

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



DISEÑO DE UNA RED IP SOBRE DWDM

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE TELECOMUNICACIONES

PRESENTADO POR:

HENRY OCHOA PACHAS

**PROMOCIÓN
2005- I**

**LIMA – PERÚ
2011**

Diseño de una red IP sobre DWDM

Dedico este trabajo
a mis padres y hermanos por brindarme todo el apoyo,
y a mis amigos que contribuyeron
directa o indirectamente a
llevar a buen término mis estudios universitarios.

SUMARIO

El trabajo en mención describe el diseño e implementación de un sistema de comunicaciones empleando IP sobre una plataforma DWDM, como solución a la necesidad de crecimiento actual de un proveedor de servicios de telecomunicaciones.

Se necesita incrementar la capacidad de ancho de banda en el anillo 1Gigabit Ethernet, para lo cual el proveedor ha determinado el uso de equipamiento con capacidad 10GigabitEthernet, la solución planteada propone usar el anillo de fibra óptica existente, de modo que no sea necesario implementar una nueva planta externa de fibra óptica.

De esta manera, el anillo existente SDH puede también integrarse y hacer uso de la plataforma DWDM, mientras que el anillo 1Gigabit puede subsistir para posterior migración o agregación al anillo 10Gigabit, de modo que el cambio sea progresivo.

La opción planteada permitirá un futuro crecimiento en ancho de banda de hasta 440Gbps, considerando que una vez cubierta la demanda actual empleando 3 longitudes de onda, quedarán 41 longitudes de onda disponibles y cada una con capacidad 10Gigabit.

INDICE

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO	2
1.1 Situación actual	2
1.2 Descripción del problema.....	3
1.3 Objetivos del trabajo	3
1.4 Limitaciones y alcances del trabajo.....	4

CAPITULO II

MARCO TEORICO CONCEPTUAL	5
2.1 Evolución de los sistemas de transporte de datos.	5
2.1.1 IP.....	5
2.1.2 X.25.....	6
2.1.3 Frame Relay	6
2.1.4 SONET/SDH.....	6
2.1.5 ATM.....	7
2.1.6 Ethernet.....	8
2.1.7 DWDM.....	8
2.2 Descripción de la tecnología y arquitectura DWDM	9
2.2.1 Transmisión óptica.....	9
2.2.2 Ventanas de operación	10
2.2.3 Modos de propagación	10
2.2.4 Factores limitantes.....	11
2.2.5 Atenuación óptica	13
2.2.6 Dispersión.....	20
2.2.7 Efectos no lineales.....	25
2.2.8 DWDM.....	29
2.2.9 Configuraciones de nodos DWDM.....	32
2.3 IP SOBRE DWDM	44

CAPITULO III	
INGENIERIA DEL PROYECTO	49
3.1 Red propuesta	49
3.2 Tipo de fibra.....	52
3.3 Recomendación del uso de frecuencias ITU-T.....	53
3.4 Consideraciones de Potencia	54
3.4.1 Atenuaciones de los enlaces entre nodos.....	54
3.4.2 Pérdidas dentro del nodo OADM	56
3.5 Limitaciones por la dispersión.....	61
3.5.1 Dispersión Cromática.....	62
3.5.2 Limitaciones por la dispersión PMD	65
3.6 Limitaciones por FWM	66
3.7 Cálculo de la relación señal a ruido OSNR	66
3.8 Equipamiento DWDM	68
3.9 Resumen del diseño	70
CAPITULO IV	
EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN PLANTEADA	71
4.1 Análisis económico	71
4.1.1 Elección de equipamiento OADM	73
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
ANEXO A	
GLOSARIO DE TÉRMINOS	76
BIBLIOGRAFÍA.....	72

INTRODUCCIÓN

En los últimos años los sistemas de telecomunicaciones se han dotado de alta capacidad (conexiones del orden de 10Gbps), mayor velocidad (retardos para paquetes del orden de 16ns/km) y mejor funcionalidad. En los sistemas ópticos, los métodos de multiplexación son la base para hacer frente a la creciente demanda.

El proyecto propone el diseño de una red IP sobre DWDM para un proveedor de servicios de telecomunicaciones, en la red DWDM se integrará las técnicas de multiplexación DWDM y SDH, con la finalidad de que SDH pueda ser transportada sobre DWDM, y de esta forma seguir usando una infraestructura de fibra que está actualmente en funcionamiento.

En el primer capítulo se muestra el estado de la red actual, se define el problema y el objetivo de obtener la mejor alternativa de solución.

En el segundo capítulo se realiza una revisión de la evolución de las redes de comunicación, el transporte óptico y su evolución hacia una red donde se emplean técnicas de multiplexación para incrementar el ancho de banda sobre el mismo medio físico. También se describen las bondades de emplear IP sobre DWDM eliminando las capas intermedias con la finalidad de mejorar la operación y mantenimiento en términos de gestión.

En el tercer capítulo se analiza a detalle la viabilidad técnica de la propuesta, definiendo los requerimientos del sistema propuesto.

El cuarto capítulo contiene la evaluación económica de la solución planteada, en base a los costos relativos del equipamiento necesario.

Para finalizar en el quinto capítulo se presentan conclusiones que se obtienen como resultado de este trabajo.

CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

En este capítulo se explica la situación actual del sistema de comunicaciones, la problemática actual que tiene este sistema, y el objetivo del trabajo.

1.1 Situación actual

Nuestro caso es el de un proveedor de servicios de telecomunicaciones con servicios TDM e IP. Los servicios IP están soportados en una red MetroEthernet, y los servicios TDM sobre una plataforma SDH.

La red consta de 7 puntos de presencia (POP). Dentro de estos POP se alojan los equipos de ambas plataformas, MetroEthernet y SDH, como se muestra en la Fig.1.1.

