

IP-DWDM RED ÓPTICA METROPOLITANA

RAFAEL NÚÑEZ GONZÁLEZ

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ÁREA DE TELECOMUNICACIONES
CARTAGENA DE INDIAS
2004**

IP-DWDM RED ÓPTICA METROPOLITANA

RAFAEL NÚÑEZ GONZÁLEZ

**Monografía para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

**Director
EDUARDO GÓMEZ VÁSQUEZ
Magíster en Ciencias Computacionales**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ÁREA DE TELECOMUNICACIONES
CARTAGENA DE INDIAS
2004**

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Cartagena, / / (día, mes, año)

A mi familia, que con todo su esfuerzo y su apoyo, me han llevado hasta donde me encuentro hoy. A mi papá, mi mamá y mis hermanos, por sus múltiples consejos y dedicación, que me han hecho una mejor persona y un profesional.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Eduardo Gómez Vásquez, Ingeniero Electricista, Magister en Ciencias Computacionales y Director de la Investigación, por sus valiosos aportes.

Gonzalo López, Ingeniero Electrónico, Magister en Telemática y Coordinador del Minor en Telecomunicaciones.

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	11
1. FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA DWDM	12
1.1. EVOLUCIÓN DE LA TRANSMISIÓN CON FIBRA ÓPTICA	12
1.1.1. Desarrollo de la tecnología DWDM	14
1.1.2. Funciones del sistema DWDM	15
1.1.3. Tecnologías posibles	16
1.2. COMPONENTES Y OPERACIÓN	17
1.3. FIBRAS ÓPTICAS	17
1.3.1. Cómo trabajan las fibras	17
1.3.2. Fibra multimodo y fibra monomodo	18
1.3.3. Diseños de fibra monomodo	19
1.3.4. Los retos de la transmisión	20
1.3.5. Atenuación	21
1.3.6. Dispersión	22
1.3.7. Dispersión cromática	22
1.3.8. Dispersión en modo polarizado	23
1.3.9. Otros efectos no lineales	23
1.4. FUENTES DE LUZ Y DETECTORES	24
1.4.1. Emisores de luz – LEDs y láseres	24
1.4.2. Tabla ITU	26
1.4.3. Detectores de luz	27
1.5. AMPLIFICADORES ÓPTICOS	27
1.5.1. Amplificador de fibra dopado con erbio	28
1.6. MULTIPLEXORES Y DEMULTIPLEXORES	29
1.6.1. Técnicas de multiplexación y desmultiplexación	30
1.6.2. Multiplexores ópticos add/drop	33
1.7. INTERFACES A DWDM	33
1.8. OPERACIÓN DE UN TRANSPONDER BASADO EN EL SISTEMA DWDM	34
2. DWDM EN LAS MAN	36
2.1. TECNOLOGÍAS EN LA MAN	36
2.1.1. SONET/SDH	36
2.1.2. ATM	36

2.1.3. Gigabit Ethernet	37
2.1.4. IP	37
2.1.5. Fiber Channel	38
2.1.6. DPT	38
2.1.7. Soporte al tráfico antiguo	39
2.2. TOPOLOGÍAS Y ESQUEMAS DE PROTECCIÓN PARA DWDM	39
2.2.1. Topologías punto a punto	40
2.2.2. Topologías en anillo	41
2.2.3. Topologías malladas	43
2.3. CONSIDERACIONES PRÁCTICAS EN UNA INSTALACIÓN DWDM	44
2.3.1. Previsión de la potencia óptica	44
2.3.2. Cuestiones de interoperabilidad	45
3. PROYECTO PREAMBULO	46
3.1. OBJETIVOS	47
3.2. ARQUITECTURA	47
3.2.1. Núcleo de la red	47
3.3. EXPERIENCIAS	49
4. PROYECTO EMPIRICO	51
4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO EMPIRICO	51
4.1.1. Arquitectura propuesta para el plano de transporte	52
4.1.1.1. Anillo óptico unidireccional	52
4.1.1.2. Anillo óptico bidireccional	54
4.1.1.3. Dispositivos OADM	55
4.1.2. Arquitectura propuesta para el plano de control	56
4.1.3. Arquitectura propuesta para el plano de gestión	59
5. CONCLUSIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Regiones de Longitud de Onda	13
Figura 1.2. DWDM con dos canales	14
Figura 1.3. Evolución de DWDM	14
Figura 1.4. Crecimiento en capacidad de la fibra	15
Figura 1.5. Funcionamiento de DWDM	15
Figura 1.6. Principio de reflexión interna total	18
Figura 1.7. Luz reflejada en una fibra multimodo	19
Figura 1.8. Luz reflejada en una fibra monomodo	19
Figura 1.9. Dispersión Rayleigh	21
Figura 1.10. Absorción	22
Figura 1.11. Principio de dispersión	22
Figura 1.12. Dispersión cromática	23
Figura 1.13. Mezcla de cuatro ondas	24
Figura 1.14. Diseño típico de un láser	25
Figura 1.15. Modulación externa de un láser	26
Figura 1.16. Tabla ITU	26
Figura 1.17. Diseño de un amplificador de fibra dopado con erbio	28

Figura 1.18. Multiplexación y Desmultiplexación en un sistema unidireccional	30
Figura 1.19. Multiplexación y Desmultiplexación en un sistema bidireccional	30
Figura 1.20. Desmultiplexación por refracción en un prisma	31
Figura 1.21. Principio de difracción	31
Figura 1.22. Matriz de rejillas de guía de onda	32
Figura 1.23. Filtro de interferencia multicapa	32
Figura 1.24. Remoción y adición selectiva de longitudes de onda	33
Figura 1.25. Funciones de un Transponder	34
Figura 1.26. Anatomía de un sistema DWDM	34
Figura 2.1. Protocolos de Enlace de Datos y Red sobre la capa Óptica	38
Figura 2.2. Arquitectura de anillo DPT	39
Figura 2.3. Arquitectura punto a punto	41
Figura 2.4. Arquitectura en anillo DWDM con Hub y Satélites	42
Figura 2.5. Protección UPSR en un anillo DWDM	42
Figura 2.6. Malla, Punto a punto y Arquitectura en anillo	43
Figura 3.1. Entidades participantes en el proyecto PREAMBULO	46
Figura 3.2. Estructura física y lógica de PREAMBULO	48
Figura 4.1. Arquitectura lógica del test-bed de EMPIRICO	51
Figura 4.2. Ejemplo de canal óptico bidireccional en anillo Unidireccional	53
Figura 4.3. Estructura de un nodo óptico de un anillo unidireccional	54

Figura 4.4. Ejemplo de canal óptico bidireccional en anillo Bidireccional	54
Figura 4.5. Estructura de un nodo óptico de un anillo bidireccional	55
Figura 4.6a. OADM reconfigurable basado en conmutadores 2x2	56
Figura 4.6b. OADM reconfigurable basado en conmutadores N x N	56
Figura 4.7. Red de comunicación de datos (DCN)	58
Figura 4.8. Arquitectura propuesta para los OCC's	59

RESUMEN

En este trabajo se analiza el diseño e implementación de las redes ópticas metropolitanas IP-DWDM y su principal objetivo es el de ampliar los conceptos actuales acerca de la transmisión por fibra óptica a través del estudio de proyectos vigentes.

Uno de estos es el *Proyecto Empírico*, anillo metropolitano gigabit ethernet DWDM, configurable dinámicamente mediante un plano de control óptico basado en GMPLS. Este proyecto está siendo desarrollado en España, por el Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Cataluña y la Universidad Politécnica de la misma ciudad.

Asimismo, se analiza el *Proyecto Preámbulo*, proyecto subvencionado por el MCyT de Madrid, cuyo principal objetivo es instalar, configurar y operar una infraestructura de investigación de red metropolitana de fibra óptica que proporcione un servicio de transporte de datos utilizando IP directamente sobre DWDM entre los tres nodos que componen la red.

En esta investigación se explica detalladamente el funcionamiento de la tecnología DWDM, sus múltiples aplicaciones y ventajas sobre otras tecnologías, así como su importancia en el desarrollo de los proyectos anteriormente mencionados.

Esta es una investigación de tipo descriptivo, basada en proyectos reales que se encuentran en construcción y sus objetivos específicos son los de reconocer las ventajas de la *Multiplexación densa en longitud de onda* (DWDM) y lograr que el lector cuestione las tecnologías actuales de comunicación y note la importancia de migrar a un nivel superior, a través de esta tecnología.

INTRODUCCIÓN

Hasta hace poco, la transmisión de datos por fibra óptica consistía en transmitir impulsos luminosos a alta velocidad a través de la fibra. Este concepto, que en su momento era muy avanzado, ya es anticuado.

Si se piensa en un enlace tradicional punto a punto con fibra óptica: una fuente óptica transmite en un extremo y un foto-detector recibe la señal en el extremo opuesto. Señales con diferentes fuentes de luz requerirían diferentes canales ópticos, es decir, diferentes fibras. Y, considerando que las fuentes ópticas tienen un espectro estrecho, se puede deducir que únicamente se está aprovechando una pequeña porción de todo el ancho de banda disponible en la fibra óptica.

Con la llegada de nuevos negocios soportados por Internet, las Redes de Telecomunicaciones tienen que afrontar nuevos retos. Los sistemas DWDM han establecido el camino para dar respuesta a la demanda continua de nuevos servicios que requieren más capacidad, resultando finalmente a una gran demanda de ancho de banda.

Partiendo de este hecho, se podría pensar en introducir diferentes fuentes de luz a través de una única fibra con tan solo hacer que cada fuente emita a una longitud de onda diferente.

Hoy en día, la tecnología permite transmitir por la misma fibra óptica, impulsos de luz de diferentes colores a la vez como canales independientes, permitiendo multiplicar la capacidad de transmisión del medio físico existente. Esta característica de las redes ópticas las hace idóneas para cubrir la imparable demanda de mayores prestaciones de ancho de banda y velocidad de transmisión.

1. FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA DWDM

La emergencia del DWDM es uno de los fenómenos más recientes e importantes en el desarrollo de la tecnología de transmisión por fibra óptica. A continuación se explican las etapas de la tecnología de fibra óptica y el lugar del DWDM en este desarrollo. Asimismo, se examinan las funciones y componentes de un sistema DWDM, incluidas las tecnologías posibles y, para concluir, la descripción de alto nivel de la operación de un sistema DWDM.

1.1. EVOLUCIÓN DE LA TRANSMISIÓN CON FIBRA ÓPTICA

La realidad de la transmisión de la fibra óptica ha sido experimentalmente mejorada desde el siglo XIX, pero la tecnología empezó a avanzar rápidamente en la segunda mitad del siglo XX con el invento del fiberscopio, que encontró aplicaciones en la industria y la medicina, por ejemplo en la cirugía laparoscópica.

Después de que fuese posible la viabilidad de la transmisión de la luz sobre fibra, el paso siguiente en el desarrollo de la fibra óptica fue encontrar una fuente de luz que fuera suficientemente potente y de espectro estrecho¹. Los LED (Light-Emitting Diode) y los diodos láser fueron capaces de cumplir estos requisitos. Los láseres empezaron en la década de los 60's, culminando con los láseres semiconductores que son los que se usan mayormente en la actualidad.

Ventajas adicionales de la fibra sobre el cobre incluyen la posibilidad de transportar señales a grandes distancias, bajas tasas de error, inmunidad a las interferencias eléctricas, seguridad y peso de la luz.

¹ La luz tiene una capacidad de transportar información 10.000 veces mayor que las frecuencias más altas de radio.

Conscientes de estas características, los investigadores de mediados de la década de los 60's propusieron que la fibra óptica pudiera ser un medio de transmisión posible. Había sin embargo un obstáculo, era la pérdida de la fuerza de la señal o atenuación, teniendo en cuenta el cristal con que se trabajaba. Finalmente en 1970 Corning produjo las primeras fibras para comunicaciones. Con una atenuación menor a 20 dB/Km., esta fibra de cristal purificada superaba el umbral para hacer de las fibras ópticas una tecnología viable.

Al principio la innovación progresó lentamente, debido a la existencia de los monopolios privados y gubernamentales que eran los propietarios de la telefonía. Primero AT&T estandarizó la transmisión a velocidad DS-3 (45 Mbps) para fibras multimodo. Poco después la fibra monomodo se mostró capaz de transmitir a velocidades 10 veces superior a la anterior y hasta distancias de 32 Km. A principios de la década del 80, MCI, seguido por Sprint, adoptaron fibras monomodo para la red a larga distancia en Estados Unidos.

Los posteriores desarrollos de fibra óptica están cerca del uso de regiones específicas del espectro óptico donde la atenuación es baja. Estas regiones, llamadas ventanas, están entre áreas de alta absorción. Los primeros sistemas desarrollados operan alrededor de los 850 nm, la primera ventana en la fibra óptica basada en silicio. Una segunda ventana (S band), a 1310 nm, era mejor en cuanto tenía menor atenuación, seguida por una tercera ventana (C band) a 1550 nm con una pérdida óptica aún menor. Hoy una cuarta ventana (L band) cercana a 1625 nm está en fase de desarrollo.

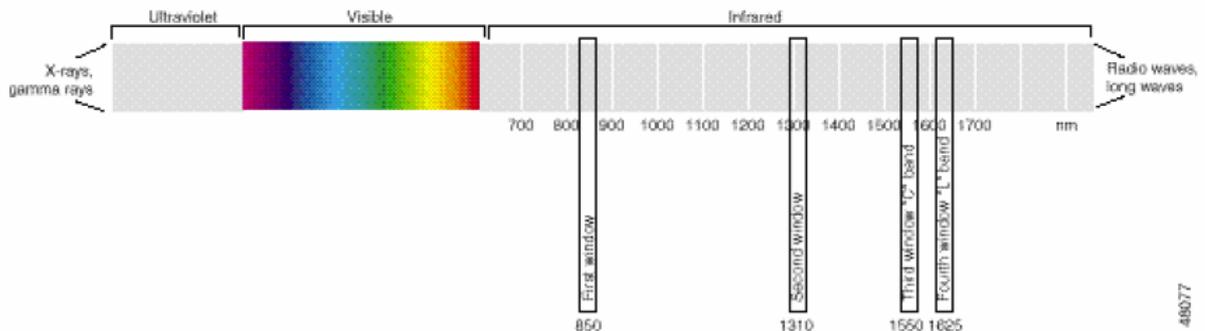


Figura 1.1. Regiones de Longitud de Onda

1.1.1 Desarrollo de la tecnología DWDM. WDM empezó a finales de la década de 1980 usando las dos longitudes de onda muy espaciadas, 1310 nm y 1550 nm, a veces llamado WDM de banda ancha. Una de las fibras se usa para transmitir en un sentido y la otra en el sentido contrario. Es la disposición más eficiente y la que se encuentra normalmente en los sistemas DWDM.

