultiplexores CWDM de 1 canal, que posean capacidad de expandirse a más canales.

El tráfico proveniente de los nodos secundarios se conectarían al multiplexor/demultiplexor a través de dispositivos GBICs (Gigabit Ethernet Interface Carrier), que hace las funciones de interfaz entre un canal Gigabit Ethernet y un canal CWDM, es decir, convierte la señal Gigabit Ethernet a una longitud de onda CWDM estandarizada.

La figura 4.9 muestra el esquema general del sistema descrito anteriormente, el cual puede clasificarse como una configuración punto a punto.

Para el canal de protección se implementaría un sistema alternativo con las mismas características del descrito anteriormente, con lo que se hace es conmutar los canales CWDM cuando ocurre algún fallo en el trayecto (fibra) de trabajo.

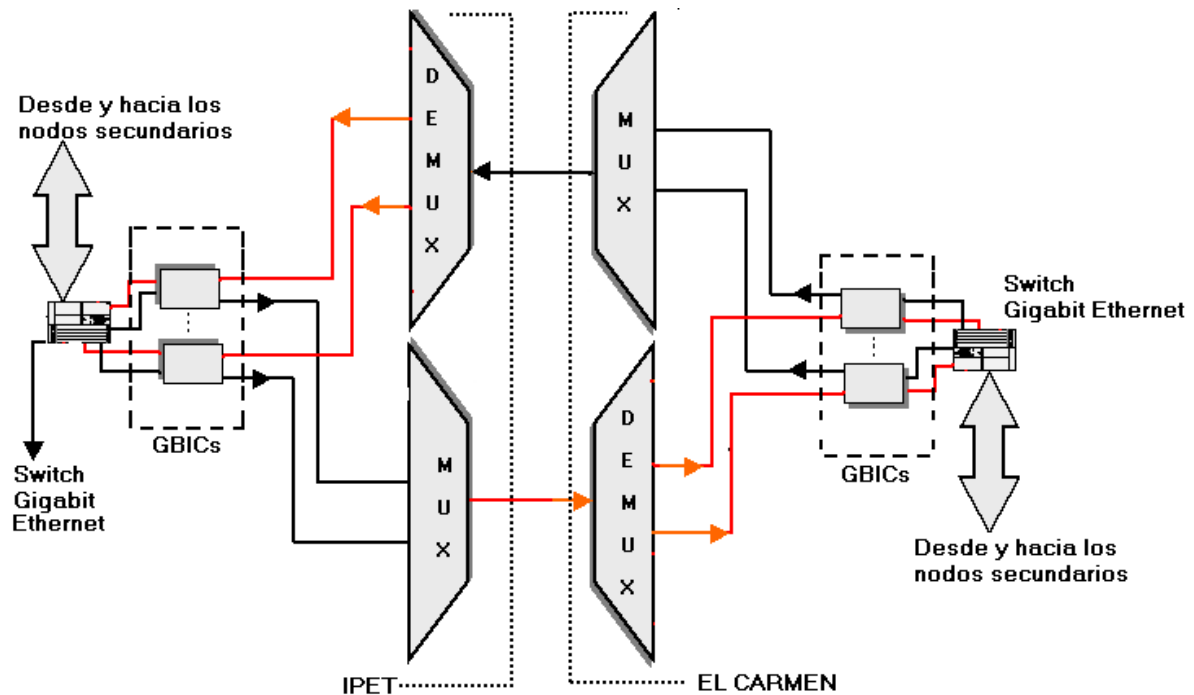


Figura 4.6: Nueva configuración de los nodos

En esta primera aproximación, los nodos que llegan al IPET (excepto el nodo del edificio del Carmen no) poseen interfaz GBIC, ya que estos van conectados directamente al switch principal, es decir, la señal proveniente de estos nodos no son longitudes de onda CWDM, por lo tanto no tienen que pasar por el multiplexor/demultiplexor, a menos que equipos de estos nodos requieran comunicarse con otros equipos de los nodos que llegan al edificio del Carmen, para lo cual el switch se encarga de pasar dicha señal al GBIC correspondiente.