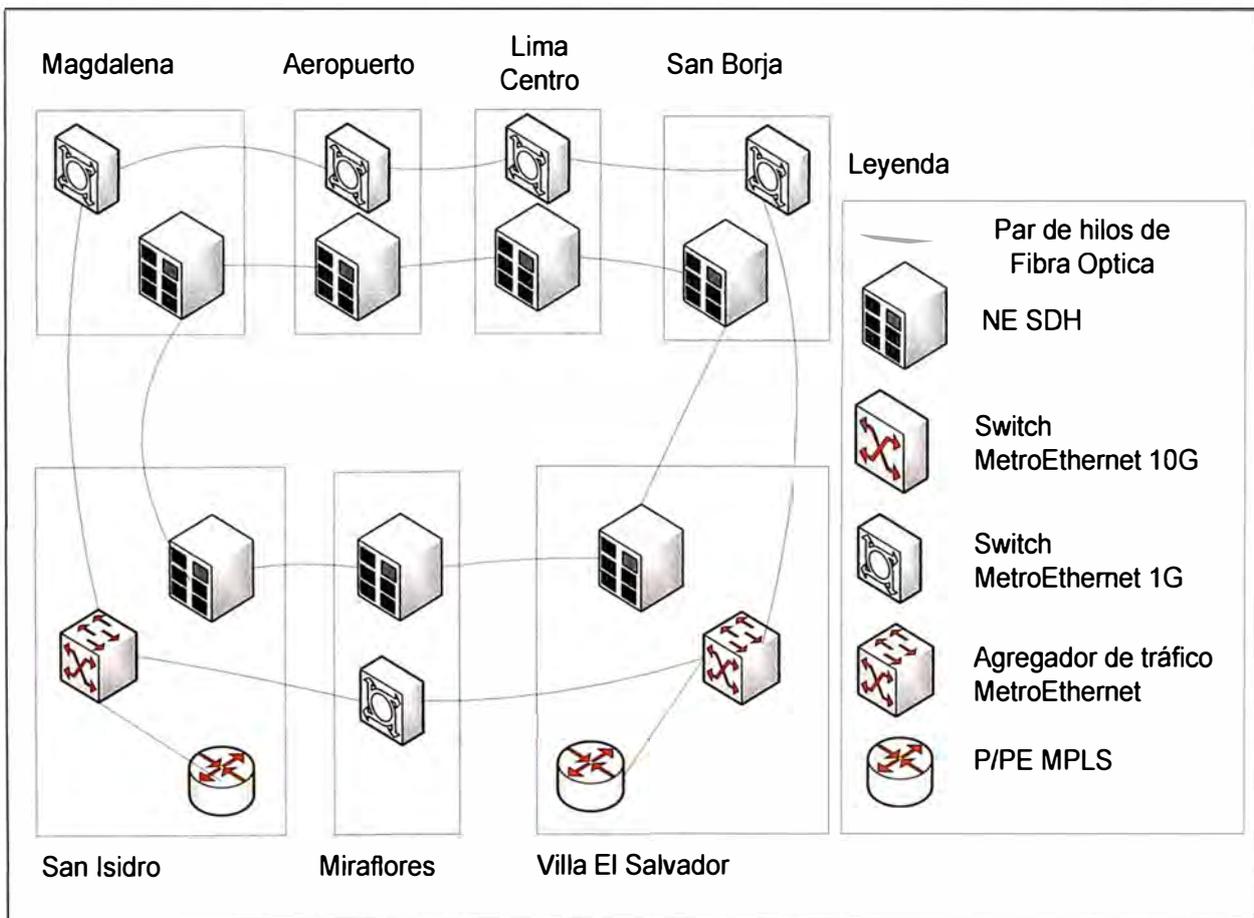


Fig.1.1 Red actual del proveedor de servicios

Cada POP brinda servicios tanto TDM (a través de SDH) como IP (VPN, Internet) dentro de su zona de cobertura.

Los equipos de la plataforma MetroEthernet tienen capacidad de interfaces troncales 1GigabitEthernet. Las interconexiones existentes se dan a través de pares de fibra G.652C.

La red SDH tiene capacidad STM-64 (ver Fig.2.2), también emplea fibra G.652C

Las distancias entre los POP se pueden apreciar en la Fig.1.2.



Fig.1.2 Distancias entre los POP

1.2 Descripción del problema

Se requiere pasar mayor cantidad de tráfico en la red MetroEthernet, debido a la mayor demanda de servicios en la zona de cobertura de los POP San Isidro, San Borja y Aeropuerto. Se va a desplegar un nuevo anillo 10GigabitEthernet, que iguala la capacidad del anillo SDH, por lo cual no se va a poder soportar sobre éste.

El transporte SDH se emplea no sólo para llevar enlaces Ethernet, sino también para transportar señales TDM como líneas privadas de abonados (uso múltiple) o como E1 para telefonía corporativa. Por lo cual, la solución planteada debe ser compatible también con poder incrementar a futuro las capacidades actuales del transporte SDH.

1.3 Objetivos del trabajo

El objetivo de este proyecto es diseñar una red IP/DWDM como mejor alternativa de solución al problema planteado. Se tomará como base para el diseño, equipamiento Nortel (empleando sus datos nominales), pudiendo aplicarse los mismos conceptos a equipamientos de otros fabricantes.

1.4 Limitaciones y alcances del trabajo

Se diseña la nueva red DWDM y el anillo 10GigabitEthernet, se describe cómo soportar las redes actuales sobre la nueva red.

El presente trabajo no contempla:

La motivación del proveedor de servicios para adquirir equipamiento 10GigabitEthernet.

Los precios del equipamiento no son materia de este trabajo, debido a que los proveedores de equipamiento los ofertan junto con servicios de instalación, mantenimiento, capacitación, de acuerdo a distintos factores: equipamiento previamente contratado de la marca, proyección de nuevas adquisiciones futuras, parámetros de garantía (ejemplo: NBD ó reemplazo al siguiente día), acceso a software y herramientas de gestión, etc. que no forman parte del objetivo de diseño. Sin embargo, se incluye información de precios relativos, en base a estudios realizados por un proveedor de equipos.

No se contempla el planeamiento de migración, debido a que contempla factores fuera del alcance de este trabajo (tiempo de afectación, impacto sobre los servicios ya provisionados, establecimiento del orden de nodos a migrar, procedimientos de contingencia, etc.)

CAPITULO II

MARCO TEORICO CONCEPTUAL

2.1 Evolución de los sistemas de transporte de datos.

2.1.1 IP

IP es un protocolo de comunicación creado en 1981, no orientado a conexión cuya finalidad es la comunicación de datos a través de una red de paquetes conmutados. En las redes de conmutación de paquetes el proceso básico de operación consiste en el consecutivo encolado y transmisión de paquetes a través de los nodos de la red hasta alcanzar el equipo terminal destino. Existen dos modalidades de la conmutación de paquetes: datagramas y circuitos virtuales, cada una de estas tiene ventajas y desventajas que la hacen conveniente para diferentes aplicaciones (ver Fig.2.1).

	Circuitos Virtuales	Datagramas
Establecimiento de la comunicación	Requerido	No es necesario
Manejo de errores	Es transparente a los equipos terminales	Efectuado por los equipos terminales
Dirección destino	Requerida sólo en la fase inicial	Necesario en cada uno de los paquetes
Control de flujo	Efectuado por la red	Efectuado por los equipos terminales
Secuenciación de paquetes	Siempre en orden	Los paquetes pueden arribar en desorden
Tecnologías que la usan	X.25, Frame Relay, ATM	Ethernet

Fig.2.1 Comparación de los servicios de conmutación de circuitos virtuales y datagramas.

El crecimiento explosivo de los usuarios de Internet (de mil a dos mil millones de usuarios en el mundo entre los años 2005 y 2010, según UIT), sumado al desarrollo de aplicativos con mayores requerimientos de ancho de banda, han hecho que IP se convierta en el protocolo de red dominante.

Los protocolos TCP/IP asumen una serie de premisas relativas al medio de enlace, que tienen validez en comunicaciones locales, pero no en redes de área extendida. Requerimientos tales como la capacidad de transmitir con retardo mínimo (del orden de milisegundos) o la capacidad de acceder a cualquier computador central desde cualquier otro complican la conexión de redes de área local a través de redes de área extensa.

2.1.2 X.25

A principios de la década de los 70s existían varias redes públicas de datos, que eran operadas por diferentes entidades: corporaciones, gobierno y otras organizaciones, y además cada una de las cuales tenían características internas diferentes. En el tiempo se hizo necesaria la interconexión entre estas redes. La CCITT adoptó en 1976 la recomendación X.25 como el protocolo para interconectar estas redes. Posteriores revisiones del protocolo han sido publicadas en 1980, 1984, 1988 y 1992. Este protocolo es de conmutación de paquetes y opera con circuitos virtuales, en velocidades desde 1200 bps hasta 56kbps.