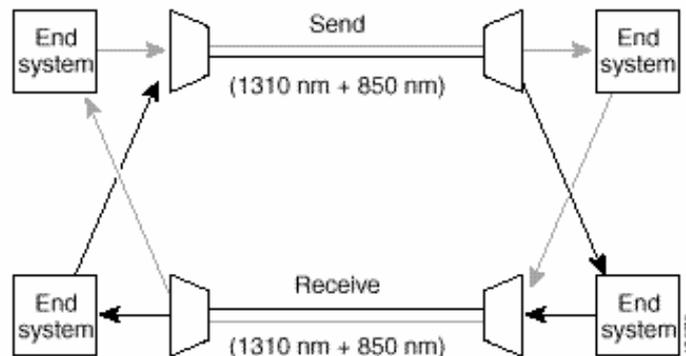


Figura 1.2. DWDM con dos canales

A principio de la década de 1990 vino la segunda generación de WDM, a veces llamada WDM de banda estrecha en que se usaban de 2 a 8 canales. Ahora estos canales están espaciados en un intervalo de unos 400 Ghz en la ventana de 1550 nm. A mediados de la década de 1990 los sistemas DWDM que estaban emergiendo consistían de 16 a 40 canales y un espaciado de 100 a 200 Ghz. A finales de la década de 1990 los sistemas DWDM han evolucionado hasta el punto de que son capaces de tener de 64 a 160 canales en paralelo y espaciados cada 50 o 25 Ghz.

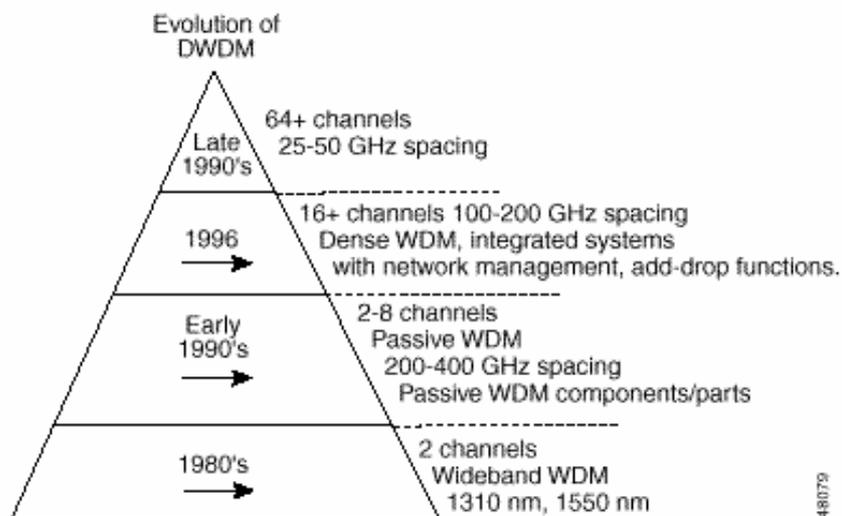


Figura 1.3. Evolución de DWDM

El incremento de la densidad de los canales de la tecnología DWDM ha tenido un dramático impacto en la capacidad de transporte de la fibra, En

1995 cuando los primeros sistemas de 10 Gbps aparecieron, la tasa de incremento en capacidad fue de un múltiplo lineal de cuatro veces cada cuatro años.

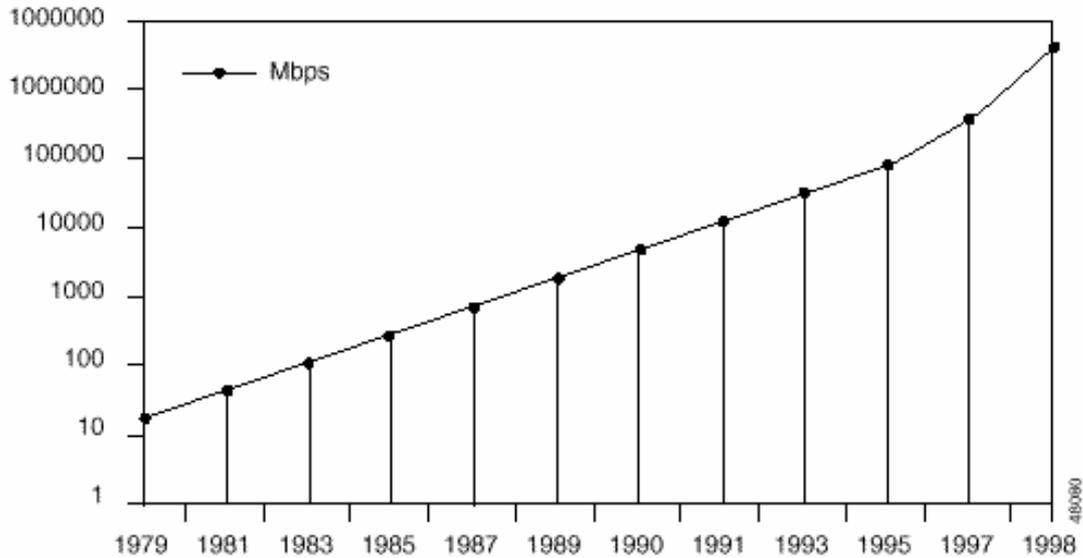


Figura 1.4. Crecimiento en capacidad de la fibra

1.1.2. Funciones del sistema DWDM. En su corazón, el DWDM consta de un pequeño número de funciones de nivel físico. Cada canal funciona con una longitud de onda específica². La longitud de onda se expresa (usualmente en nanómetros) como un punto absoluto en el espectro electromagnético. La luz efectiva a una determinada longitud de onda se confina estrechamente alrededor de su longitud de onda central.

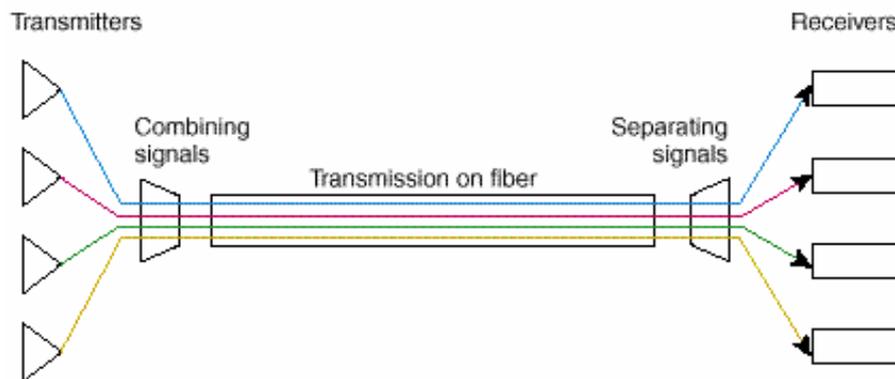


Figura 1.5. Funcionamiento de DWDM

² Esta multiplexación se parece mucho a las emisiones radiofónicas en que cada una de ellas emplea una longitud de onda específica sin interferir con las demás.

El sistema realiza las siguientes funciones principales:

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

1.1.3. Tecnologías posibles. Las redes ópticas a diferencia de las SONET/SDH no dependen del procesamiento eléctrico de datos. Así su desarrollo estará más ligado a la óptica que a la electrónica. En su forma anterior, como se ha descrito previamente, el WDM era capaz de transportar señales sobre dos longitudes de onda espaciadas y de ancho espectro y a una distancia relativamente corta. Para moverse más allá de este estado inicial, WDM necesitó mejoras de las tecnologías existentes e inventar nuevas tecnologías. Las mejoras en filtros ópticos y láseres de banda estrecha permiten al DWDM combinar más de dos longitudes de onda en una fibra. La invención de un amplificador óptico de ganancia

plana acoplado a la línea de fibra amplificando la señal óptica, incrementó dramáticamente la viabilidad de los sistemas DWDM extendiendo de forma importante la distancia máxima.

1.2. COMPONENTES Y OPERACIÓN

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

- En el lado transmisor, láseres con longitud de onda precisa y estable.
- En el enlace, fibra óptica con bajas pérdidas y buen rendimiento en la transmisión en el espectro de la longitud de onda relevante además de amplificadores ópticos de ganancia plana para amplificar la señal en distancias largas.
- En el lado receptor, fotodetectores y demultiplexores ópticos usando filtros de poco espesor o elementos difractivos.
- Multiplexores ópticos add/drop y componentes cross-connect ópticos.

1.3. FIBRAS ÓPTICAS

1.3.1. Cómo trabajan las fibras. El principal trabajo de las fibras ópticas es guiar la luz con la atenuación mínima (pérdida de señal)³. Las fibras ópticas están compuestas de finos hilos de cristal en capas, llamadas “core” y “cladding”, 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 golpea una superficie es reflejada. La reflexión interna total ocurre cuando se cumplen las condiciones siguientes:

³ Las señales ópticas se atenúan a medida que viajan a través de la fibra y periódicamente deben ser regeneradas en el corazón de las redes.

- El rayo pasa de un material más denso a uno menos denso. La diferencia entre la densidad óptica de un material y el del vacío es lo que se llama índice de refracción del material.
- El ángulo de incidencia es menor que el ángulo crítico. Ángulo crítico es el ángulo de incidencia a partir del cual la luz deja de ser refractada y por tanto pasa a ser totalmente reflejada. El “core” de la fibra tiene un índice de refracción más alto que su “cladding”, permitiendo que el rayo que golpea esta superficie lo haga con un ángulo menor al crítico, con lo que es completamente reflejado. Si un rayo no cumple este requisito, será refractado.

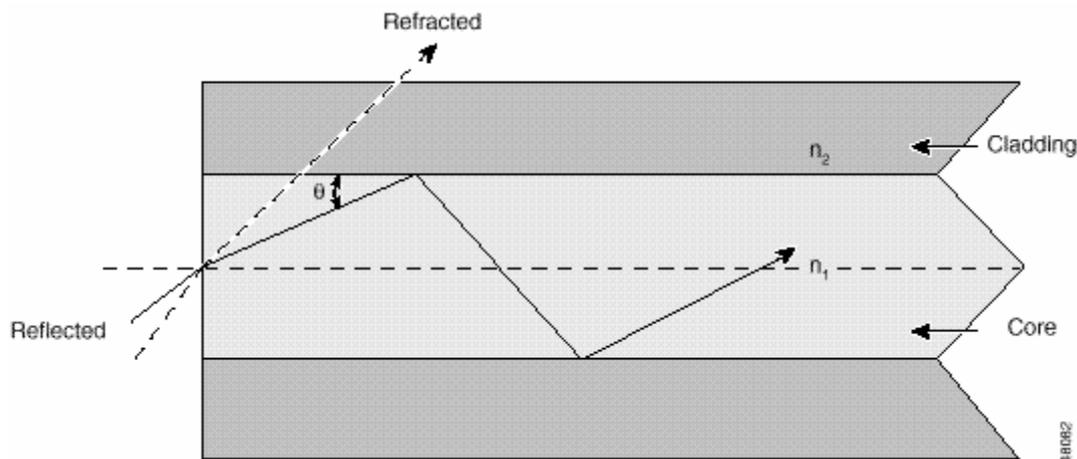


Figura 1.6. Principio de reflexión interna total

Una fibra óptica consiste de dos tipos diferentes de cristal sólido de alta pureza – el “core” y el “cladding” – que están mezclados con elementos específicos, llamados dopantes, para ajustar sus índices de refracción. La diferencia entre los índices de refracción de los dos materiales es la causa de que la transmisión de la luz no atraviese el “cladding” y permanezca dentro del “core”.

1.3.2. Fibra multimodo y fibra monomodo. Hoy hay dos categorías generales de fibra óptica, la fibra multimodo y la fibra monomodo. La multimodo, el primer tipo de fibra que se comercializó, tiene un “core” de mayor diámetro que la fibra monomodo. Su nombre viene del hecho de que numerosos modos, o rayos de luz, se pueden transportar simultáneamente a través de la fibra. Hay que notar que los dos modos deben viajar distancias diferentes para llegar a su destino.

Esta disparidad en cuanto al tiempo de llegada de los modos del rayo de luz que llega se llama dispersión modal. Este fenómeno es la causa de una señal de calidad pobre en la recepción y que limita la distancia de transmisión. Esto es la razón por la que la fibra multimodo no se usa en aplicaciones de área amplia.

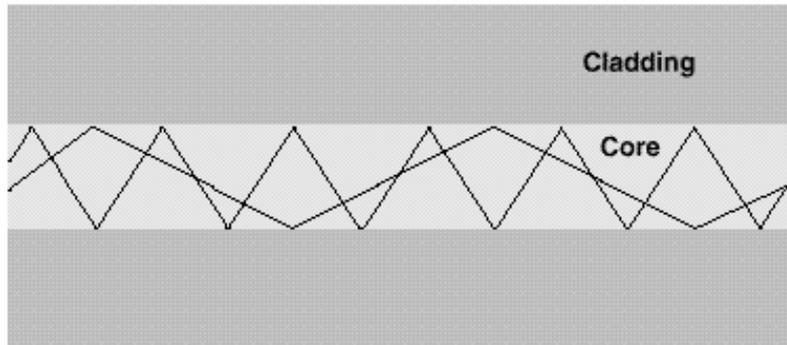


Figura 1.7. Luz reflejada en una fibra multimodo

Para compensar el inconveniente de la dispersión de la fibra multimodo, se inventó la fibra "graded-index". Esto significa que el índice de refracción del "core" disminuye gradualmente desde el centro hacia afuera. La refracción más alta en el centro del "core" ralentiza la velocidad de algunos rayos de luz, permitiendo que todos los rayos lleguen a su destino casi al mismo tiempo y con una reducida dispersión modal.

El segundo tipo de fibra, monomodo, tiene un "core" de diámetro menor que permite que un sólo modo de luz viaje por el "core". Como resultado de ello, la señal se atenúa menos y por tanto se alcanzan mayores distancias. Estos factores contribuyen a una capacidad de ancho de banda mayor que el caso de las fibras multimodo. Para gran capacidad de transmisión y bajas pérdidas, la fibra monomodo se prefiere en aplicaciones de larga distancia y mayor ancho de banda, incluido el DWDM.

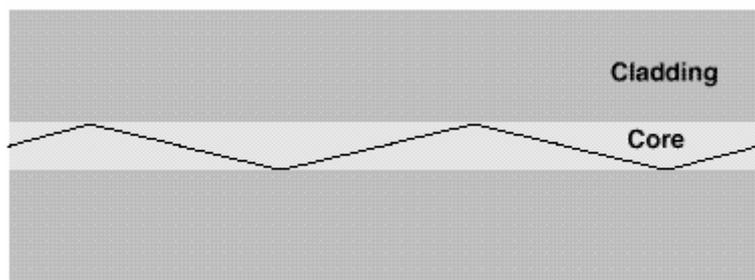


Figura 1.8. Luz reflejada en una fibra monomodo

1.3.3. Diseños de fibra monomodo. Los diseños de la fibra monomodo han evolucionado a medida que pasan los años.

Los tres principales tipos y sus especificaciones ITU-T son:

- NDSF (Non-Dispersion-Shifted Fiber), G 652
- DSF (Dispersion-Shifted Fiber), G 653
- NZ-DSF (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber), G 655

Como se ha explicado antes, hay cuatro ventanas dentro del espectro infrarrojo que ha sido explotado en la transmisión por fibra óptica. La primera ventana, cerca de los 850 nm, se usó casi exclusivamente para aplicaciones multimodo de distancias cortas. Las fibras NDSF, comúnmente llamadas la fibra monomodo estándar, se diseñaron 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.