4.3.4 Segunda Etapa

Como inicialmente las tecnologías WDM se han desarrollado para los backbones de las redes, su llegada hacia los bordes de la misma aun no es algo que se vislumbra en un futuro próximo, ya que pasara algún tiempo para que los terminales finales emitan señales ópticas y no eléctricas como es el caso actual. Sin embargo el camino a seguir en la migración de la red de datos sería ir reemplazando los equipos (switches) más

externos al backbone de la red a medida que la capacidad en estos trayectos ya no sea suficiente, ya sea por crecimiento de tráfico o por la prestación de nuevos servicios. Sin embargo, un primer paso hacia el objetivo de red totalmente óptica sería la migración hacia switches totalmente ópticos. CISCO SYSTEMS ofrece productos de la serie 15200 correspondiente a equipos ópticos con utilización en tecnología WDM. En particular, se tiene el Switch óptico ONS 15252. Estos equipos pueden ser configurados como OTM (Optical Terminal Multiplexer) entre diferentes nodos, o como OADM, el OTM posee dos módulos de línea para proveer conectividad Gigabit Ethernet y dos módulos de multiplexación para conectar fibra directamente.

4.3.5 Recomendación de equipos

4.3.5.1 MUX/DEMUX CWDM

Los canales en un equipo CWDM se clasifican por colores como se muestra en la siguiente tabla.

| Longitud de onda central | Colores | Código de la longitud de onda |
|--------------------------|----------|-------------------------------|
| 1470 | Gris | 47 |
| 1490 | violeta | 49 |
| 1510 | azul | 51 |
| 1530 | verde | 53 |
| 1550 | amarillo | 55 |
| 1570 | naranja | 57 |
| 1590 | rojo | 59 |
| 1610 | café | 61 |

Tabla 4.3. Clasificación de los canales cwdm según el color.

Los equipos mux/demux CWDM varían en cuanto a precio dependiendo del fabricante, la tabla siguiente muestra la relación costo-fabricante.

| EMPRESA | DESCRIPCIÓN | PRECIO |
|----------------|--|--------------------|
| Fiberdyne Labs | CWDM mux/demux de 4 canales, 1510, 1530, 1550, 1570nm. | US\$ 4500 cada uno |
| Cisco | Mux/demux CWDM de 4 canales, también se puede usar como OADM. 1470, 1510, 1550, 1590 nm. | US\$ 7319 |

Tabla 4.4 Relación costo/fabricante de dispositivos Mux/Demux CWDM

4.3.5.2 GBICs

Los equipos GBIC utilizan una fibra para transmitir y una fibra para recibir. Por lo tanto un par de fibra unimodal es necesario para todas las configuraciones.

El GBIC CWDM es un componente activo que convierte señales eléctricas de gigabit Ethernet en una interfaz óptica unimodal. El color del GBICs CWDM define la longitud de onda que el canal gigabit Ethernet transporta. Los dispositivos GBIC CWDM funcionan en 1470, 1490, 1510, 1530, 1550, 1570, 1590, y 1610 nm. El GBICs ofrece protección de la trayectoria (usa dos trayectorias de la fibra para la misma longitud de onda) y la protección del cliente en los puntos finales del canal (CWDM GBICs). Los puntos finales del canal son puertos estándares de Ethernet GBIC gigabit en los switches y los enrutadores.

4.3.5.3 Especificaciones Técnicas del equipo GBIC CWDM de Cisco

El dispositivo GBIC CWDM es un elemento que permite conexión en caliente⁴ y se conecta en un puerto GBIC 802.3z o un puerto estándar de un switch o de un enrutador, uniendo el puerto a la red CWDM.

Características

- enlaces full-duplex 1.25-Gbps
- Nivel de enlace óptico de 30 DB
- Compatible con el estándar de GBIC según lo especificado en IEEE 802.3z

4.3.5.3.1 Condiciones ambientales y requisitos de energía

La gama de temperaturas de funcionamiento está entre 32 a 122° F (0 y 50° C); La tabla 4.7 describe los detalles de interfaz de la corriente eléctrica y la tabla 4.8 describe algunos parámetros ópticos.

| Parámetro | Símbolo | Mínimo | Típico | Máximo | Unidades |
|-----------|---------|--------|--------|--------|----------|
|-----------|---------|--------|--------|--------|----------|

⁴ Conexión en caliente: es una conexión que se puede realizar mientras el sistema está en funcionamiento.