2.1.3 Frame Relay

Con el tiempo, las limitaciones que presenta X.25 empezaban a ser evidentes: X.25 es un estándar que impone una sobrecarga de procesamiento muy grande. En 1988, el ITU-TS (antiguo CCITT) estableció un estándar (I.122), que describía la multiplexación de circuitos virtuales en el nivel 2, conocido como el nivel de "frame" (trama). Esta recomendación fue denominada Frame Relay. Frame Relay comenzó como un movimiento a partir del mismo grupo de normalización que dio lugar a X.25. Sus especificaciones fueron definidas por ANSI, fundamentalmente como medida para superar la lentitud de X.25, eliminando la función de los conmutadores, en cada salto de la red. Con esta tecnología se puede llegar hasta velocidades de 4Mbps.

2.1.4 SONET/SDH

A partir de la introducción de la tecnología PCM hacia 1960, las redes de comunicaciones fueron pasando gradualmente a la tecnología digital en los años siguientes. TDM o multiplexación por división de tiempo se inventó como una manera de maximizar la cantidad de tráfico de voz que se podía llevar a través de un medio, de manera que más de una llamada telefónica pueda viajar sobre un solo enlace, asignando un slot de tiempo para cada canal, no siendo eficiente debido a que la asignación persiste

aún cuando no hay datos para enviar. Este problema se ve mitigado con la multiplexación estadística empleada por ATM, sin embargo tiene sus limitaciones debido a la electrónica requerida. Para poder soportar la demanda de mayores velocidades binarias surgió la jerarquía PDH. Pero las velocidades de transmisión de esta jerarquía no son las mismas para EEUU y Japón que para Europa, el intercambio entre redes de ambos tipos es compleja y costosa. Todas las carencias presentadas por PDH propiciaron la definición entre 1988 y 1992 de un nuevo estándar mundial para la transmisión digital denominada SDH (Synchronous Digital Hierarchy) o JDS (Jerarquía Digital Síncrona) en Europa, y SONET (Synchronous Optical NETWORK) en Norte América.

Jerarquía de señales SONET/SDH						
Tasa de Bits [Mbps]	SONET	SDH	Capacidad SONET		Capacidad SDH	
			DS1s	DS3s	E1s	E4s
51.84	STS-1, OC-1	STM-0	28	1		
155.52	STS-3, OC-3	STM-1	84	3	63	1
622.08	STS-12, OC-12	STM-4	336	12	252	4
2488.32	STS-48, OC-48	STM-16	1344	48	1008	16
9953.28	STS-192, OC-192	STM-64	5376	192	4023	64
39813.12	STS-768, OC-768	STM-256	21504	768	16128	256

Fig.2.2 Jerarquía de señales SONET/SDH

Mientras que SONET es un estándar concebido por Bellcore y definido por el ANSI para ser utilizado en Norte América, SDH es un estándar definido por el sector de estandarización de telecomunicaciones de la unión internacional de telecomunicaciones ó ITU-T para su uso en todo el mundo y compatible en parte con SONET. Aunque SONET y SDH fueron concebidos originalmente para la transmisión por fibra óptica, existen sistemas radio a tasas compatibles con SONET y SDH. Los modernos sistemas SDH logran velocidades de hasta 40Gbps.

2.1.5 ATM

A principios de la década de los 80, los investigadores estaban intentando desarrollar una tecnología que pudiera utilizarse tanto para el intercambio tanto de voz como de datos. En el periodo comprendido entre 1985 y 1989 el CCITT (actualmente ITU-T) comenzó a desarrollar la RDSI-BA (Red Digital de Servicios Integrados de Banda

Ancha) definiendo la tecnología adecuada para este desarrollo. Las razones que motivaron el nacimiento de la RDSI-BA fueron la demanda de un mayor ancho de banda, la disponibilidad de equipos de transmisión y conmutación de alta velocidad, los avances tanto de hardware como de software de los sistemas disponibles en el usuario final, etc. En 1989 el ITU-T tomó la decisión de utilizar ATM (Asynchronous transfer mode ó Modo de transferencia Asíncrono) como tecnología sobre la cual se desarrollara la RDSI-BA. Ya en 1991 la demanda de los usuarios de servicios con gran ancho de banda y comunicaciones más rápidas habían aumentado considerablemente, lo que produjo la necesidad de definir un mayor número de estándares que rigieran este tipo de comunicaciones. Es así como surgió el Fórum ATM, el cual crea sus propios estándares, pero trabajando conjuntamente con otros estándares, como son los definidos por el ITU-T. El ATM Fórum ha aprobado cuatro velocidades UNI (User Network Interfaces) para ATM: DS3 (44.736 Mbps), SONET STS3c (155.52 Mbps) y 100 Mbps para UNI privados y 155 Mbps para UNI privadas. UNI privadas se refieren a la interconexión de usuarios ATM con un switch ATM privado que es manejado como parte de la misma red corporativa. Aunque la tasa de datos original para ATM fue de 45 Mbps especificado para redes de operadores con redes T3 existentes, velocidades UNI adicionales se han venido evaluando y están ofreciéndose. También hay un alto interés en interfaces, para velocidades E1 (2Mbps) y T1 (1,544 Mbps) para accesos ATM de baja velocidad.

2.1.6 Ethernet

El concepto fundamental de Ethernet es el empleo de un canal de comunicación compartido. El origen de la tecnología está en el sistema de radiocomunicación ALOHA (1970) desarrollado en la universidad de Hawai. La siguiente etapa en la historia de Ethernet fue dada en el laboratorio de investigación de Xerox en Palo Alto, California. En Mayo de 1973 la primera LAN Ethernet transmitió su primer paquete. Para 1990 Ethernet era ya la tecnología de red de área local dominante y para junio de 1995 se publica la especificación para Fast Ethernet sobre par trenzado (100Base-T) con lo cual se inicia una continua tendencia a mejorar el desempeño y velocidad de transmisión de esta tecnología. Ejemplo de ello es el surgimiento de las opciones de operación full-dúplex, redes virtuales y por supuesto los incrementos posteriores en la velocidad de transmisión de Ethernet a 1Gigabit, 10, 40 y 100 Gigabit por segundo.

2.1.7 DWDM

La mayor necesidad de ancho de banda, llevó al desarrollo de WDM (Wavelength Division Multiplexing), tecnología que ofrece la posibilidad de transportar en la actualidad hasta 160 canales de 10 Gbps ó 40Gbps cada uno sobre una única fibra óptica. El

desarrollo de DWDM se inició a finales de los años 80 con el empleo de dos longitudes de onda ampliamente separadas en las regiones de los 1310 nm y los 1550 nm (o en las de 850 nm y 1310 nm) en lo que se denominaba como WDM de banda ancha. A principios de los años 90 surgió una segunda generación de WDM, denominada de banda angosta, en la cual se manejaban de dos a ocho canales. Estos canales estaban espaciados en intervalos de aproximadamente 400 GHz en la región de los 1550 nm. Para mediados de los años 90, surgieron los primeros sistemas densos de WDM (DWDM) manejando entre 16 y 40 canales espaciados entre 100 a 200 GHz. Para finales de los 90s los sistemas DWDM han evolucionado hasta el punto de manejar entre 64 a 160 canales simultáneos en una fibra óptica espaciados a intervalos de 50 GHz o incluso a 25 GHz. Las redes de transporte están pasando por un período de transición, evolucionando de un uso WDM únicamente para incrementar la capacidad en la fibra óptica y como soporte de las redes tradicionales ATM y SONET/SDH basadas en la multiplexación en el tiempo, hacia una red óptica basada en la multiplexación en frecuencia óptica; dejando de ser sólo transporte físico, para hacer ahora también la multiplexación, encaminamiento, supervisión y protección en la capa óptica. Una red totalmente óptica ofrece, entre otras cosas, una menor complejidad, una mayor transparencia respecto a las señales transportadas, un mayor ancho de banda y mayores distancias de transmisión.