A medida que la fibra óptica se hacía más común y aumentaban las necesidades de una mayor ancho de banda y mayores distancias, se explotó una tercera ventana, cercana a los 1550 nm, en transmisión monomodo. La tercera ventana o banda C, ofreció dos ventajas: tenía mucha menos atenuación y su frecuencia de operación era la misma que la de los nuevos amplificadores dopados con erbio (EDFAs). Sin embargo sus características de dispersión lo limitan severamente. Esto se solucionó con el uso de láseres de una banda más estrecha y más potentes.

El tercer tipo, NZ-DSF, está diseñado específicamente para cubrir las necesidades de las aplicaciones DWDM. La dirección de este diseño es hacer la dispersión baja en la región de 1550 nm, pero no cero. Efectivamente esta estrategia introduce una cantidad controlada de dispersión, que cuenta los efectos no lineales tales como la mezcla de cuatro ondas que pueden perjudicar el rendimiento de los sistemas DWDM.

1.3.4. Los retos de la transmisión. La transmisión de luz en fibra óptica presenta varios retos que deben tratarse. Estos caen dentro de las tres categorías siguientes:

- Atenuación. Caída de la fuerza de la señal, o pérdida de la potencia de luz, a medida que la señal se propaga por la fibra.

- **Dispersión cromática.** Ampliación de los pulsos de luz a medida que viaja por la fibra.
- **No linealidades.** Efectos acumulativos de la interacción de la luz con el material a medida que viaja por la fibra, cuyos resultados son cambios de la longitud de onda e interacciones entre longitudes de onda.

1.3.5. Atenuación. La atenuación en las fibras ópticas es una causa de los factores intrínsecos, principalmente dispersión y absorción, y de factores extrínsecos, incluyendo defectos del proceso de fabricación, el entorno y la torcedura física. La forma más común de dispersión es la dispersión Rayleigh, causada por pequeñas variaciones en la densidad del cristal a medida que se enfrió. Estas variaciones son más pequeñas que las longitudes de onda que se usan y por lo tanto actúan como objetos de dispersión. La dispersión afecta a las longitudes de onda cortas más que a las largas y limita el uso de las longitudes de onda por debajo de 800 nm.

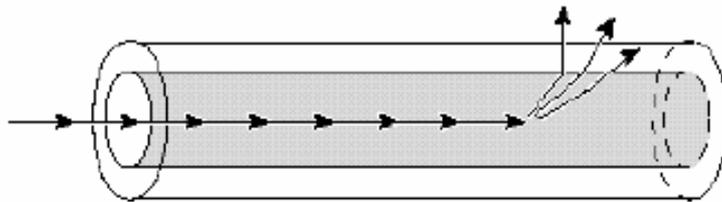


Figura 1.9. Dispersión Rayleigh

La atenuación debido a la absorción es causada por propiedades intrínsecas del propio material, las impurezas del vidrio, y cualquier defecto atómico en el vidrio.

Estas impurezas absorben la energía óptica, haciendo que la potencia de la luz disminuya⁴. Mientras que la dispersión Rayleigh es importante en longitudes de onda cortas, la absorción intrínseca es una cuestión de longitudes de onda más largas y aumenta dramáticamente por encima de 1700 nm. Sin embargo, la absorción debido al agua introducida en el proceso de fabricación de la fibra está siendo eliminada en algunos nuevos tipos de fibra.

⁴ En las redes ópticas anteriores a DWDM, cada fibra transportando una señal óptica, típicamente a 2,5 Gbps, requería un regenerador eléctrico cada 60 a 100 Km.

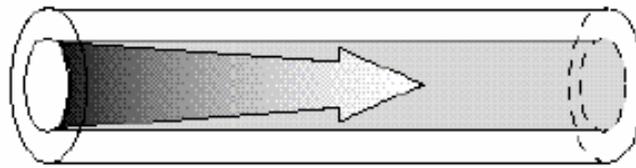


Figura 1.10. Absorción

1.3.6. Dispersión. Es la dispersión de pulsos de luz mientras viaja 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.

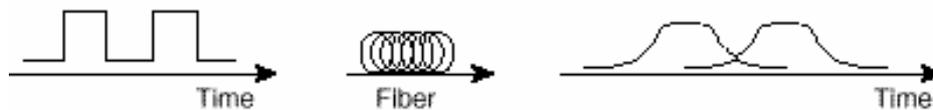


Figura 1.11. Principio de dispersión

Dos tipos generales de dispersión afectan a los sistemas DWDM. Uno de estos efectos, la dispersión cromática es lineal mientras que la otra, la dispersión en modo polarizado (PMD) no es lineal.

1.3.7. Dispersión cromática. La dispersión cromática es consecuencia de que las diferentes longitudes de onda se propagan a diferentes velocidades. El efecto de la dispersión cromática se incrementa con el cuadrado de la velocidad. En la fibra monomodo, la dispersión cromática tiene dos componentes: la dispersión material y la dispersión de guía de onda.

El resultado del fenómeno de la dispersión de la guía de onda es un retardo de propagación en una o más de las longitudes de onda relativas a las demás⁵. La dispersión cromática total junto con sus componentes, está representada en la Figura 1.12 por longitud de onda para el tipo de fibra DSF. Para el tipo de fibra NDSF, la longitud de onda de dispersión cero es 1310 nm.

⁵ Nuevos tipos de fibras ZDSF reducen en mucho estos efectos. El fenómeno también se puede mitigar con los compensadores de dispersión.

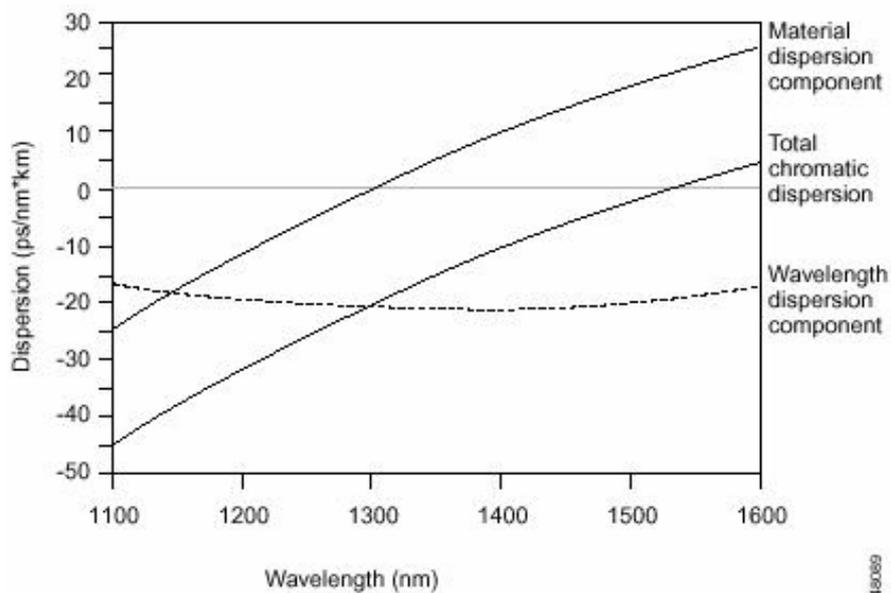


Figura 1.12. Dispersión cromática

1.3.8. Dispersión en modo 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.

1.3.9. Otros efectos no lineales. Además de la PMD, hay 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 fibra óptica. Los más importantes tipos de efectos no lineales están estimulados por la dispersión Brillouin, la dispersión Raman estimulada, la modulación “self-phase”, y la mezcla de cuatro ondas. En DWDM de estos tipos, la mezcla de cuatro ondas es la más crítica.

La mezcla de cuatro ondas está causada 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. En la figura siguiente se muestran tres frecuencias que se interaccionan produciendo una cuarta como resultado de la diafonía y la degradación por la relación señal/ruido.

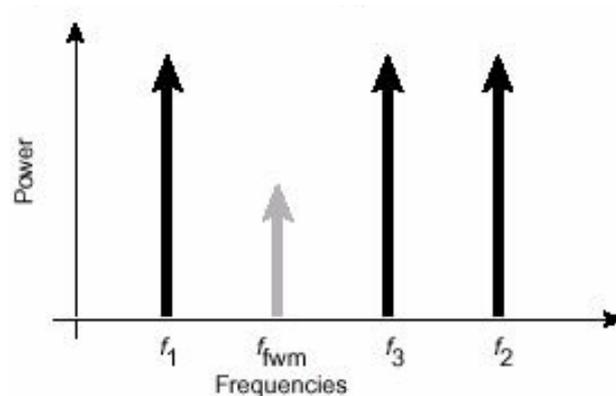


Figura 1.13. Mezcla de cuatro ondas

El efecto de la mezcla de las cuatro ondas es limitar la capacidad del canal del sistema DWDM. La mezcla de las cuatro ondas no se puede filtrar, ni ópticamente ni eléctricamente, y aumenta con la longitud de la fibra.

Debido a la propensión de la mezcla de cuatro ondas, no se puede emplear el tipo DSF para aplicaciones DWDM. Esto aceleró la invención del tipo NZ-DSF.

1.4. FUENTES DE LUZ Y DETECTORES

Los emisores de luz y los detectores de luz son dispositivos activos en extremos opuestos de un sistema de transmisión óptico. Las fuentes de luz, o 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 realizan la función opuesta de la función de los emisores de luz. Son dispositivos opto-electrónicos en el lado receptor que convierten los pulsos de luz en señales eléctricas.

1.4.1. Emisores de luz: LEDs y láseres. La fuente de luz usada en el diseño de un sistema es un asunto importante porque puede ser uno de los elementos más costosos. Sus características son a menudo un factor importante en cuanto a la limitación en el rendimiento final del enlace

óptico. Los dispositivos emisores de luz usados en la transmisión óptica deben ser compactos, monocromáticos, estables y de larga duración.

Monocromático es un término relativo; en la práctica hay solamente fuentes de luz con un rango determinado. La estabilidad de la fuente de luz es una medida de cuán constante es su intensidad y longitud de onda. Se usan dos tipos generales de dispositivos emisores de luz en transmisión óptica, los LEDs (Light-Emitting Diodes) y los láseres (diodos o semiconductores). Los LEDs son dispositivos lentos, útiles para velocidades inferiores a 1 Gbps, tienen un espectro relativamente ancho, y transmiten la luz en un cono relativamente ancho. Estos dispositivos baratos se usan a menudo en comunicaciones con fibra multimodo.

Por otro lado, los láseres semiconductores tienen como característica un rendimiento mejor y se pueden utilizar en aplicaciones con fibra monomodo.

En la figura siguiente se ven los principios generales de como enviar luz láser en una fibra. El chip diodo láser emite luz en una dirección que se debe enfocar en la fibra con una lente y en la otra dirección en un fotodiodo. El fotodiodo, que tiene un ángulo para reducir las reflexiones en la cavidad del láser, es una forma de monitorizar la salida del láser y suministrar la retroalimentación necesaria para los ajustes.

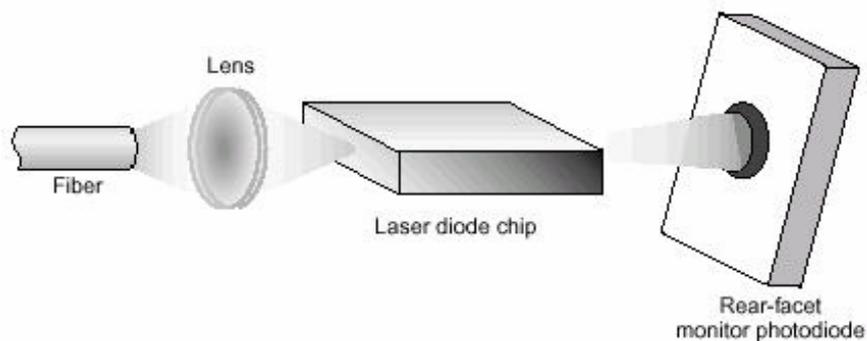


Figura 1.14. Diseño típico de un láser

Los requerimientos para láseres incluyen una longitud de onda precisa, un ancho del espectro estrecho, suficiente potencia, y control del chip (el cambio en frecuencia de una señal en el tiempo). Los láseres semiconductores satisfacen bien los tres primeros requerimientos. Sin embargo el chip puede estar afectado por los medios usados para modular la señal. En los láseres modulados directamente, la modulación de la luz que representa el dato digital se hace internamente. Con la modulación externa, la modulación se hace en un dispositivo externo. En la figura siguiente se puede ver el esquema de una modulación externa.

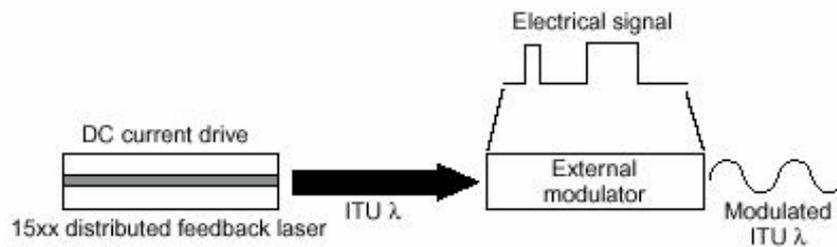


Figura 1.15. Modulación externa de un láser

Los tipos de láseres semiconductores habituales son: láseres monolíticos, 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. Los láseres DFB también tienen frecuencias centradas en la región de los 1310 nm y de 1520 a 1565 nm. El último rango de longitud de onda es compatible con EFDAs.

1.4.2. Tabla ITU

Los láseres DFB enfriados son útiles en longitudes de onda seleccionadas y precisas. El borrador estándar G.692 de ITU define una tabla para láser para 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)
196.1	1528.77	194.7	1539.77
196.9	1529.55	164.6	1540.56
195.9	1530.33	194.5	1541.35
195.8	1531.12	194.4	1542.34
195.7	1531.9	194.3	1542.94
195.6	1532.68	194.2	1543.73
195.5	1533.47	194.1	1544.53
195.4	1534.25	194.0	1545.32
195.3	1535.04	193.9	1546.12
195.2	1535.82	193.8	1546.92
195.1	1536.61	193.7	1547.72
195.0	1537.40	193.6	1548.51
194.9	1538.19	193.5	1549.32
194.8	1538.98	192.4	1550.12

193.3	1550.92	192.4	1558.17
193.2	1551.72	192.3	1558.98
193.1	1552.52	192.2	1559.79
193.0	1553.33	192.1	1560.61
192.9	1554.13	192.0	1561.42
195.8	1554.94	191.9	1562.23
192.7	1555.75	191.8	1563.05
192.6	1556.56	191.7	1563.86
195.5	1557.36		

Figura 1.16. Tabla ITU

Mientras la tabla define un estándar, los usuarios son libres de usar las longitudes de onda de forma arbitraria y elegir de cualquier parte del espectro. Además los fabricantes se pueden desviar de la tabla ampliando sus límites superior e inferior o espaciando menos las longitudes de onda, siendo el valor típico de 50 Ghz, para doblar el número de canales.