| | | | | | |
|------------------------|----------------------|------|-----|------|----|
| Corriente de la fuente | I_s | | 280 | 350 | MA |
| Voltaje máximo | $V_{\text{máximo}}$ | | | 6 | V |
| Corriente de entrada | I_{entrada} | | | 400 | MA |
| Voltaje de entrada | V_{cc} | 4.75 | 5 | 5.25 | V |

Tabla 4.5 Datos De la Interfaz De la Corriente Eléctrica

| Parámetro | Símbolo | Mínimo | Típico | Máximo | Unidades | Notas |
|---|--------------------------|--------|--------|--------|----------|--|
| Dependencia de la temperatura de la longitud de onda | | | 0.08 | | nm/° C | |
| Energía óptica de salida del transmisor | $P_{\text{hacia fuera}}$ | +1.0 | +3.0 | +5.0 | dBm | Energía media en fibra unimodal |
| Energía de entrada óptica del receptor BER < 10^{-9} | P_{adentro} | -31.0 | -33.0 | -7.0 | dBm | a 1,25 Gbps, 140° F (temperatura de caso de 60° C) |
| Energía de entrada óptica del receptor BER < 10^{-12} | P_{adentro} | -29.0 | -33.0 | -7.0 | dBm | a 1,25 Gbps, 140° F (temperatura de caso de 60° C) |
| Longitud de onda óptica de entrada | λ_{en} | 1450 | | 1620 | Nm | |
| Perdida de dispersión en 60 km | | | | 2 | DB | |

Tabla 4.6 Parámetros Ópticos

La siguiente tabla muestra una relación entre los diferentes fabricantes de equipos GBIC y su respectivo precio.

| EMPRESA | DESCRIPCIÓN | PRECIO |
|----------------|----------------------------|-----------------|
| Fiberdyne Labs | Modulo GBIC 1510 nm, 30 KM | U.S. \$1,850.00 |
| Nortel | GBIC 1510 nm, 40Km | U.S. \$3,660.00 |
| Cisco | GBIC 1510 nm,40 km | U.S. \$3,640.00 |

Tabla 4.7 Relación precio/fabricante de dispositivos GBIC

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- DWDM continuará suministrando ancho de banda para grandes cantidades de datos. De hecho la capacidad de los sistemas crecerá con el avance de las tecnologías que permiten un espaciado menor, y por tanto números más altos de longitudes de onda. Pero DWDM también se está moviendo más allá del transporte llegando a ser la base de las redes ópticas con conmutación de longitud de onda y protección basada en malla. La conmutación a nivel fotónico permitirá esta evolución, así como los protocolos de enrutamiento permitirán caminos de luz que atraviesen la red de la misma forma que lo hacen actualmente los circuitos virtuales.
- La conmutación de paquetes ópticos está actualmente en fase experimental. Han de ser vencidos varios obstáculos para que este modelo esté disponible comercialmente en un futuro próximo. Se han de producir avances en la fabricación de dispositivos y componentes ópticos, y se requieren soluciones para la alineación de paquetes, sincronización y reescritura. Las técnicas ópticas tendrán la capacidad de soportar la transferencia de paquetes extremo a extremo.

En cuanto a recomendaciones podemos sugerir las siguientes:

- La tecnología CWDM permite hacer una primera aproximación hacia una implementación de redes LAN basadas en tecnología de multiplexación de longitud de onda, ya que debido a que la fabricación de sus componentes no requiere tanta precisión -como para DWDM, por ejemplo- lo que a su vez genera un bajo costo con relación a tecnologías similares.
- La migración de la red de datos de la Universidad de Cauca hacia una red completamente óptica empieza por la modificación de los nodos principales localizados en los edificios del IPET y El Carmen, para luego extenderse hacia los extremos de la red. Es importante considerar en la fase de migración las características básicas que se buscan en la red de datos de la Universidad del Cauca como son la calidad de servicio, inteligencia, seguridad, que proporcione una buena velocidad para obtener buenas aplicaciones.
- La migración de una red Ethernet o Fast Ethernet hacia CWDM no se justifica en términos de rendimiento, puesto que los canales CWDM transportan 1.25 Gbps lo

que generaría un desperdicio de la capacidad de los canales, por lo tanto para hacer esta migración es recomendable antes hacer una migración hacia Gigabit Ethernet. Debido a que el proceso de migración es a largo plazo y costoso se recomienda hacerlo por etapas, identificando primero las prioridades que exige el sistema de datos de la Universidad, como por ejemplo el sistema administrativo, sistema académico, financiero y aplicaciones en tiempo real.