2.2 Descripción de la tecnología y arquitectura DWDM

2.2.1 Transmisión óptica

En un principio la tecnología óptica fue implantada para sistemas de transmisión a larga distancia, pero ahora está reemplazando al cable coaxial y par trenzado de cobre en las redes telefónicas locales, las redes de televisión por cable y las redes de datos de área local. Los atractivos de la fibra óptica, y en particular de la fibra óptica monomodo, son su baja atenuación (del orden de 0.1dB), gran ancho de banda (del orden de Tbps), fácil instalación, inmunidad a interferencias, alta seguridad de la señal, y aislamiento eléctrico. Actualmente, y gracias a la aparición de amplificadores de fibra óptica y láseres de múltiples longitudes de onda, la multiplexación por división en longitud de onda es uno de los temas que más atención suscita dentro del campo de las comunicaciones ópticas, pues estos dispositivos permiten incrementar enormemente la capacidad de los sistemas de transmisión, sin alterar las arquitecturas de red implantadas. Es decir, permiten una evolución flexible y económica de las redes actuales, respondiendo a la demanda de mayor ancho de banda por parte de los nuevos servicios.

La transmisión de luz a través de fibra óptica se basa en poder transmitir luz a través de un conducto de fibra de vidrio, y se fundamenta en el fenómeno de reflexión interna total, según el cual, cuando un rayo de luz pasa de un medio hacia otro con menor índice de refracción, al incidir sobre la frontera de los materiales con un ángulo determinado, no pasa ninguna luz a través de la frontera del material. El ángulo a partir del cual el rayo de luz queda totalmente atrapado se denomina ángulo crítico de incidencia. En la Fig.2.3, el rayo 1 se refleja y refracta, mientras que el rayo 2 no se refracta, y para este haz ocurre la reflexión interna total.

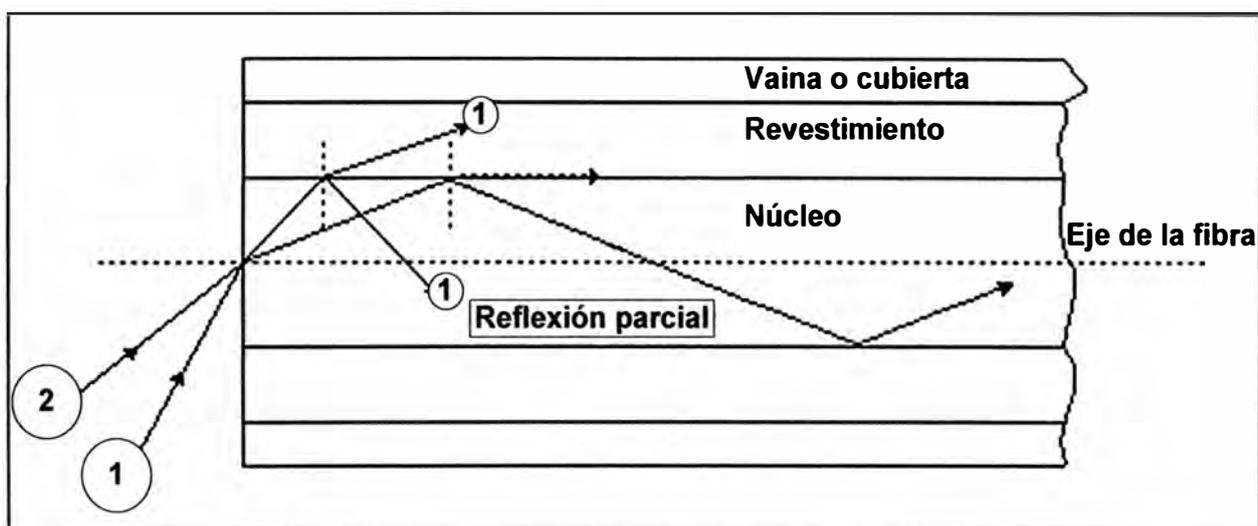


Fig.2.3 Reflexión interna total: El rayo1 se refleja y refracta, el rayo 2 no se refracta

Las señales de luz se atenúan en su recorrido por diversos factores, intrínsecos asociados a las impurezas del material, y extrínsecos asociados a pérdidas por acoplamiento, curvaturas generadas durante la instalación del cable de fibra, etc. Además, la atenuación dependerá también de la longitud de onda de operación.

2.2.2 Ventanas de operación

Dentro del espectro de luz se encuentran las ventanas empleadas para las comunicaciones por fibra óptica y son las longitudes de onda que van desde los 800 hasta los 1625nm (zona infrarroja), que se encuentra dividido en primera ventana (800 a 900nm), segunda y tercera ventanas dividida ahora en bandas: Bandas O (original, de 1260 a 1360nm), E (extendida, de 1360 a 1460nm), S(short, de 1460 a 1530nm), C(convencional, de 1530 a 1565nm) y L(long, de 1565 a 1625nm).

2.2.3 Modos de propagación

Dentro de la fibra, se producen infinidad de reflexiones, que llevan a la superposición de infinitas ondas, que darán una resultante interferencial. A lo largo de la

fibra sólo se pueden propagar los pulsos por reflexiones totales sucesivas, y además se requiere que la resultante interferencial no se anule, es decir, que los diferentes frentes de onda estén desfasados en un número entero de vueltas. Por lo tanto sólo un número discreto (no continuo) de ondas podrá propagarse indefinidamente a lo largo de la fibra, sin desaparecer. Estas ondas que son capaces de propagarse indefinidamente se denominan modos de propagación. Dependiendo del diámetro de la fibra, su índice de refracción, el índice de refracción del medio que las rodea, y de la longitud de onda de la luz que se propaga, las fibras se pueden clasificar en monomodo, cuando sólo se propaga por ella el modo fundamental, o multimodo si más modos son capaces de propagarse. Siendo fijos de los índices de refracción y del diámetro de la fibra, el número de modos que se pueden transmitir irá disminuyendo a medida que aumenta la longitud de onda de la luz, hasta un valor límite (longitud de onda de corte), por encima del cual únicamente se transmitirá el modo fundamental.

2.2.4 Factores limitantes

Dos de los factores limitantes más importantes para las transmisiones a través de fibra óptica son la atenuación y la dispersión, ambos limitan el ancho de banda del sistema o limitan su capacidad de transporte de información (ver Fig.2.4 y Fig.2.5).