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

Se utilizan fundamentalmente dos tipos de fotodetectores, el fotodiodo PIN (Positive-Intrinsic-Negative) y el fotodiodo de avalancha (APD). El fotodiodo PIN trabaja bajo principios similares a los LEDs pero al revés, es decir, la luz es absorbida, no emitida, y los fotones se convierten en electrones en una relación 1:1. 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. Los fotodiodos PIN tienen muchas ventajas, incluido su costo y su fiabilidad, pero los APDs tienen mayor sensibilidad de recepción y mayor exactitud.

1.5. AMPLIFICADORES ÓPTICOS

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 existencia de los amplificadores ópticos (OA), era necesario 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 (Optical-Electric-Optical). Además de ser usados en enlaces ópticos, los amplificadores ópticos también se pueden 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.

1.5.1. Amplificador de fibra dopado con erbio. El EFDA fue una tecnología clave para hacer posible el transporte de gran cantidad de información de que es capaz el DWDM de transmitir 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.

En la figura siguiente se ve un diagrama simplificado de un EFDA. 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 continúa por la fibra, la señal se refuerza. Las emisiones espontáneas en el EFDA también añaden ruido a la señal, como se ve en la figura.

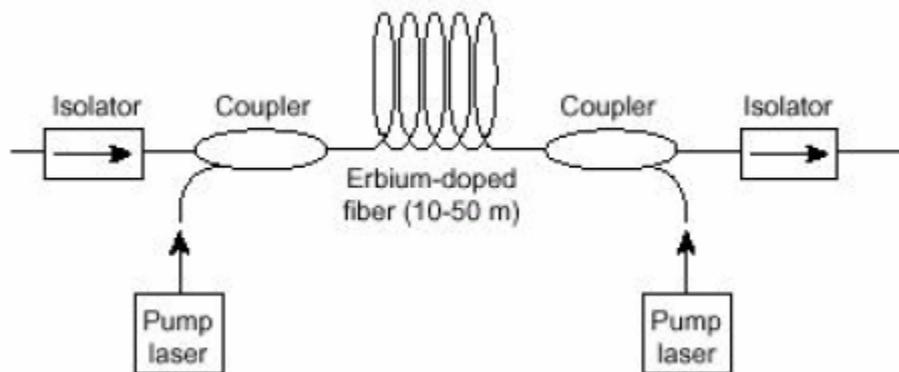


Figura 1.17. Diseño de un amplificador de fibra dopado con erbio

Los parámetros clave de los amplificadores ópticos son la ganancia, la igualdad de ganancia, el nivel de ruido y la potencia de salida⁶.

Típicamente los EFDAs son capaces de ganancias de hasta 30 dB o más y potencias de salida de $+17 \text{ dB}$ o más. Sin embargo los parámetros clave

⁶ Un solo amplificador óptico puede amplificar todos los canales de una fibra DWDM sin demultiplexación y ni procesamiento individualizado, con el coste de un simple regenerador

cuando se selecciona un EFDA son el bajo ruido y la igualdad de la ganancia.

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.

1.6. MULTIPLEXORES Y DEMULTIPLEXORES

Dado que los sistemas DWDM envían señales de varias fuentes sobre una sola fibra, debemos incluir algunos dispositivos para combinar las señales de entrada. Esto lo hace un multiplexor, que toma las longitudes de onda ópticas de múltiples fibras y las convierte en un solo rayo. En el extremo receptor, el sistema debe poder separar los componentes de luz para 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 desmultiplexación 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.

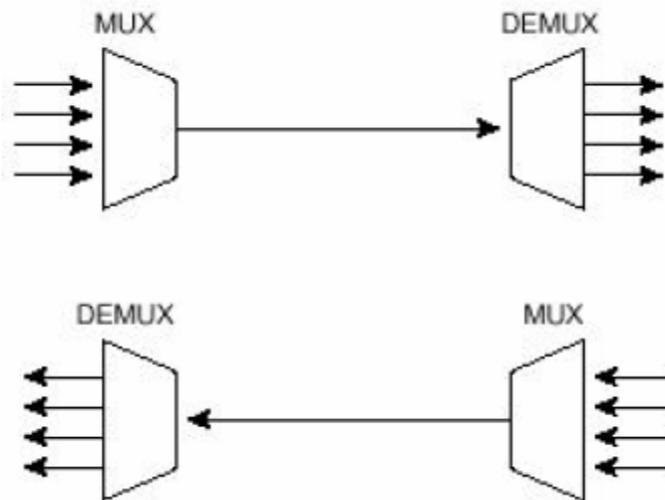


Figura 1.18. Multiplexación y Desmultiplexación en un sistema unidireccional

En un sistema bidireccional, hay un multiplexor/demultiplexor en cada extremo y la comunicación es sobre un solo par de fibras.



Figura 1.19. Multiplexación y Desmultiplexación en un sistema bidireccional

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

1.6.1. Técnicas de multiplexación y desmultiplexación. Una forma simple de multiplexar y desmultiplexar la luz es utilizar un prisma. En la figura siguiente se muestra un caso de desmultiplexación. Un rayo paralelo de luz policromática incide en la superficie de un prisma; cada componente de longitud de onda es refractado de forma distinta. Es el efecto arco iris.

En la luz de salida, cada longitud de onda se distingue del siguiente mediante un ángulo.

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

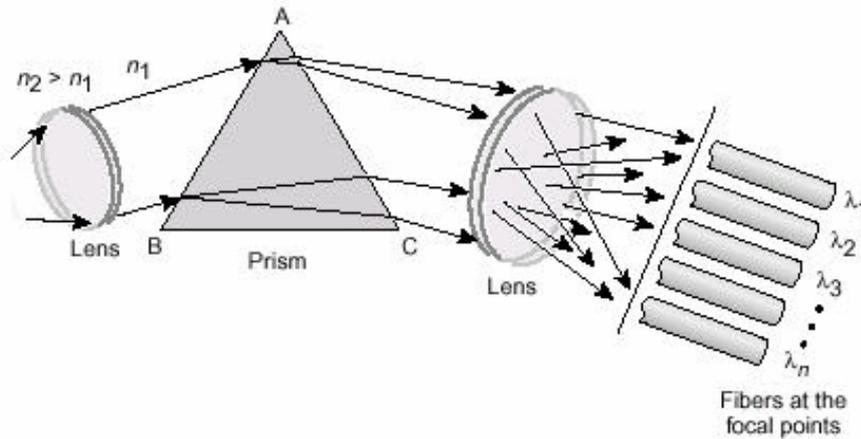


Figura 1.20. Desmultiplexación por refracción en un prisma

Otra tecnología 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 1.21).

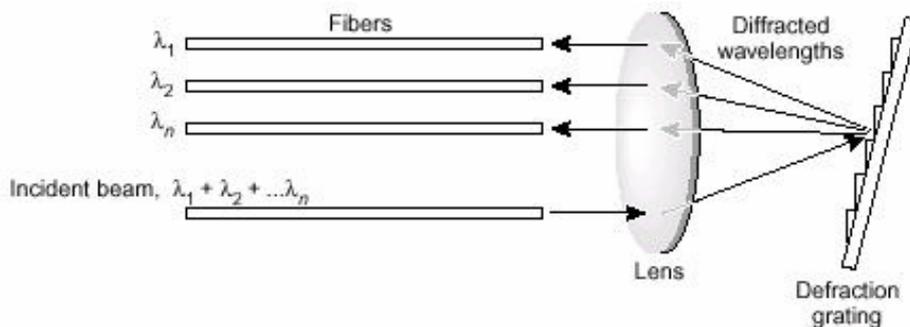


Figura 1.21. Principio de difracción

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 de 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 entra en 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 (Figura 1.22).

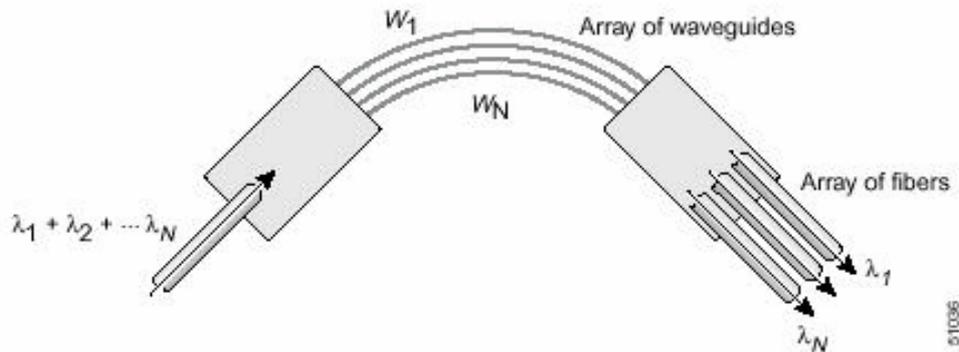


Figura 1.22. Matriz de rejillas de guía de onda

Otra tecnología 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 desmultiplexar 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 desmultiplexar muchas longitudes de onda (Figura 1.23).

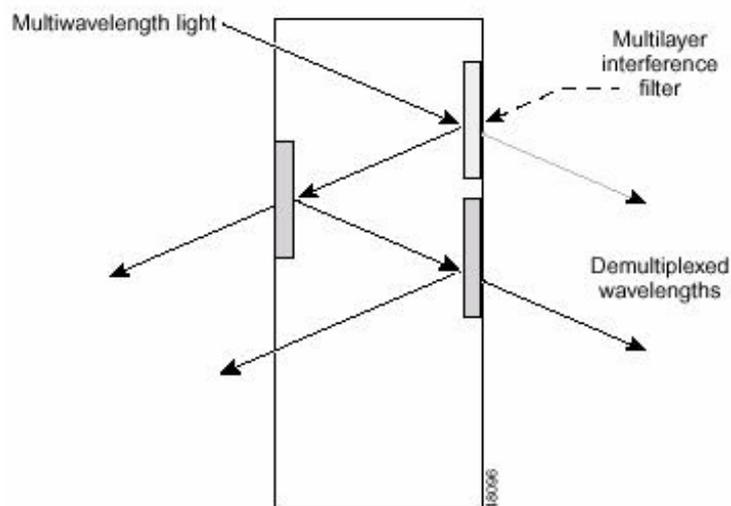


Figura 1.23. Filtro de interferencia multicapa

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, 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. También los son mejores para las cuentas de grandes canales, donde el uso de filtros de película delgada en cascada es impracticable.

1.6.2. Multiplexores ópticos add/drop. Entre puntos de multiplexación y desmultiplexación de los sistemas DWDM, hay un área en la que existen múltiples longitudes de onda. A menudo es deseable remover o insertar una o más longitudes de onda en algún punto del enlace. Un multiplexor óptico add/drop (OADM) realiza esta función. Mas que combinar o separar todas las longitudes de onda, los OADM pueden remover algunas mientras dejan pasar las restantes. Los OADMs son una parte clave en cuanto a las redes ópticas (Figura 1.24).

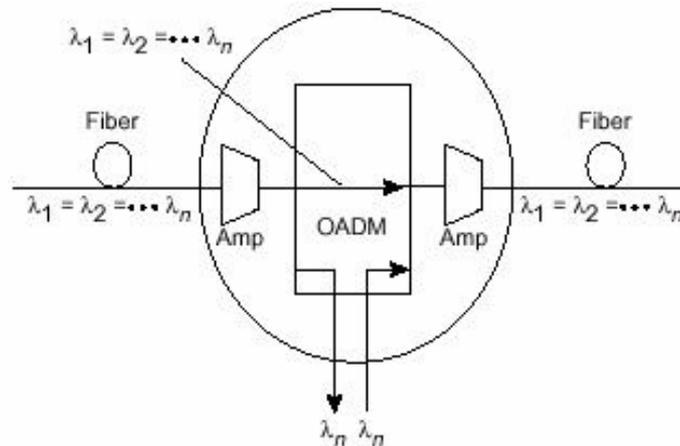


Figura 1.24. Remoción y adición selectiva de longitudes de onda

Hay dos tipos generales de OADMs. La primera generación es un dispositivo fijo que se configura físicamente para extraer una longitud de onda predeterminada mientras se añaden otras. La segunda generación es reconfigurable y capaz de seleccionar dinámicamente qué longitudes de onda se añaden y cuáles se remueven.

1.7. INTERFACES A DWDM

La mayoría de los sistemas DWDM soportan las interfaces estándar ópticas de corto alcance de SONET/SDH a las cuales se puede conectar cualquier dispositivo cliente compatible con SONET/SDH. En los sistemas WDM de larga distancia actuales, acostumbra ser una interfase OC-48c/STM-16c a

una longitud de onda de 1310 nm. Además, también se soportan otras interfaces importantes de redes metropolitanas y de acceso: Ethernet (incluido Fast Ethernet y Giga Ethernet).

En el lado cliente pueden haber terminales SONET/SDH o ADMs, conmutadores ATM o enrutadores; convirtiendo la señal de entrada óptica en precisas longitudes de onda ITU-estándar que se pueden multiplexar.

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

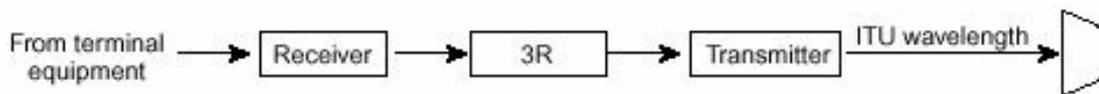


Figura 1.25. Funciones de un Transponder

1.8. OPERACIÓN DE UN TRANSPONDER BASADO EN EL SISTEMA DWDM

La Figura 1.26 muestra una operación extremo a extremo de un sistema DWDM unidireccional.

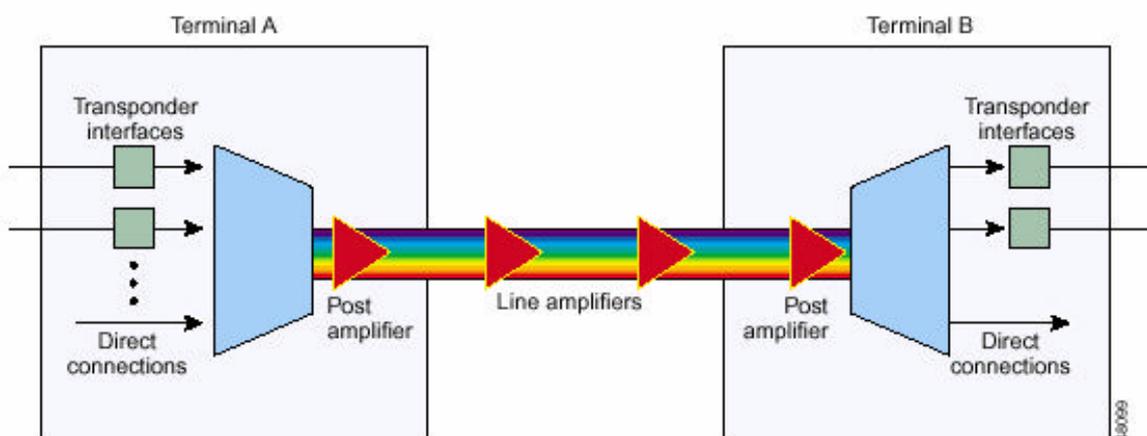


Figura 1.26. Anatomía de un sistema DWDM

Los pasos siguientes describen el sistema de la figura 1.26:

1. El transponder 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.
2. La longitud de onda de cada señal de entrada es mapeada a una longitud de onda DWDM.
3. Las longitudes de onda DWDM del transponder son multiplexadas en una sola señal óptica y enviada por a la fibra. El sistema también puede incluir la posibilidad de aceptar señales ópticas directas al multiplexor.
4. Un post-amplificador refuerza la señal óptica a la salida del sistema
5. Los amplificadores ópticos se usan a lo largo del enlace óptico según necesidades (opcional)
6. Un pre-amplificador refuerza la señal antes de que entre en un extremo del sistema (opcional)
7. La señal de entrada es desmultiplexada en lambdas DWDM individuales.
8. Cada lambda individual DWDM es mapeada según el tipo de salida requerido y enviada a través del transponder.