- Teniendo en cuenta que una red CWDM ofrece un gran ancho de banda, la futura red de datos de la Universidad del Cauca podría tomar ventaja de esta tecnología para prestar nuevos servicios y/o mejorar los existentes.

6. LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-------|---|
| ABT | ATM Block Transference: Bloque de Transferencia ATM |
| ADP | Avalanche Photodiode: fotodiodo de avalancha |
| ADM | Add-Drop Multiplexer: Multiplexor de inserción extracción |
| AFR | Absolute Frequency Reference: Referencia absoluta de frecuencia |
| AON | All Optical Network: Red Totalmente Óptica |
| ARP | Address Resolution Protocol: Protocolo de Resolución de Direcciones |
| ASE | Amplified Spontaneous Emission: Emisión Espontánea Amplificada |
| ATM | Asynchronous Transference Mode: Modo de Transferencia Asíncronico |
| AWG | Arrayed Waveguide Gratings: Arreglo de rejillas de Guías de Onda |
| BCP | Burst Control Packet: Paquete de Control de Ráfagas |
| BLSR | Bidirectional Line Switched Ring: Anillo Conmutado de Línea Bidireccional |
| CN | Core Node: Nodo Central |
| CS | Core Switch: conmutador Central |
| CSMA | Carrier Sense Multiple Access: Detección de Portadora con Acceso Múltiple |
| CW | Continuos Wave: Onda Continua |
| CWDM | Coarse Wavelength Division Multiplexing: Multiplexación Aproximada por División de Longitud de Onda |
| DCS | Digital Cross-connect System: Sistema Digital de crosconector |
| DFB | Device Feedback Distributed: Dispositivo de Realimentación Distribuida |
| DFG | Difference Frequency generation: Generación de Diferencia de Frecuencia |
| DPT | Dynamic Packet Transport: Transporte Dinámico de Paquetes |
| DSF | Dispersion-shifted fiber: Fibra con dispersion desplazada |
| DSL | Digital Subscriber Line: Línea Digital de Abonado |
| DWDM | Dense Wavelength Division Multiplexing: Multiplexación por División de Longitud de onda Densa |
| EDF | Erbium doped Fiber: Fibra Dopada con erbio |
| EDFA | Erbium doped Fiber Amplifier: Amplificador de Fibra Dopada con erbio |
| ES | Edge Switch: Switch del Borde |
| ESCON | Enterprises System Connection: Conexión de Sistemas de Empresas |
| FDDI | Interfaz de Datos sobre Fibra Distribuida |
| FDL | Fiber Distributed Data Interface: Fibra de Longitud Determinada |
| FICON | Fiber Connectivity: Conectividad en Fibra |
| FTTH | Fiber To The Home: Fibra hasta el Hogar |
| FWM | Four Wave Mixing: Mezcla de Cuatro Ondas |
| GBIC | Gigabit Interface Converter: Convertidor de Interfaz Gigabit Ethernet |
| GE | Gigabit Ethernet |