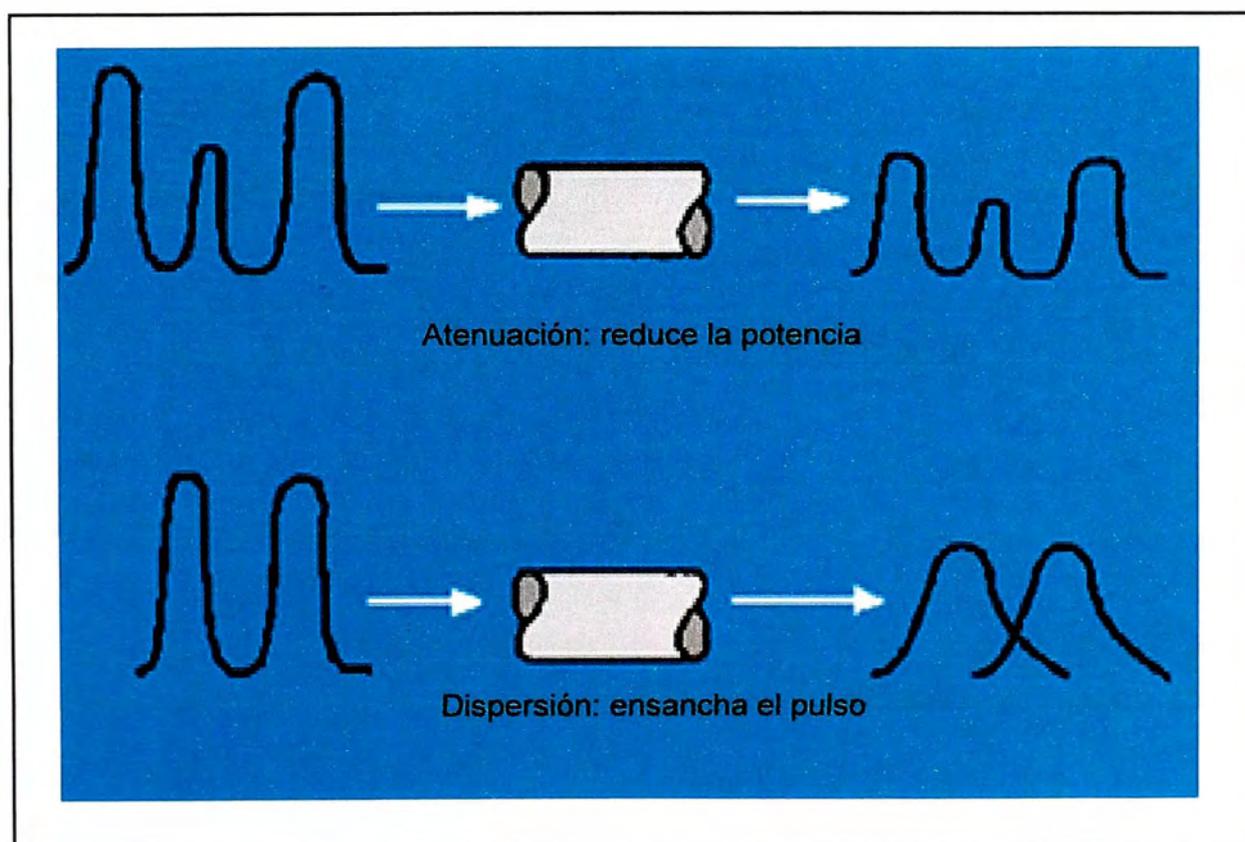


Fig.2.4 Factores limitantes: Atenuación y Dispersión

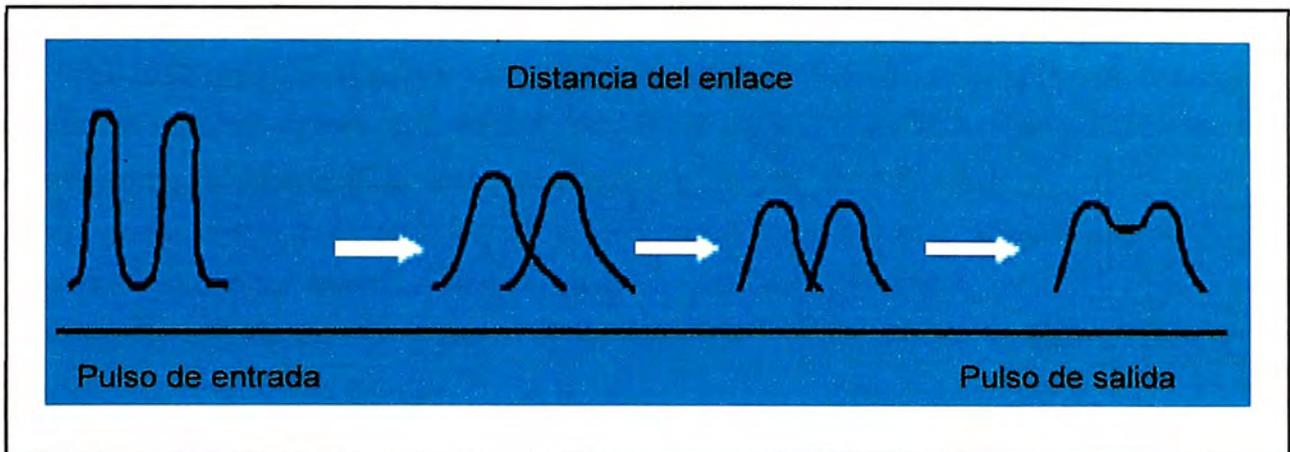


Fig.2.5 Ensanchamiento del pulso y pérdida de potencia

La atenuación debilita la potencia de la señal óptica, mientras que la dispersión ensancha el pulso transmitido, pudiendo llegar a situaciones en las que el receptor no puede distinguir un cero de un uno. En la Fig.2.6 se muestra un cuadro resumen con la clasificación de estos parámetros que limitan la transmisión a través de una fibra óptica.

Atenuación	Pérdidas extrínsecas	Por curvatura
		Por conexión y empalme
		Otras
	Pérdidas intrínsecas	Pérdidas inherentes / fabricación
		Pérdidas por absorción
		Reflexión de Fresnel
Dispersión	Dispersión Cromática	Scattering de Rayleigh
		Dispersión Modal
	Dispersión por modo de Polarización PMD	Dispersión de Material
		Dispersión de Guía de Onda

Fig.2.6 Factores limitantes para una transmisión a través de fibra óptica

2.2.5 Atenuación óptica

La señal pierde potencia conforme viaja dentro de la fibra de vidrio, debido a que existen diversos efectos que contribuyen a la atenuación. Estos efectos se pueden clasificar en pérdidas extrínsecas y pérdidas intrínsecas (ver Fig.2.6).

Las pérdidas extrínsecas se deben a factores ajenos a la naturaleza misma de las fibras, relacionados con los métodos de fabricación e instalación de la fibra.

Las pérdidas intrínsecas se deben a la naturaleza de la fibra, del material empleado en su fabricación, debido a la interacción de la luz con las partículas que componen el material.

2.2.5.a) Pérdidas por curvatura

Se producen cuando se le da a la fibra una curvatura excesivamente pequeña (radio menor a 4 ó 5 cm), provocando así la fuga de modos hacia la cubierta que, en condiciones normales, permanecerían en el núcleo (ver Fig.2.7).