2. DWDM EN LAS MAN

Las largas distancias son posibles gracias a los progresos en las tecnologías tales como amplificadores ópticos, compensadores de dispersión, y nuevos tipos de fibras, y su resultado es el despliegue inicial de tecnología DWDM en las redes de larga distancia terrestres y transoceánicas. Una vez estas tecnologías son comercialmente viables en el mercado de la larga distancia, el próximo paso es instalarlas en las MAN y eventualmente en las redes de acceso con arquitecturas híbridas de fibra y cable coaxial.

2.1. TECNOLOGÍAS EN LA MAN

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 hay una tendencia al uso de un nivel óptico común para el transporte digital de datos.

2.1.1. SONET/SDH. SONET/SDH ha sido la base de las MAN en la última década, siendo utilizado como el nivel fundamental del transporte tanto para la red de conmutación de circuitos basada en TDM como de las redes de datos. Mientras que SONET/SDH evolucionaron en base a una tecnología muy elástica, siguen siendo costosas sus implementaciones. Las inherentes ineficiencias en la adaptación de los servicios de datos a la jerarquía optimizada de voz y a la inflexible jerarquía de multiplexación, la hacen problemática.

2.1.2. 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 la voz.

2.1.3. Gigabit Ethernet. Gigabit Ethernet (GE) es una probada tecnología que permite la migración desde Ethernet y la integración con la misma. Es relativamente costosa comparada con otras tecnologías que ofrecen la misma velocidad de transmisión, pero no soporta calidad de servicio ni tolerancia a fallos. Debido a que el nivel físico óptico puede soportar distancias más largas que el cable tradicional categoría 5, Gigabit Ethernet sobre fibra se puede emplear con DWDM.

Los últimos avances en 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 “backbone” de las redes, y para accesos WAN.

Ethernet ofrece las ventajas técnicas de una tecnología comprobada, fiable y sencilla. Las implementaciones son estándar e ínter operables, y a un coste muy inferior que el 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.

2.1.4. IP. Es claro de que existe la tendencia a que 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 coste como consecuencia de menos elementos y menos fibra, interfaces abiertos, más flexibilidad y estabilidad.

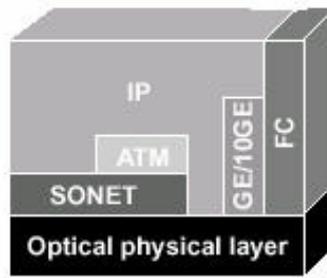


Figura 2.1. Protocolos de Enlace de Datos y Red sobre la capa óptica

2.1.5. Fiber Channel. Fiber Channel es la tecnología predominante de enlace de datos utilizada en SANs (Storage Area Network). Es una sustitución económica para el protocolo SCSI como una interfaz de alta velocidad para aplicaciones tales como copias de seguridad, recuperación de datos y mirroring. Las interfaces Fiber Channel funcionan hoy a 100 Mbps; las interfaces a 200 Mbps serán viables en un futuro y las de 400 Mbps están en pruebas.

Fiber 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. Fiber Channel se puede implementar en un enlace punto a punto, o en una topología mallada con un conmutador.

2.1.6. DPT. DPT (Dynamic Packet Transport) 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 que de otra forma se perdería. 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, mientras los mensajes de control se transportan en la dirección contraria a los datos.

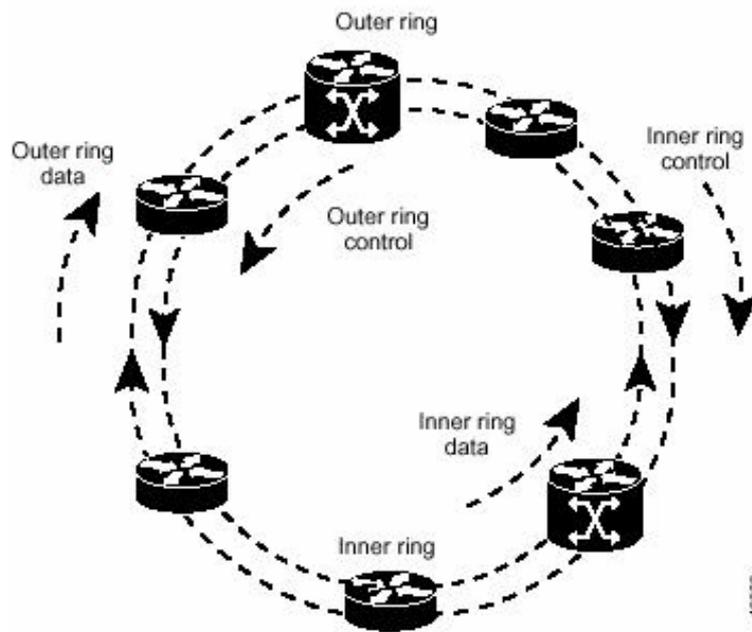


Figura 2.2. Arquitectura de anillo DPT

2.1.7. Soporte al tráfico antiguo. 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 el 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.

2.2. TOPOLOGÍAS Y ESQUEMAS DE PROTECCIÓN PARA DWDM

Las arquitecturas de red se basan en muchos factores, incluyendo tipos de aplicaciones y protocolos; distancias, uso y formas de acceso, y topologías de redes antiguas. En el mercado metropolitano, por ejemplo, las topologías punto a punto se pueden usar para conectar distintas ubicaciones de empresas, las topologías en anillo para conectar sucursales entre sí, y para

accesos residenciales, y topologías malladas se pueden usar para conexiones entre POP y conexiones al “backbone” de larga distancia.

Hoy, las principales topologías que se instalan son punto a punto y en anillo. Con los enlaces punto a punto sobre DWDM entre grandes centros empresariales, solamente hay necesidad de convertir el tráfico de aplicación a longitudes de onda específicas y su multiplexación. Los “carriers” con topologías en anillos lineales pueden envolver anillos enteros basados en OADMs.

Dado que cada vez los cross-connects y conmutadores ópticos son más configurables, estas redes punto a punto y en anillo se interconectarán en mallas, transformando las redes ópticas metropolitanas en plataformas plenamente flexibles.

2.2.1. Topologías punto a punto. Las topologías se pueden implementar con o sin OADM. Estas redes se caracterizan por las ultra velocidades por canal (10 a 40 Gbps), alta integridad y 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.

La protección en las topologías punto a punto se puede hacer de dos maneras. 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, 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 transponders⁷, multiplexores y CPUs redundantes. Aquí la protección ha migrado a los equipos DWDM, con decisiones de conmutación bajo control local.

⁷ Los transponders son interfaces en el lado cliente para recibir la señal de entrada. En el lado DWDM son las interfaces a la fibra óptica que enlazan a los sistemas DWDM.

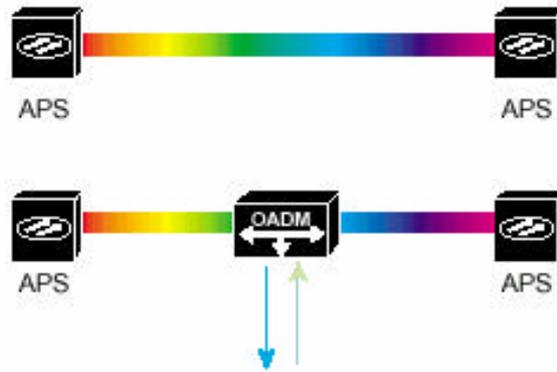


Figura 2.3. Arquitectura punto a punto

2.2.2. Topologías en anillo. Los anillos es la arquitectura más común en las redes metropolitanas con vanos de decenas de kilómetros. 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 DWDM, soportando cualquier tipo de tráfico, o pueden tener un concentrador y unos o más nodos OADMs, o satélites. 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.

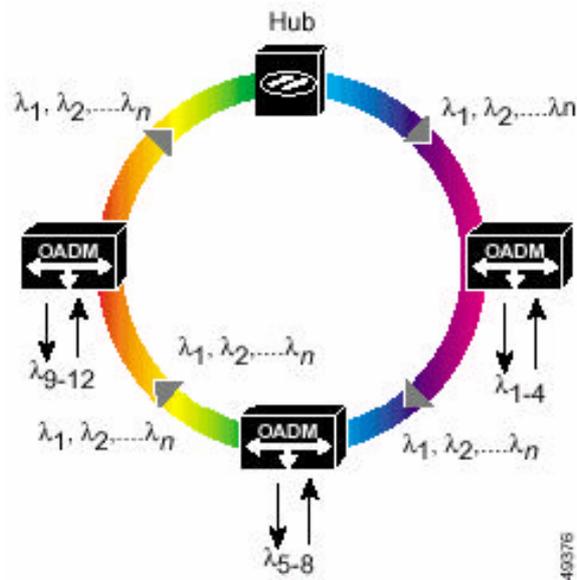


Figura 2.4. Arquitectura en anillo DWDM con Hub y Satélites

La figura 2.5. muestra un esquema UPSR con dos fibras. Aquí el concentrador y los nodos envían a través de dos anillos; pero la misma fibra normalmente se usa para que todo el equipo reciba 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.

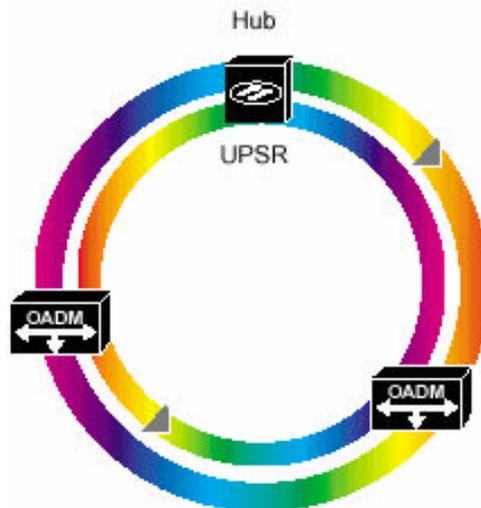


Figura 2.5. Protección UPSR en un anillo DWDM

Otros esquemas, tales como BLSR (Bidirectional Line Switched Ring), permiten al tráfico viajar del nodo transmisor al nodo receptor por la ruta más directa. Debido a esto, el BLSR es preferible en el corazón de las redes

SONET, especialmente con implementaciones de cuatro fibras, que ofrecen redundancia completa.

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

Empezando con los enlaces punto a punto, con los nodos iniciales equipados con OADM para tener flexibilidad, y a continuación interconectándolos, la red puede evolucionar en una malla sin un rediseño completo. Adicionalmente las topologías malladas y en anillo se pueden unir con enlaces punto a punto (Figura 2.6).

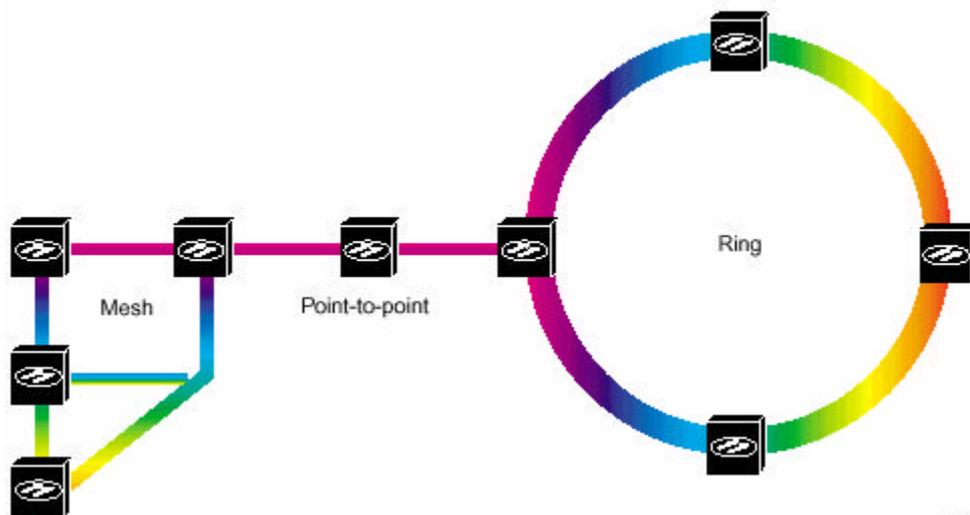


Figura 2.6. Malla, Punto a punto y Arquitectura en anillo

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

ópticas, este concepto se llama camino de luz. Por lo tanto las redes malladas requerirán un alto grado de inteligencia para realizar las funciones de protección y gestión del ancho de banda, incluidos la conmutación de la fibra y la longitud de onda.

Finalmente las redes malladas serán altamente dependientes del software de gestión. Un protocolo basado en MPLS está en desarrollo para soportar caminos enrutados a través de redes ópticas. Además la gestión de la red requerirá de un canal sin estandarizar para transportar los mensajes entre los elementos de la red.

2.3. 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.

2.3.1. 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; éste acostumbra a ser el factor más importante en el transporte a larga distancia. En las MAN, el número de nodos de acceso, tales como OADMs, 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 OTDR (Optical Time Domain Reflectometer). 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 del previsto para el vano de fibra.

El acondicionamiento de la fibra, que incluye su reconexión, 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.

2.3.2. Cuestiones de interoperabilidad. Debido a que el DWDM usa unas 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 (Ver Figura 1.16).

Sin embargo los fabricantes pueden 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 lambda 1 del equipo del fabricante A puede tener asignada una longitud de onda diferente de la lambda 1 del equipo del fabricante B. Por lo tanto es importante estar al corriente de los potenciales problemas de interoperabilidad como consecuencia de ello.

3. PROYECTO PREAMBULO

Pese a que la existencia de infraestructuras de red basadas en fibra óptica no es hoy en día ninguna novedad, lo cierto es que en general las soluciones que se plantean para el transporte de datos sobre dichas infraestructuras vienen derivadas de arquitecturas de protocolos sustentadas normalmente por SONET o SDH.

El proyecto PREAMBULO (*Prototipo de red multiservicio de muy altas prestaciones basada en IPv4/IPv6 sobre multiplexación por longitud de onda*) es un proyecto perteneciente al plan nacional I+D+I 2000-2003 del MCyT, que plantea la instalación, configuración y operación de una red de investigación de fibra óptica en la Comunidad de Madrid, que proporcione un servicio de transporte de datos utilizando IP directamente sobre DWDM, entre los tres nodos de la red: la Universidad Carlos III de Madrid, la Universidad Politécnica de Madrid y Telefónica I+D.