| | |
|--------|--|
| GMPLS | Generalized Multiprotocol Label Switching: Multiprotocolo de Conmutación de Etiquetas Generalizado |
| IDC | Input data Channel: Canal de datos de Entrada |
| IPS | Intelligent Protection Switching: Conmutación de protección inteligente |
| LAN | Local Area Network: Red de Área Local |
| LD | Láser Diode: Diodo láser |
| LDP | Label Distribution Protocol: Protocolo de Distribución de etiqueta |
| LED | Light Emitting Diode: Diodo Emisor de luz |
| LSP | Label Switching Path: Trayecto de Conmutación de Etiqueta |
| LSR | Label Switching Router: Enrutador de Conmutación de Etiqueta |
| MAN | Metropolitan Area Network: Red de Área Metropolitana |
| MPI | Multiple Path Interference: Interferencia por trayectos múltiples |
| MPLS | Multiprotocol Label Switching: Multiprotocolo de Conmutación de Etiquetas |
| MZI | Mach-Zehnder Interferometer: Interferómetro de Mach-Zehnder |
| NDSF | Non-dispersion shifted fiber: Fibra de dispersión desplazada nula |
| NRZ | Non Return to zero: No retorno a Cero |
| NZ- | Non-zero dispersion shifted fiber: Fibra de Dispersión Desplazada no Nula |
| OA | Optical Amplifier: Amplificador Óptico |
| OADM | Optical Add-drop Multiplexer: Multiplexor óptico de adición-extracción |
| OBS | Optical Bursa Switching: Conmutación Óptica a Ráfagas |
| OC | Optical Channel: Canal Óptico |
| OMS-SP | Optical Multiplexing Session-Shared Protection: Protección Compartida en la Sección de Multiplexación Óptica |
| OSC | Optical Supervision Channel: Canal Óptico de Supervisión |
| OSNR | Optical Signal Noise Rate: Relación óptica Señal a ruido |
| OTDR | Optical Time Domain: Reflectómetro óptico en el Dominio del Tiempo |
| OTN | Optical Transport Network: Red de Transporte Óptica |
| OXC | Optical Cross-connect: Crosconector Óptico |
| PDM | Dispersión de modo de Polarización |
| PLL | Phase Locked Loop: Control de Fase de Lazo Cerrado |
| PON | Passive Optical Network: Red óptica pasiva |
| POP | Point OF Presence: Punto de Presencia |
| POS | Packet over SONET: Paquete Sobre SONET |
| SAN | Storage Area Network: Red de Área de Almacenamiento |
| SBS | stimulated Brillouin scattering: Dispersión de Brillouin Estimulada |
| SON | Switched Optical Network: Red Óptica Conmutada |
| SONET | Synconic Optical Network: Red Óptica Sincrónica |
| SPM | Self Phase Modulation: Auto-Modulación de Fase |
| TDM | Time División Multiplexing: Multiplexación por División de Tiempo |
| UTP | Unshielded Twisted Pair: Par Trenzado no Apantallado |
| UPSR | Unidirectional Path Switched Ring: Anillo Conmutado de Camino Unidireccional |

| | |
|-------|--|
| VCSEL | Vertical Cavity Surface Emitting Láser: Láser Emisor de Superficie de Cavidad Vertical |
| VOA | Variable Optical Attenuator: Atenuador Óptico Variable |
| VoIP | Voice over IP: Voz Sobre IP |
| VSR | Very Short Reach: Alcance Muy Corto |
| WAN | Wide Area Network: Red de Área Extensa |
| WDM | Wavelength Division Multiplexing: Multiplexación por División de Longitud de Onda |
| WRS | Wavelength Rounting Switch: Conmutador de Enrutamiento de Longitud de Onda |
| XPM | Cross Phase Modulation: Modulación de Fase Cruzada |

7. BIBLIOGRAFIA

http://www-comm.itsi.disa.mil/itu/r_g0600.html
http://www.3com.com/other/pdfs/products/en/ss4400_family_dsheets.pdf
<http://www.eurescom.de/~pub-deliverables/>
<http://ttd.teleco.upv.es/~jormaso/gigabit/>
<http://www.nortellnetworks.com/>
<http://www.rediris.es/jt/jt2001/archivo/redesopticas.pdf>
<http://www.itu.int/ITU-T/>
<http://ttd.upv.es/~framos/Fibra/cwdm.html>
<http://individual.utoronto.ca/iizuka/labs/edfa/labhowto.pdf>
<http://people.ac.upc.es/asalaver/cwdblazep.pdf>
<http://redesopticas.reuna.cl/proyecto/docs/AvPr2703.PDF>
<http://redesopticas.reuna.cl/publicaciones/RecomendacionesRedOptica.pdf>
http://mailweb.udlap.mx/~lgojeda/telecom3/fibra_optica/
<http://www.ieee.org/organizations/pubs/newsletters/leos/oct02/index.html>
http://www.urec.cnrs.fr/hd/DWDM/CIENA/evolution_DWDM.pdf
www.ericsson.com/network_operators/campaign/publicethernet/Ethernet_AandT.pdf
<http://people.ac.upc.es/asalaver/jerram1.pdf>
<http://people.ac.upc.es/asalaver/g709otnmodel.pdf>
http://atr.alcatel.de/hefte/02i_1/gb/pdf/03schiavoni.pdf
http://www.unicauca.edu.co/portafolio/red_de_datos/red_infraestructura.php
<http://www.unicauca.edu.co/serviciosinternet>