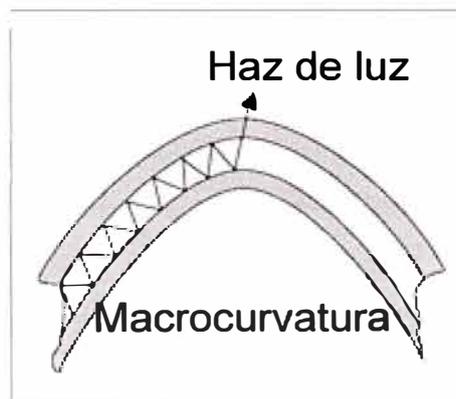


Fig.2.7 Pérdidas por curvatura inducida al momento de la instalación

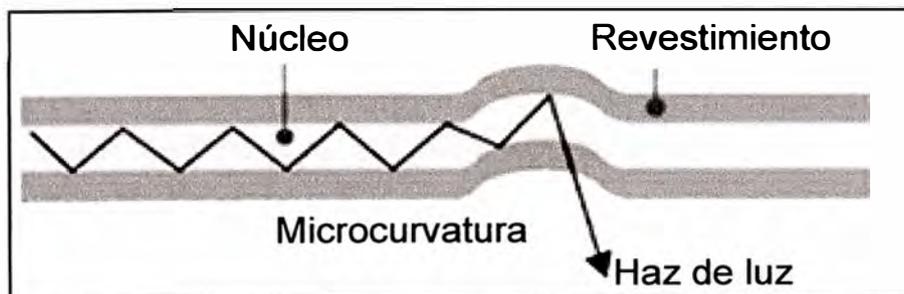


Fig.2.8 Pérdidas debido a microcurvaturas

Se denomina curvatura crítica a la curvatura mínima que debe presentar la fibra, ya que al tener una curvatura menor a la curvatura crítica, la atenuación introducida crece exponencialmente con el radio de curvatura. En la práctica, se trabaja con un radio de curvatura que, como mínimo, debe ser por lo menos 10 veces el diámetro exterior del cable de fibra.

También se presenta debido a la dilatación cuando aumenta la temperatura, ya que la diferencia entre los coeficientes de dilatación térmica entre las fibras y el buffer que las contiene genera que las fibras se curven dentro del tubo (ver Fig.2.8).

2.2.5.b) Pérdidas por conexión y empalme

Estas pérdidas ocurren en todos los empalmes de fibra óptica, siendo los de mayor pérdida los empalmes mecánicos, siendo habitual tener valores de atenuación por conexión y empalme entre 0.1 y 0.2dB, mientras que los empalmes por fusión presentan usualmente pérdidas menores a 0.15dB. Las pérdidas se presentan debido a varios factores, entre ellos la contaminación, burbujas de aire, mal corte de la fibra, desalineamiento en los núcleos de fibra, desadaptación del índice de refracción, desadaptación del diámetro del núcleo, etc.

Las pérdidas de los conectores de fibra óptica dependen del tipo de conector empleado (ST, FC, LC, etc.) y también de la aplicación (monomodo ó multimodo). Estas consideraciones se pueden apreciar en la Fig.2.9.

Tipo	Aplicación	Atenuación de Inserción [dB]
ST	Monomodo/	<0.30 (monomodo)
	Multimodo	<0.60 (multimodo)
SMA	Multimodo	<0.60
MIC	Monomodo/	<0.30 (monomodo)
	Multimodo	<0.50 (multimodo)
FC	Monomodo/	<0.20 (monomodo)
	Multimodo	<0.15 (multimodo)
SC	Monomodo/	<0.20 (monomodo)
	Multimodo	<0.15 (multimodo)
MTRJ	Monomodo/	<0.40 (monomodo)
	Multimodo	<0.30 (multimodo)
LC	Monomodo	<0.20 (monomodo)

Fig.2.9 Tipos de conectores empleados en fibra óptica y sus pérdidas de inserción

2.2.5.c) Pérdidas de inserción

Cuando se conecta un equipo con otro dentro de un nodo, se emplean conectores de fibra óptica para ingresar la luz hacia el dispositivo siguiente. La suma de las pérdidas internas que el equipo le provoca a la señal se denomina pérdida de inserción.

2.2.5.d) Sistemas multicanal

Si tenemos N canales con diferentes longitudes de onda, cada uno con potencia P_i a la entrada de un multiplexor, cuya pérdida de inserción es IL, entonces cada una de las señales se atenúa según la pérdida de inserción. Según esto, podemos considerar que cada canal se atenúa debido a IL, resultando en una potencia intermedia P_{im} de cada canal. Entonces la potencia de salida P_o será igual a la suma de las potencias intermedias P_{im} (ver Fig.2.10). Tenemos entonces:

$$IL[\text{dB}] = 10 \cdot \text{Log}(P_{im}/P_i)$$

Con lo cual:

$$P_{im}[\text{mW}] = P_i[\text{mW}] \cdot 10^{IL[\text{dB}]/10}$$

Y considerando que la potencia de salida es la suma de las potencias de entrada afectadas por la pérdida de inserción:

$$P_o[\text{mW}] = N \cdot P_{im}[\text{mW}] = N \cdot (P_i[\text{mW}] \cdot 10^{\frac{IL[\text{dB}]}{10}})$$

Al pasarlo a decibelios:

$$P_o[\text{dBm}] = 10 \cdot \text{Log}(N \cdot P_i[\text{mW}] \cdot 10^{\frac{IL[\text{dB}]}{10}}) = 10 \cdot \text{Log}(N) + 10 \cdot \text{Log} P_i[\text{mW}] + 10 \cdot \text{Log} 10^{\frac{IL[\text{dB}]}{10}}$$

$$P_o[\text{dBm}] = 10 \cdot \text{Log}(N) + 10 \cdot \text{Log} P_i[\text{mW}] + IL[\text{dB}]$$

Finalmente, obtenemos:

$$P_o[\text{dBm}] = P_i[\text{dBm}] + 10 \cdot \text{Log}(N)[\text{dB}] + IL[\text{dB}] \quad (2.1)$$

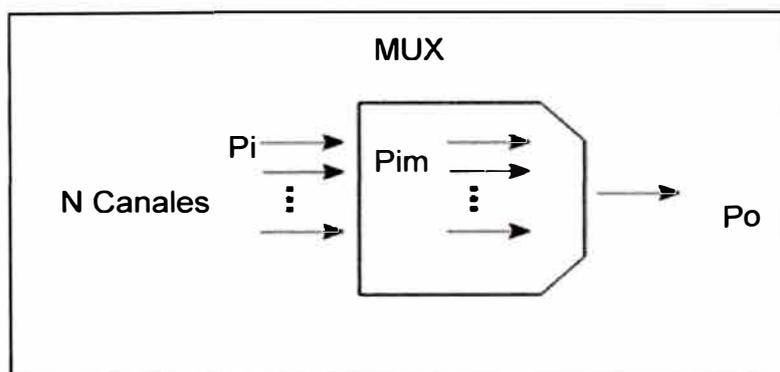


Fig.2.10 Potencia de los canales a través de un multiplexor

Es decir, la potencia de salida en [dBm] es igual a la potencia de un canal de entrada [dBm] afectado por la pérdida de inserción [dB] más 10 veces el logaritmo en base 10 de la cantidad de canales. Nótese que cuando hablamos de una pérdida de inserción de 5dB por ejemplo, en la ecuación (2.1) se debe considerar -5dB.

También se tiene atenuación debida a los compensadores de dispersión (DCM) según la compensación requerida. Asimismo, se debe considerar el uso de atenuadores para no ingresar potencias que saturen los receptores. Es muy común el uso de VOA (atenuadores ópticos variables) con esta finalidad. Existen también eVOA (electronic VOA), donde el valor de atenuación se puede fijar por software, cuyo uso está asociado a protocolos de autocompensación de potencia.

Por ejemplo, en la Fig.2.11, tenemos una señal multiplexada de N canales que llega al OADM con una potencia total de $-12\text{dBm} + 10 \cdot \text{Log}(N)$, lo cual indica que cada canal tiene una potencia de -12dBm . Todas las potencias son por canal, y el factor $+ 10 \cdot \text{Log}(N)$ representa el hecho de que la señal multiplexada es la suma de las potencias de cada canal.