Figura 3.1. Entidades participantes en el proyecto PREAMBULO

3.1. OBJETIVOS

La mayoría de las redes desplegadas en la actualidad que ofrecen servicios IP sobre fibras ópticas con WDM, no ofrecen el servicio IP directamente sobre WDM (2 capas), sino que tienen una arquitectura en 3 capas, de modo que una parte de las funciones se realizan en la capa óptica (WDM), otra parte en la capa SDH (en cada longitud de onda se envían tramas SDH) y a continuación los datagramas IP vienen empaquetados en los contenedores virtuales SDH.

Sin embargo, el uso de IP directamente sobre WDM plantea ventajas (económicas, de gestión, menos sobrecarga) que hacen interesante su desarrollo, a pesar de los temas que quedan todavía por investigar (control del tráfico, recuperación de caídas de enlaces de la red y calidad de servicio).

El proyecto PREAMBULO se fundamenta en la previsión de que a medio plazo se va a producir una implantación masiva de infraestructuras de transmisión WDM que, además de soportar los servicios existentes actualmente, deberán ofrecer una respuesta eficiente en prestaciones y coste a un mercado de servicios dominado claramente por la tecnología IP.

3.2. ARQUITECTURA

La red de PREAMBULO se puede dividir por un lado en un núcleo de red, que proporciona la interconectividad necesaria para proporcionar un servicio de redes de área local virtuales (VLANs) entre los tres centros participantes, y la periferia de la red, compuesta por los distintos equipos de nivel 2 y 3 que se conectan en cada centro a este núcleo para dar un servicio IP o IPv6 a los distintos proyectos de investigación y experiencias que utilizan la infraestructura de PREAMBULO.

3.2.1. Núcleo de la red. El núcleo de la red se puede descomponer en el nivel físico, o de transmisión por fibra óptica, el nivel DWDM y el nivel de enlace.

En el nivel físico, la red está soportada por dos pares de fibras monomodo: uno entre TID y UPM, y otro entre TID y UC3M. Sobre esta configuración

“en línea”, se ha establecido una red DWDM con una topología en triángulo, en la que los tres centros están conectados dos a dos. La configuración de red en el nivel DWDM se representa en la Figura 3.2, en la que se muestran los tres multiplexores DWDM conectados entre sí por los enlaces de fibra óptica.

Los equipos multiplexores son Nortel Optera Metro 5200. Los multiplexores en UPM y UC3M se han desplegado como terminales, de manera que todas las longitudes de onda utilizadas tienen su terminación en ellos. En cambio, el multiplexor en TID se ha desplegado como OADM (optical add/drop multiplexer), de manera que actúa como terminal para las longitudes de onda que soportan la comunicación hacia TID, y deja pasar las longitudes de onda para la comunicación UPM-UC3M, permitiendo, por tanto, una topología en triángulo entre los tres centros.

En cuanto a la conexión hacia la red de cliente, los equipos multiplexores proporcionan interfaces ópticas mediante las tarjetas denominadas OCI (optical-channel interface). En la red desplegada las interfaces utilizadas han sido Gigabit Ethernet-SX (850 nm) y ATM.

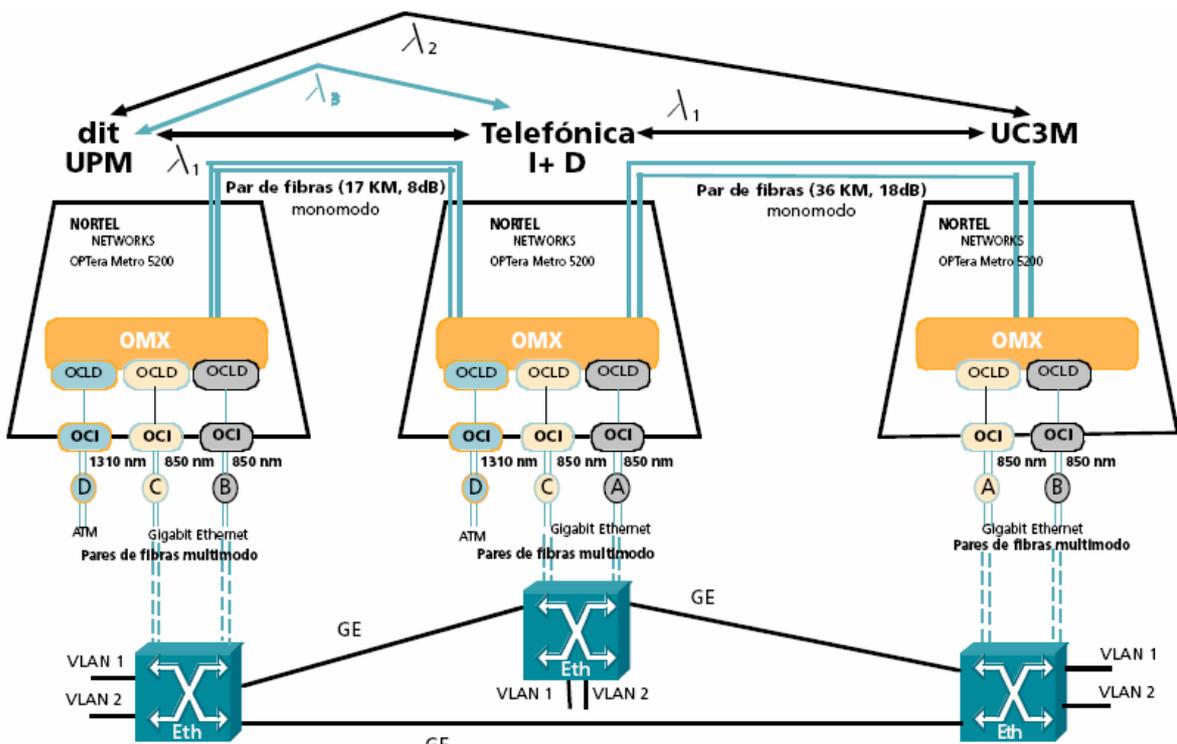


Figura 3.2. Estructura física y lógica de PREAMBULO

En cuanto al siguiente nivel, el nivel de enlace, el proyecto se ha centrado en proporcionar una infraestructura que ofrece un servicio de VLANs entre los tres centros participantes, utilizando los enlaces GE del nivel inferior.

En un principio se evaluó la posibilidad de utilizar los enlaces GE para interconectar directamente routers IP de altas prestaciones, y proporcionar un servicio IP a los usuarios de la red PREAMBULO. Sin embargo, la utilización de conmutadores de nivel 2 ofrece las siguientes ventajas:

- Flexibilidad, versatilidad. Principalmente, la posibilidad de ejecutar diversos experimentos en paralelo y la asignación del ancho de banda disponible en fragmentos de 10/100/1000 Mbps
- Separación, independencia entre tráfico de distintos experimentos.
- Utilización de equipamiento más barato, tanto los conmutadores Ethernet, como las interfaces de nivel 2 a 100 Mbps para routers, sistemas finales (servidores) o conmutadores Ethernet adicionales.

En la decisión adoptada, también se consideró la posibilidad de reutilización de equipamiento ya existente y de los equipos adquiridos cuando el proyecto finalice.

Las características generales de la red de nivel 2 son las siguientes:

- Topología en triángulo entre los conmutadores Ethernet de cada centro (uno o varios por centro), a través de los enlaces GE proporcionados por la red DWDM.
- Los enlaces troncales se configuran como enlaces inter-switch (“trunks”), de forma que transporten tráfico de todas las VLANs.

Cada puerto de los conmutadores Ethernet se configura como perteneciente a una determinada VLAN o como “trunk”, en caso de conectar routers o servidores que pertenezcan a varias VLANs simultáneamente.

3.3. EXPERIENCIAS

Después de proceder con la instalación de la infraestructura de red que se acaba de describir y de realizar las correspondientes pruebas de conectividad tanto a nivel físico como a nivel lógico entre las VLANs definidas, se dio por finalizado el proceso de implantación y se inició a continuación la fase de experiencias propiamente dicha (finales de 2002).

De entre las experiencias más importantes, realizadas hasta el momento, hay que destacar:

- *Pruebas de conectividad*: puesto que la infraestructura a nivel físico no conforma un anillo completo, hubo que recurrir a un conexionado interno de los equipos para hacer las pruebas de conectividad.
- *Transporte de tráfico IPv6*: una de las primeras experiencias que se realizaron fue la migración de la maqueta IPv6⁸ nativa implementada en el proyecto, de tal forma que las conexiones entre UC3M, UPM y TID se han visto notablemente mejoradas.
- *Multihoming IPv6*: está previsto realizar diferentes pruebas de multihoming en IPv6 entre las diferentes sedes del proyecto.
- *Vídeo-conferencias*: la red de PREAMBULO se ha utilizado también para posibilitar la transmisión de eventos científico-tecnológicos (congresos, charlas, etc.)⁹.
- *Experiencias de tele-educación*: la asignatura “*Redes de Banda Ancha*” perteneciente a la titulación de Ingeniería de Telecomunicación e impartida de forma distribuida ente las Universidades Politécnicas de Madrid, Valencia, Barcelona y la Universidad Carlos III, también se ha visto favorecida por el soporte dentro de las sedes de Madrid que se ha tenido por parte de PREAMBULO.
- *Multi-videoconferencias*: se utilizó una herramienta desarrollada por Telefónica I+D¹⁰ que transmitía vídeo y audio multicast sin comprimir, generando unas tasas de tráfico muy apropiadas, además de la realización de multi-videoconferencias, utilizando la herramienta como generador de tráfico en otras pruebas de carga.

⁸ LATIF LADID. *The IPv6 Forum* [on-line]. U.S.A. 10 Noviembre 2004

⁹ PREAMBULO. *Preámbulo Project* [on-line]. Universidad Carlos III de Madrid; Madrid, España. 20 Noviembre 2002.

¹⁰ TELECOM I+D. *Innovación en Telecomunicaciones; XIV jornadas* [on-line]. RedIris, Madrid, España. 23 Octubre 2004

4. PROYECTO EMPIRICO

4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO EMPIRICO

El proyecto EMPIRICO, iniciado en Junio de 2002 y con una duración de 2 años, se basa en el diseño e implementación en laboratorio de un anillo Gigabit Ethernet metropolitano con tecnología DWDM, formado por tres nodos *Optical Add-Drop Multiplexer* (OADM) capaces de insertar y extraer longitudes de onda de forma totalmente óptica, donde se pueden establecer dinámicamente y en tiempo real conexiones ópticas bidireccionales entre dos puntos de la red de forma totalmente transparente. Cada conexión óptica transportará 1 Gigabit Ethernet, pero debido a la transparencia de la capa óptica se pueden transportar otros tipos de tráfico cliente (SDH, ATM, etc.). Para los transmisores y los receptores ópticos de este proyecto la velocidad máxima se ha limitado a 2,5 Gbit/s por longitud de onda.

EMPIRICO está basado en el concepto de redes ASON cuya arquitectura lógica (Figura 4.1) se puede descomponer en tres planos: *el plano de transporte, plano de control y plano de gestión*.

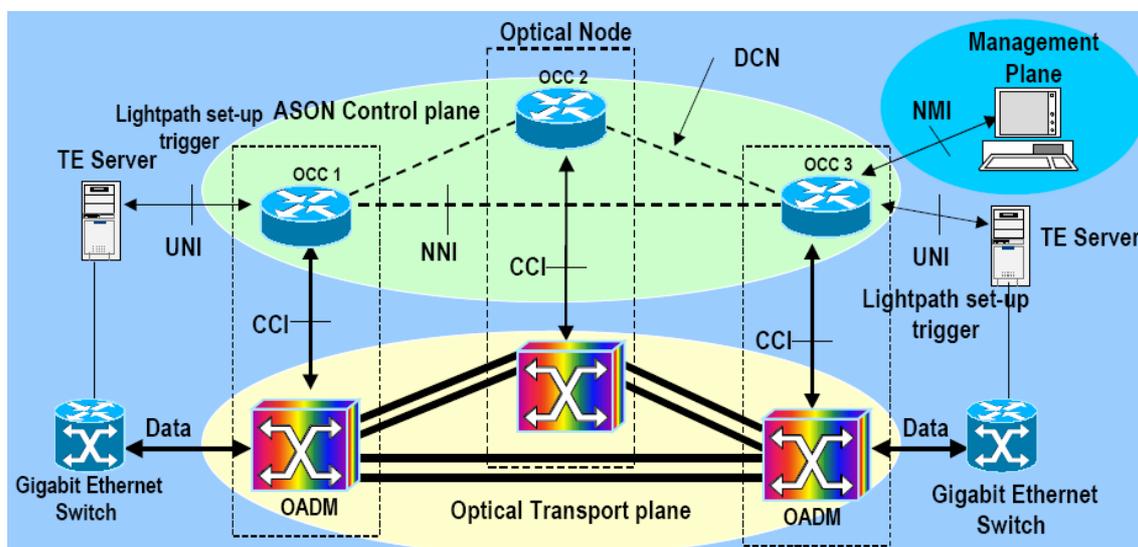


Figura 4.1. Arquitectura lógica del test-bed de EMPIRICO

El plano de transporte es la red de transporte óptica propiamente dicha, y es el responsable de suministrar canales ópticos unidireccionales o bi-direccionales entre usuarios y detectar información del estado de la conexión (como averías o calidad de la señal).

El plano de control soporta el establecimiento/ eliminación en tiempo real y de forma dinámica de conexiones ópticas mediante protocolos de señalización y enrutamiento, utilizando la interfaz *Network Node Interface* (NNI) para comunicarse con los otros nodos y la interfaz *Connection Control Interface* (CCI) para configurar el hardware óptico del nodo.

Finalmente, el plano de gestión lleva a cabo la solicitud de conexiones ópticas *soft-permanent* y, en un futuro, realizará funciones de gestión para los planos de control y transporte, como gestión de averías, configuración de elementos de red, operaciones de contabilidad o seguridad.

4.1.1. Arquitectura propuesta para el plano de transporte. Una red de transporte óptica (OTN) ofrece canales ópticos unidireccionales o bidireccionales transparentes al formato y a la velocidad de la señal cliente que transportan, lo que permite crear una plataforma multi-cliente (IP, ATM, SDH, PDH, Ethernet, etc.) donde cada cliente puede operar con una velocidad independiente de las demás. En el proyecto EMPIRICO se realizará una red óptica experimental de laboratorio basada en un anillo metropolitano DWDM que interconectará diferentes redes de área local (LAN), con interfaces de 1 Gigabit Ethernet, aunque cada canal óptico podrá soportar hasta 2,5 Gbps.

La red experimental del proyecto EMPIRICO está formada por un anillo DWDM con tres nodos ópticos que permiten la extracción e inserción de canales ópticos de forma totalmente óptica. Cada par de nodos ópticos está unido por dos carretes de fibra óptica de 35 km en el *test-bed* del laboratorio, y cada fibra transporta 8 canales de datos DWDM con una separación de 100 GHz. En el proyecto EMPIRICO se realizarán dos implementaciones del anillo óptico: unidireccional y bidireccional¹¹.

4.1.1.1. Anillo óptico unidireccional. Un anillo unidireccional (Figura 4.2) sólo utiliza una de las dos fibras para transmitir los canales ópticos en servicio en un único sentido. La otra fibra está dedicada exclusivamente a la protección.

¹¹ B. Mukhejee, *Optical Communications Networks*, Mc Graw-Hill, New York, 1997.

La protección en la capa óptica se basa en conmutar los canales ópticos que circulan por la fibra de trabajo hacia la fibra de protección. Esta conmutación se realiza a nivel de multiplexado óptico, es decir, se conmuta todo el multiplexado de canales DWDM como si fueran una única unidad.

Este tipo de protección contempla tanto las averías del nodo óptico, como de la fibra de trabajo. Cada nodo óptico dispone de un par de conmutadores ópticos 2x2 que son los responsables de dicha conmutación. Este mecanismo de protección recibe el nombre de *Automatic Protection Switching (APS)*.

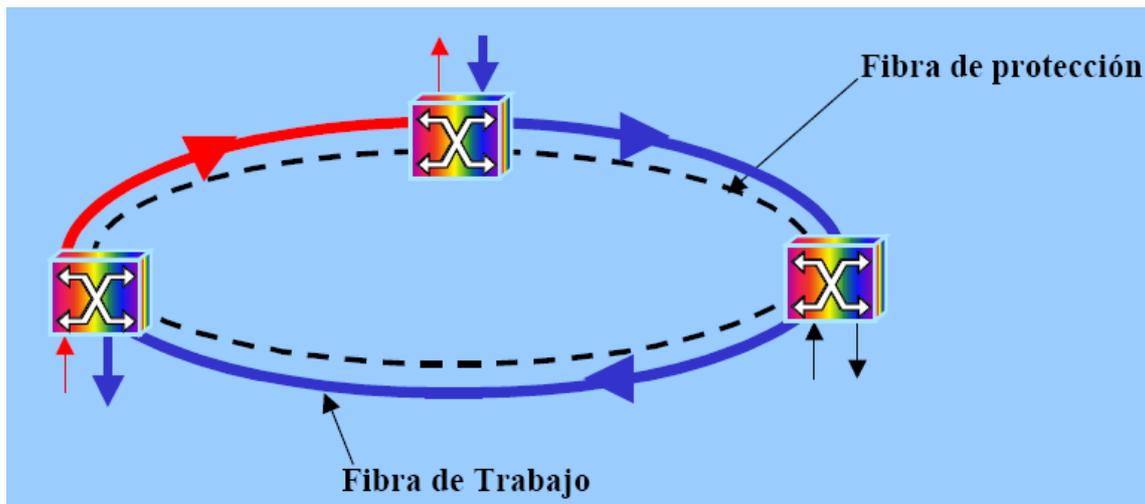


Figura 4.2. Ejemplo de canal óptico bidireccional en anillo unidireccional

La estructura básica de un nodo óptico de un anillo unidireccional (Figura 4.3) está formada por un OADM¹², que permite la inserción y extracción de longitudes de onda de forma óptica, amplificadores ópticos, conmutadores ópticos 2x2, que permiten realizar la protección óptica y monitorizadores, que permiten detectar los niveles de potencia en la fibra óptica.

Además de todos estos componentes ópticos se necesita un controlador que monitorice y configure los diferentes componentes que forman el nodo.

¹² K. A. McGreer, *Arrayed Waveguide Gratings for Wavelength Routing*, IEEE Communications Magazine, Diciembre 1998.

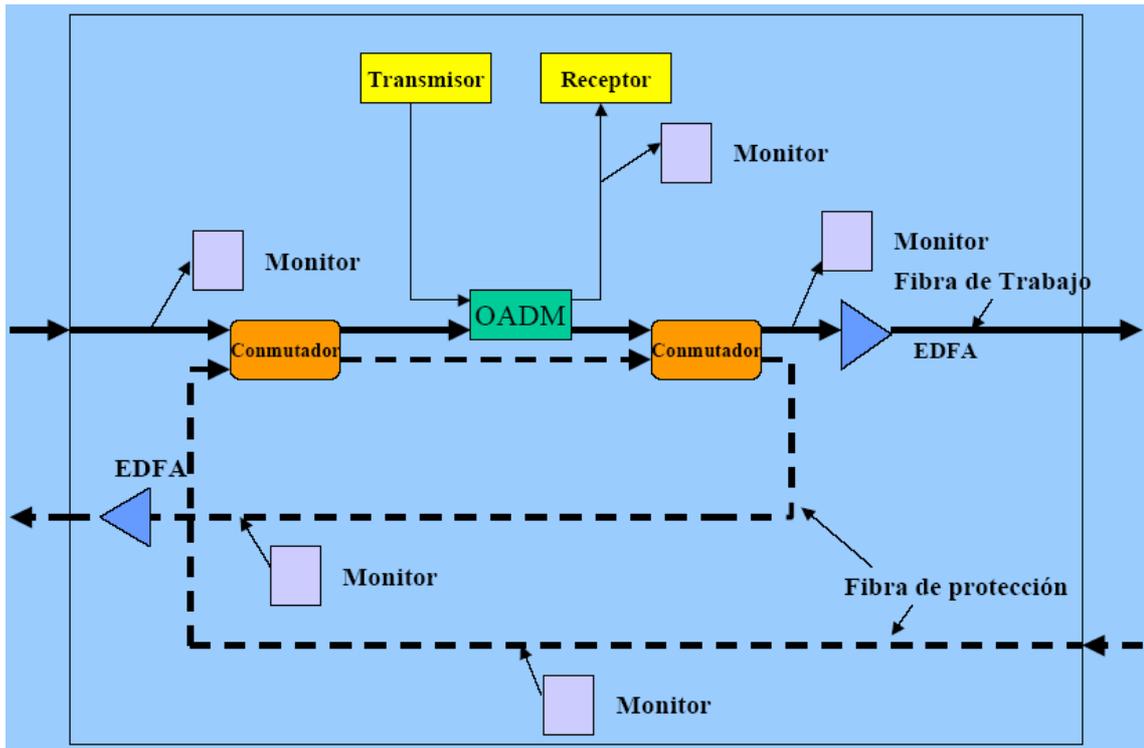


Figura 4.3. Estructura de un nodo óptico de un anillo unidireccional

4.1.1.2. Anillo óptico bidireccional. Un anillo bidireccional (Figura 4.4) utiliza dos fibras para transmitir canales ópticos de servicio, de tal forma que se utiliza una fibra para transmitir en un sentido y la otra para transmitir en sentido opuesto. La principal diferencia entre la estructura de un nodo óptico unidireccional con respecto a la de un nodo bidireccional es la inclusión de otro OADM, y la eliminación de los conmutadores 2x2. Además también se deben incluir dispositivos que dupliquen la señal óptica y conmutadores que seleccionen la mejor señal óptica recibida, para implementar la protección óptica, tal y como se describe más adelante.

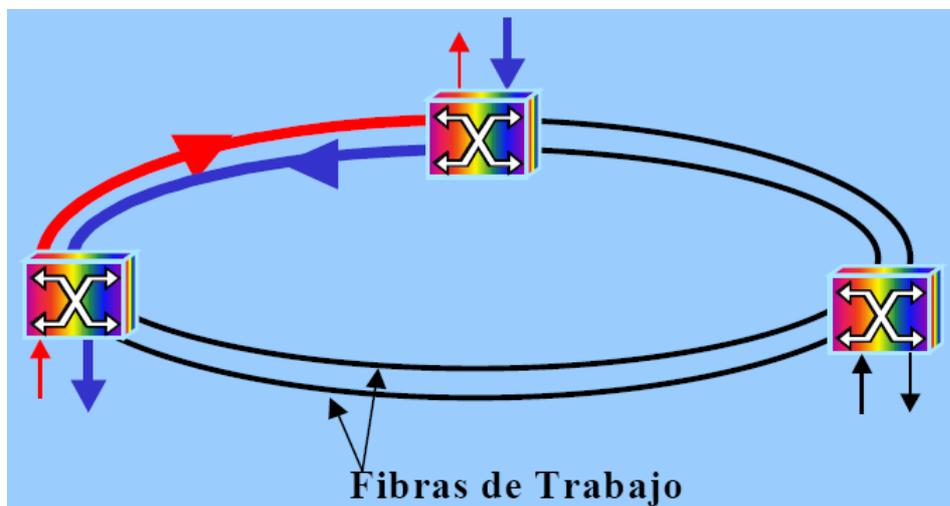


Figura 4.4. Ejemplo de canal óptico bi-direccional en anillo bi-direccional

Básicamente, el funcionamiento de un nodo óptico bidireccional (Figura 4.5) se basa en dos OADMs, uno para cada fibra óptica, ya que se utilizan ambas fibras para transportar canales ópticos de trabajo. La señal óptica a transmitir se duplica en transmisión para enviarla en los dos sentidos del anillo. Análogamente, en recepción se recibirán señales ópticas por ambos sentidos del anillo, reservando una de ellas para la protección óptica. Cuando se deje de detectar potencia en la señal óptica recibida se conmutará para poder recibir la señal óptica del otro sentido del anillo.

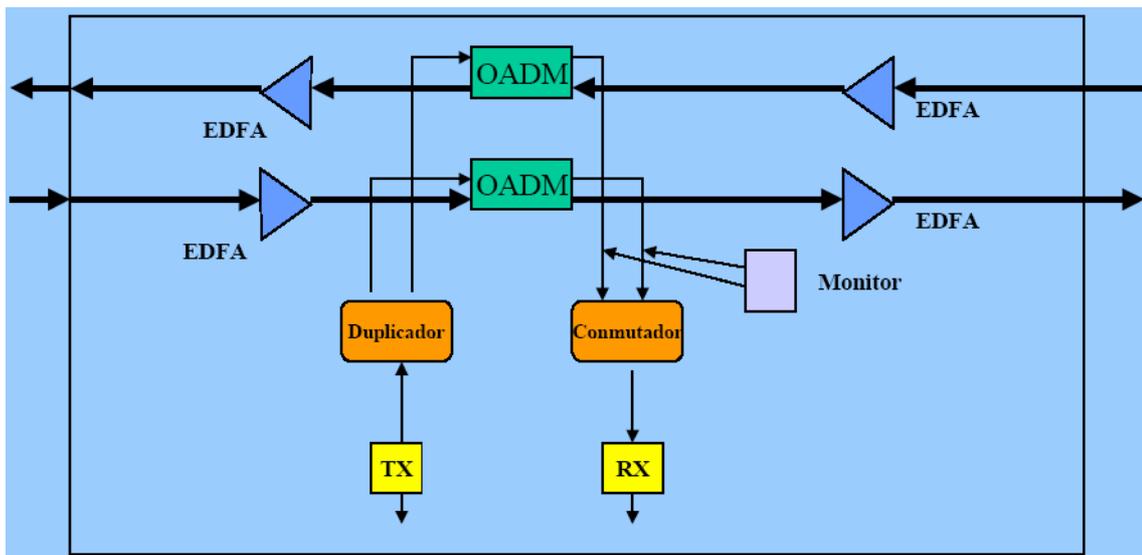


Figura 4.5. Estructura de un nodo óptico de un anillo bi-direccional

4.1.1.3. Dispositivos OADM. En el proyecto EMPIRICO se implementarán un total de 6 OADMs configurables dinámicamente donde cada OADM podrá insertar y extraer hasta 4 longitudes de onda de las 8 disponibles por cada fibra óptica.

La Figura 4.6a ilustra el diagrama de bloques de un OADM reconfigurable dinámicamente que utiliza multiplexadores por división en el espacio (conmutadores) 2x2 entre un multiplexor y un demultiplexor. Se necesita un conmutador 2x2 por longitud de onda, y en función de la configuración del conmutador óptico se permite que dicho canal óptico continúe hacia el demultiplexor y la fibra de salida, o bien que sea extraído del nodo y se inserte un nuevo canal óptico en su lugar.

El OADM basado en conmutadores NxN (Figura 4.6b) es muy parecido al anterior, simplemente se utiliza una matriz de conmutación NxN en lugar del array de conmutadores 2x2. La tecnología más evolucionada es la *Micro-Electro*

Mechanical Systems (MEMS), que se basa en microespejos controlados mecánicamente mediante tecnologías electrostáticas o magnéticas. Existen dos tecnologías: la 2D, que permite actualmente tener un máximo de 32 puertos, y la 3D, que permite tener miles de puertos.

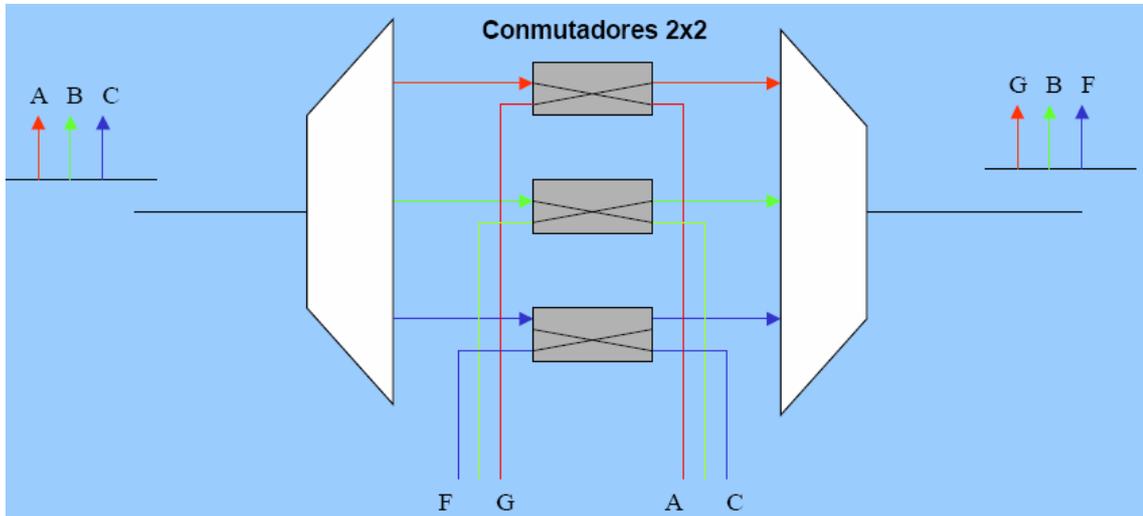


Figura 4.6a. OADM reconfigurable basado en conmutadores 2x2

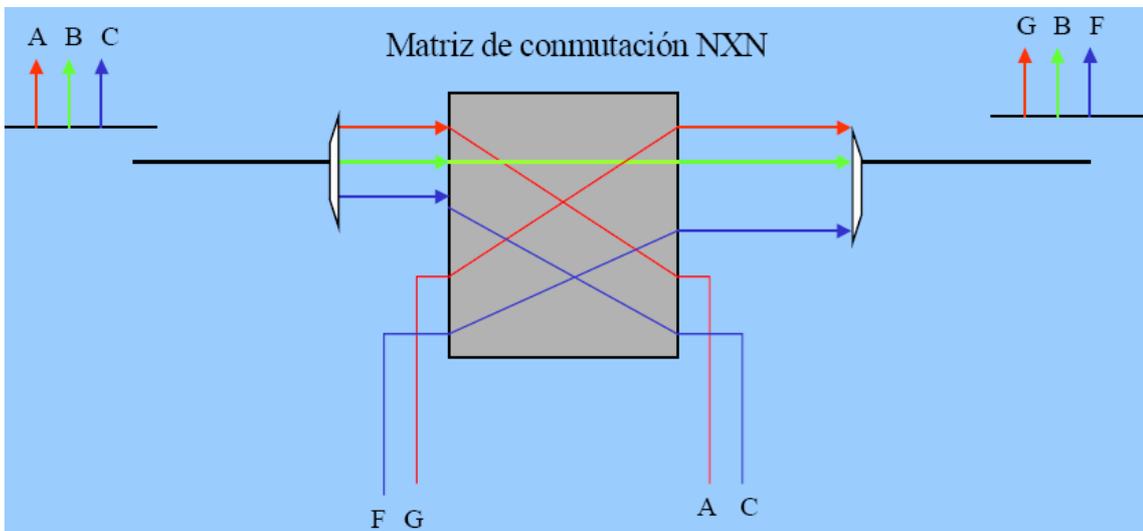


Figura 4.6b. OADM reconfigurable basado en conmutadores $N \times N$

4.1.2. Arquitectura propuesta para el plano de control. El plano de control óptico de una ASON¹³ tiene la función principal de dotar de inteligencia a la red

¹³ ITU-T Recommendation G.8080, *Architecture for the Automatically Switched Optical Network (ASON)*, Noviembre 2001.

de transporte óptica¹⁴, permitiendo, mediante protocolos de enrutamiento y señalización, el aprovisionamiento (establecimiento y eliminación) dinámico y flexible de canales ópticos en tiempo real, ingeniería de tráfico (TE) para la asignación de las rutas y recursos, protección / restauración óptica automática, calidad de servicio y redes privadas virtuales ópticas (OVPN).