El multiplexor de bandas L/C tiene una pérdida de inserción promedio de 1dB, en esta salida se ingresa un VOA debido a que el preamplificador siguiente requiere que la señal tenga una potencia de -20dBm . A salida del preamplificador, se instala un VOA debido a que el DCM requiere un ingreso de -10dBm . El DCM a su vez atenúa 5dB, por lo que a su salida hay -15dBm de potencia.

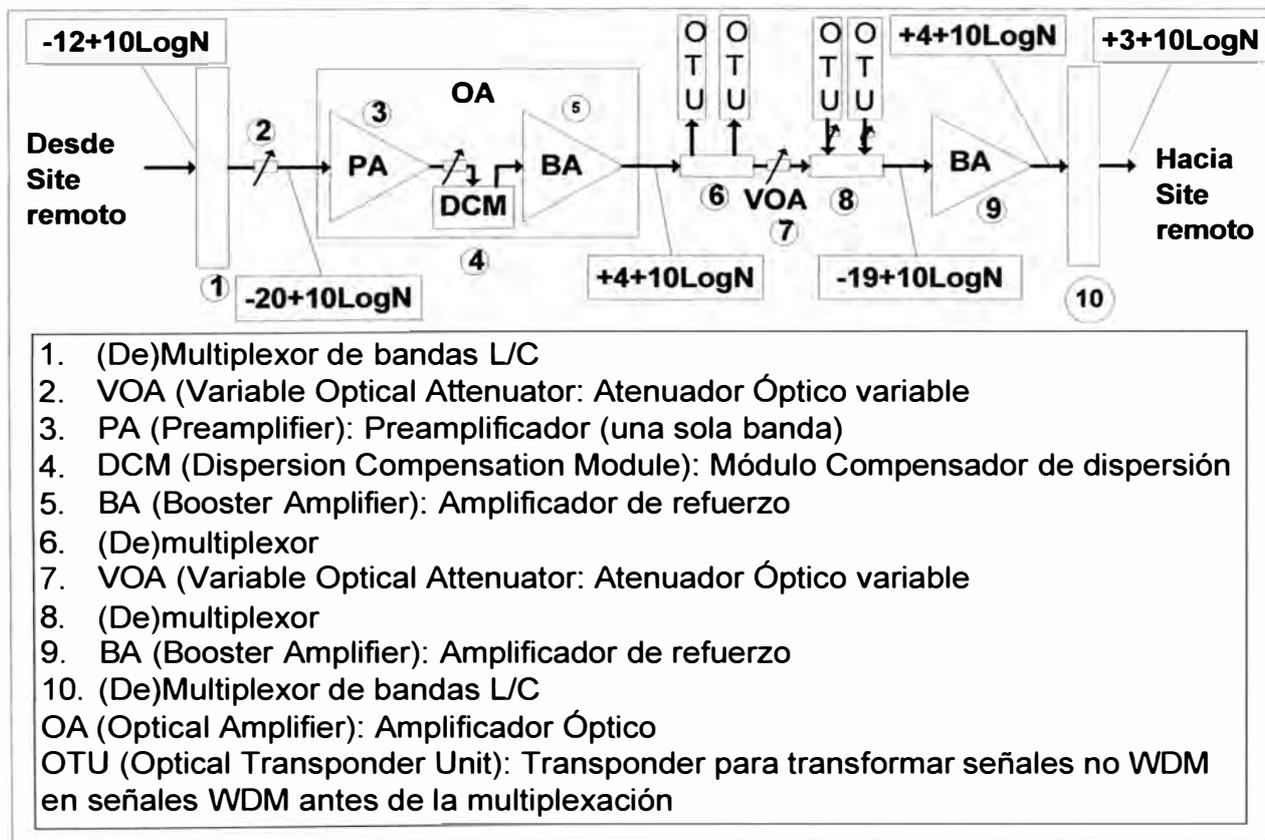


Fig.2.11 Atenuaciones debidas al equipamiento en un OADM

El siguiente amplificador tiene una salida fija de 4dBm. Ahora la señal está preparada para ingresar al demultiplexor conectado a los transponder. Este multiplexor tiene una pérdida de inserción de 2dB de modo que los transponder reciben un nivel de señal de 2dBm. El siguiente multiplexor requiere un nivel de señal de entrada de -17dBm, por lo cual a su entrada tiene un VOA. Este multiplexor tiene una pérdida de inserción de 2dB, por lo cual la señal que entrega al siguiente amplificador tiene -19dBm de potencia. La salida fija del amplificador es de 4dBm y el último multiplexor de bandas le atenúa 1dB, por lo cual la señal hacia planta externa con una potencia de 3dBm por canal.

2.2.5.e) Otras pérdidas

Algunas pérdidas habituales pero de menor impacto en la atenuación, son aquellas causadas por procesos climáticos y la fatiga estática provocada al momento de hacer el tendido de fibra, ambas pérdidas acortan el tiempo de duración de la fibra. Para atenuar estos problemas existen dos soluciones de carácter general:

Aplicar sobre el recubrimiento primario una sustancia rígida (nylon) en forma de segundo recubrimiento, ó

Colocar la fibra dentro de su primer revestimiento, éste dentro de un segundo revestimiento holgado, llenando el espacio intermedio con un medio viscoso, como el petrolato, ó materiales secos como hilos hidroexpansibles.

Las dos alternativas presentan ventajas, la primera genera buena estabilidad en un variado rango de temperaturas, y los incrementos de pérdida durante el cableado en el segundo caso es despreciable.

2.2.5.f) Pérdidas inherentes a la fibra debido al proceso de fabricación

Estas pérdidas no se pueden eliminar por completo durante el proceso de fabricación de la fibra y se deben a impurezas en el vidrio y a la absorción de la luz a nivel molecular. Esta absorción es causada principalmente por contaminantes del vidrio tales como iones OH.

Las impurezas metálicas se pueden controlar en el proceso de fabricación, reduciendo su efecto atenuante al mínimo. Estas impurezas originan una pérdida del orden de 1dB/km si su concentración es de una parte por millón.

En cambio, las del tipo hidroxilo que constituyen debido a partículas de vapor de agua durante el proceso de fabricación de la fibra, son más difíciles de controlar. Hoy en día los métodos de fabricación de fibra consideran que las impurezas iónicas no deben exceder de 30 partes por cada cien mil millones. La amplitud del pico de absorción del hidroxilo no excede de 1dB/km, habiendo conseguido valores de 0.04 dB/km con el método VAD.

2.2.5.g) Pérdidas por absorción por rayos UV e IR

Estas pérdidas ocurren debidas a que la energía de los fotones de la luz que viajan por la fibra óptica es transmitida a las moléculas de sílice que van encontrando en su camino, generándoles vibraciones.

La absorción debida a la componente de radiación ultravioleta (UV) de la luz transmitida disminuye de manera exponencial con el valor de la longitud de onda de operación, siendo casi despreciable a partir de los 1000nm. La absorción por rayos infrarrojos (IR) se origina por las vibraciones entre átomos de silicio y oxígeno, y crece exponencialmente con el valor de la longitud de onda, siendo apreciable su efecto a partir de los 1400nm.