El plano de control puede estar basado en protocolos IP o en ATM. Originariamente la *Internet Engineering Task Force* (IETF) propuso basar el plano de control de una red óptica en protocolos de enrutamiento y señalización IP, particularmente en el plano de control MPλS, que es esencialmente el plano de control *Multiprotocol Label Switching* (MPLS) con extensiones para la conmutación de lambdas. Más recientemente, también ha sido propuesto GMPLS, que extiende MPLS para soportar múltiples tipos de conmutación, como la conmutación de paquetes, por división en el tiempo (TDM, que permite la conmutación SONET/SDH), de lambdas o de fibras.

El proyecto EMPIRICO se centra en la descripción, diseño e implementación de los principios arquitectónicos y de los requerimientos funcionales de un plano de control óptico basado en GMPLS¹⁵. Así, el plano de control óptico propuesto (Figura 4.7) está compuesto por una red de comunicación de datos (DCN) y por tres controladores de conexiones ópticas (OCC).

La DCN está implementada por enlaces Ethernet de 100 Mbps transportados en longitudes de onda de 1310 nm, fuera de banda, proporcionando canales de control con conectividad IP entre nodos ópticos vecinos. Los canales de datos multiplexados se transportan en la banda C (1550 nm) por la misma fibra que los mensajes de control, siendo los OCCs los responsables de manipular los recursos ópticos de la red de transporte con el objetivo de gestionar y supervisar el establecimiento y eliminación de las conexiones ópticas mediante el intercambio de mensajes de control.

¹⁴ ITU-T Recommendation G.872, *Architecture of Optical Transport Networks (OTN)*, Noviembre 2001.

¹⁵ E. Mannie et al, *Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture*, IETF (work in progress) draft-ietf-ccamp-gmpls-architecture-*, Marzo 2002.

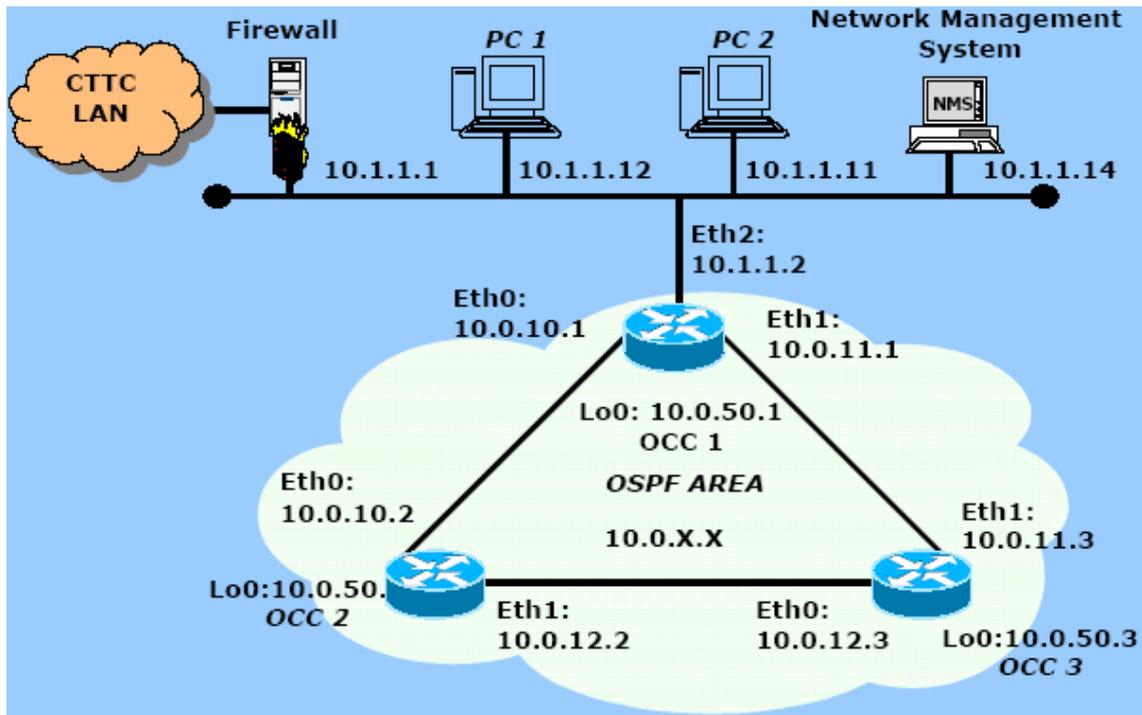


Figura 4.7. Red de comunicación de datos (DCN)

Los OCCs se han diseñado siguiendo una arquitectura (Figura 4.8), cuyos módulos son:

- *Connection controller* (CC): gestiona y supervisa el establecimiento, modificación y eliminación de las conexiones ópticas, asignando rutas y recursos ópticos a cada petición. Es el responsable de la coordinación entre todos los demás módulos.
- *Routing controller* (RC): almacena información de la topología de la red óptica. Consiste en una lista de destinos alcanzables y un enlace de salida recomendado para cada destino, que se actualiza dinámicamente mediante el protocolo de enrutamiento OSPF¹⁶. La función de RC es responder a las peticiones del CC cuando éste necesita información sobre una ruta para establecer un canal óptico.
- *Link Resource Manager* (LRM): almacena información local sobre el estado de los recursos de los enlaces ópticos, tanto los disponibles como los que se utilizan para alguna conexión. La información almacenada es global en caso de utilizarse el protocolo de enrutamiento OSPF con extensiones para GMPLS.

¹⁶ K. Kompella et al, *OSPF Extensions in Support of Generalized MPLS*, IETF (work in progress) ccamp-ospfgmpls- extensions-*, Mayo 2002.

- *Network Call Controller (NetCallC)*: acepta (después de verificar los derechos y políticas de recursos), procesa y valida las peticiones entrantes del servidor de ingeniería de tráfico, por lo tanto este módulo no se implementa para conexiones *soft-permanent*.
- *Protocol Controller (PC)*: mapea los parámetros de las interfaces abstractas de los componentes de control en mensajes transportados por un protocolo para soportar interconexión mediante una interfaz.

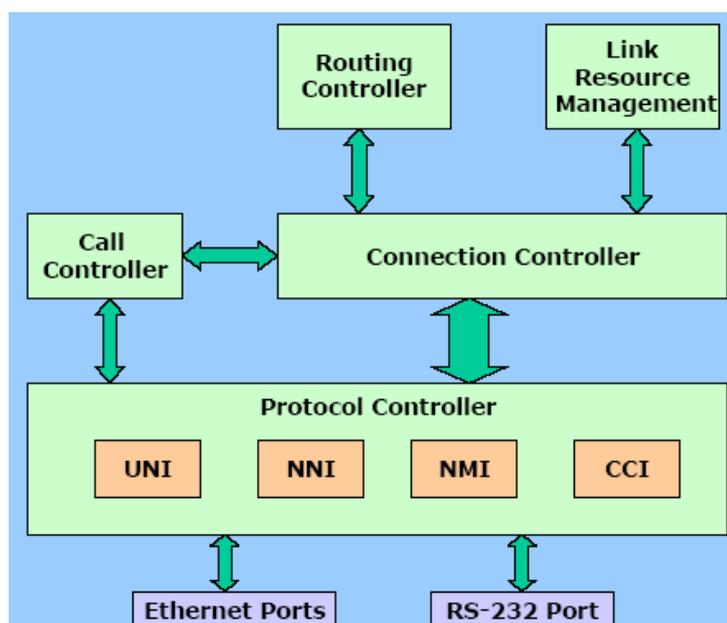


Figura 4.8. Arquitectura propuesta para los OCC's

4.1.3. Arquitectura propuesta para el plano de gestión. El plano de gestión del proyecto EMPIRICO tiene dos ejes básicos: una estructura de información de gestión basada en SMI v2, y una interfaz de comunicación entre el plano de gestión y el de control, que utiliza SNMP como protocolo de transferencia de información de gestión y la DCN para el intercambio de mensajes de gestión.

Por otra parte, el plano de gestión contempla la arquitectura funcional de gestión genérica y para ASON, por lo que está formado por un NMS (Figura 4.1) que contiene un bloque gestor para el plano de control del anillo óptico (cuyo diseño modular permitirá la incorporación de funciones de monitorización de los planos de control y transporte), está conectado a dicho plano de control por la DCN (Figura 4.7), y realiza funciones de sistema de operaciones, transformación y estación de trabajo, que permiten la petición de establecimiento y eliminación de canales ópticos *soft-permanent* y la interpretación de información de gestión.

Hay que remarcar que los OCCs dispondrán de información actualizada sobre sí mismos (clientes de cada nodo óptico, mapeo entre puertos, etc.), sus condiciones de funcionamiento, su vecindario (OCCs y routers activos, averías, estadísticas, etc.) y las conexiones ópticas activas, información que se almacenará según las directrices del *Common Control And Management Protocols Working Group* (CCAMP) de IETF para la modelización y gestión de etiquetas del protocolo GMPLS y será accedida por el NMS en las peticiones de establecimiento y eliminación de conexiones ópticas *soft-permanent*.

CONCLUSIONES

La ley de Moore dice: “La disponibilidad de gran ancho de banda genera nuevas aplicaciones que emplean más ancho de banda, generando de nuevo una necesidad de mayor ancho de banda”, lo cual nos conduce a una necesidad indefinida de fibra y de servicios.

Lo anterior muestra la importancia de investigar acerca de las tendencias en el campo de las telecomunicaciones y su eventual desarrollo.

Colombia, a pesar de ser considerado un país tercermundista, cuenta con una infraestructura de avanzada en el área de las comunicaciones. Sin embargo, si deseamos mantenernos en un nivel de desarrollo tal, que nos permita compararnos con otros países, como los europeos, es necesario investigar las mejoras y proyectos que estos desarrollan y plantear su posible aplicación en nuestro sector industrial.

En esta investigación se lograron plantear las ventajas que ofrece la Multiplexación densa en longitud de onda (DWDM) y se analizó el desarrollo de dos redes IP que utilizan esta tecnología de comunicación.

El DWDM continuará suministrando el 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 el DWDM también se está moviendo más allá del transporte llegando a ser la base de las redes ópticas con aprovisionamiento de longitud de onda y protección basada en malla.

Esta investigación es tan sólo el comienzo de una larga carrera hacia el desarrollo y actualización de las telecomunicaciones en nuestro país. Los estudiantes de la Universidad Tecnológica de Bolívar están invitados a continuar el desarrollo de este estudio, así como a iniciar la implementación de redes ópticas experimentales en el campus de la Universidad.

BIBLIOGRAFÍA

Dutton, Harry J. R. *Understanding Optical Communications*. Research Triangle Park: IBM Corporation; 1998.

Goff, David R. *Fiber Optic Reference Guide*, 2nd edition. Boston: Focal Press; 1999.

Goralski, Walter J. *SONET*, 2nd edition. New York: McGraw-Hill; 2000.

Kaminow, Ivan P., and Koch, Thomas L., eds. *Optical Fiber Telecommunications*. San Diego: Academic Press; 1997.

J.F. Lobo, W. Warzanskyj, *Redes de transmisión todo ópticas: independencia frente a las redes de transporte*, Comunicaciones de Telefónica I+D, Número 23, Noviembre 2001.

Kartalopoulos, Stamatios V. *Introduction to DWDM Technology: Data in a Rainbow*. New York: IEEE Press; 1999.

T. Gimpelson, *Ethernet/SONET debate strong as ever*, NetworkWorld Fusion, Junio 2001.

B. Mukhejee, *Optical Communications Networks*, Mc Graw-Hill, New York, 1997.

K. A. McGreer, *Arrayed Waveguide Gratings for Wavelength Routing*, IEEE Communications Magazine, Diciembre 1998.

ITU-T Recommendation G.8080, *Architecture for the Automatically Switched Optical Network (ASON)*, Noviembre 2001.

ITU-T Recommendation G.872, *Architecture of Optical Transport Networks (OTN)*, Noviembre 2001.

CISCO Company, Manual DWDM. Text Part Number: OL-0884

LONG. *Laboratories Over Next Generation Networks*. IST-1999-20393.

TELECOM I+D. *Innovación en Telecomunicaciones; XIV jornadas [on-line]*. RedIris, Madrid, España. 23 Octubre 2004 [Consulta: 10 Noviembre 2004]. Disponible en: <<http://www.telecom-id.com>>

FIBERNET. *Tecnología D/CWDM [on-line]*. España. Mayo 2004 [Consulta: 10 Noviembre 2004]. Disponible en: <<http://www.fibernet.es>>

LATIF LADID. *The IPv6 Forum [on-line]*. U.S.A. 10 Noviembre 2004 [Consulta: 12 Noviembre 2004]. Disponible en: <<http://www.ipv6forum.com> >

REDIRIS. *Jornadas Técnicas RedIris 2004 [on-line]*. España 1998-2004. [Consulta: 12 Noviembre 2004]. Disponible en: <www.rediris.es>

PREAMBULO. *Preámbulo Project [on-line]*. Universidad Carlos III de Madrid; Madrid, España. 20 Noviembre 2002. [Consulta: 13 Noviembre 2004]. Disponible en: <<http://www.it.uc3m.es/preambulo>>