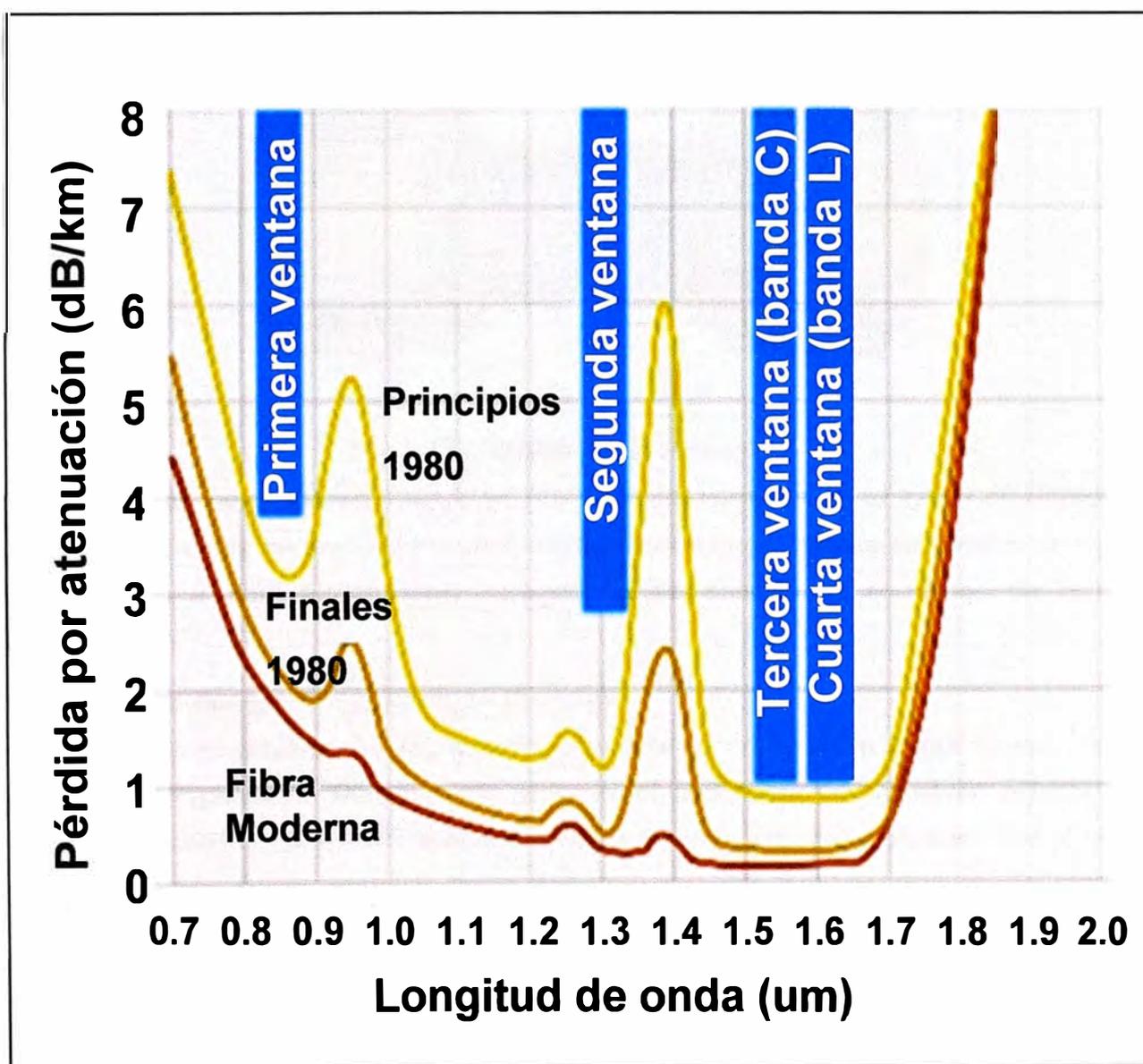


Fig.2.12 Atenuación en las ventanas de transmisión óptica

Por esta razón, es conveniente transmitir la señal de luz a ciertos valores de longitud de onda, de modo tal que se definen ventanas y/o bandas de operación dentro de las cuales se trabaja con parámetros de atenuación específicos. La atenuación de una ventana u otra determina parámetros tan importantes como la atenuación por cada kilómetro que recorra la señal.

Como se puede observar en la Fig.2.12, debido a la investigación e innovación en la manufactura de fibras ópticas, se ha conseguido disminuir la atenuación de las señales de luz según la longitud de onda de operación.

2.2.5.h) Reflexión de Fresnel

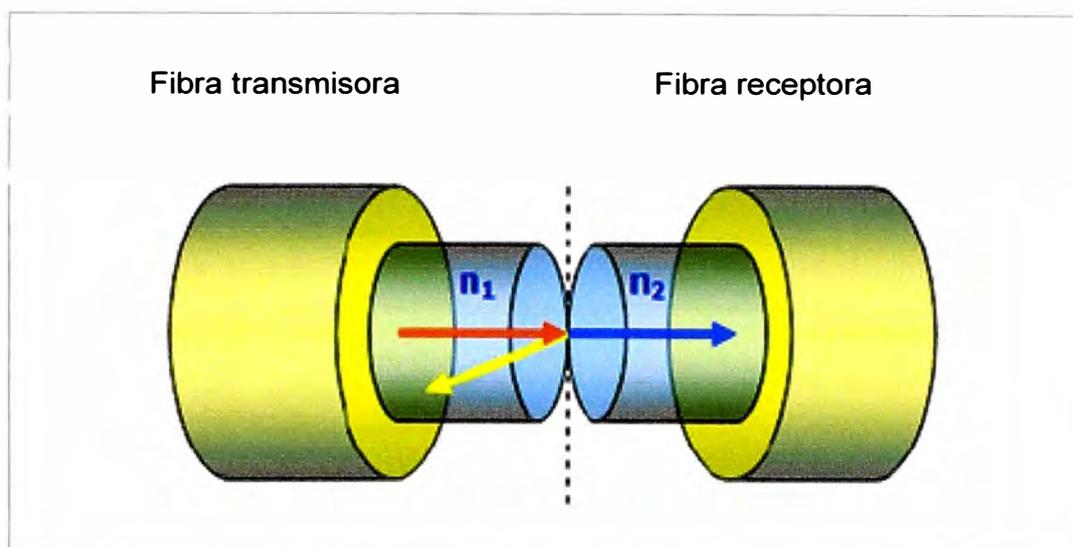


Fig.2.13 Reflexión de Fresnel

Estas pérdidas se producen cuando se produce una variación en el índice de refracción (cuando se cambia de un medio a otro), debido a que una pequeña proporción de luz se refleja hacia la fibra transmisora, evitando así su entrada en el núcleo de la fibra receptora.

2.2.5.i) Pérdidas por Dispersión de Rayleigh

Durante el proceso de fabricación, el vidrio se produce en fibras largas, de un diámetro muy pequeño. Durante este proceso, el vidrio está en un estado plástico (no líquido y no sólido). La tensión aplicada al vidrio durante este proceso hace que el vidrio se enfríe y desarrolle irregularidades submicroscópicas que se forman de manera permanente en la fibra. Cuando los rayos de luz que se están propagando por una fibra chocan contra una de estas impurezas, se difractan. La difracción causa que la luz se disperse o se reparta en muchas direcciones. Una parte de la luz difractada continua por la fibra y parte de ésta se escapa por la cubierta. Los rayos de luz que se escapan

representan una pérdida en la potencia de la luz, y se denomina pérdida por dispersión de Rayleigh.

Este fenómeno de difracción de la luz ocurre en el núcleo de la fibra, produce una pérdida de energía que decrece exponencialmente con la cuarta potencia de la longitud de onda, según la siguiente expresión:

$$\text{Pérdidas}_{\text{Rayleigh}} = K / \lambda^4 \quad (2.2)$$

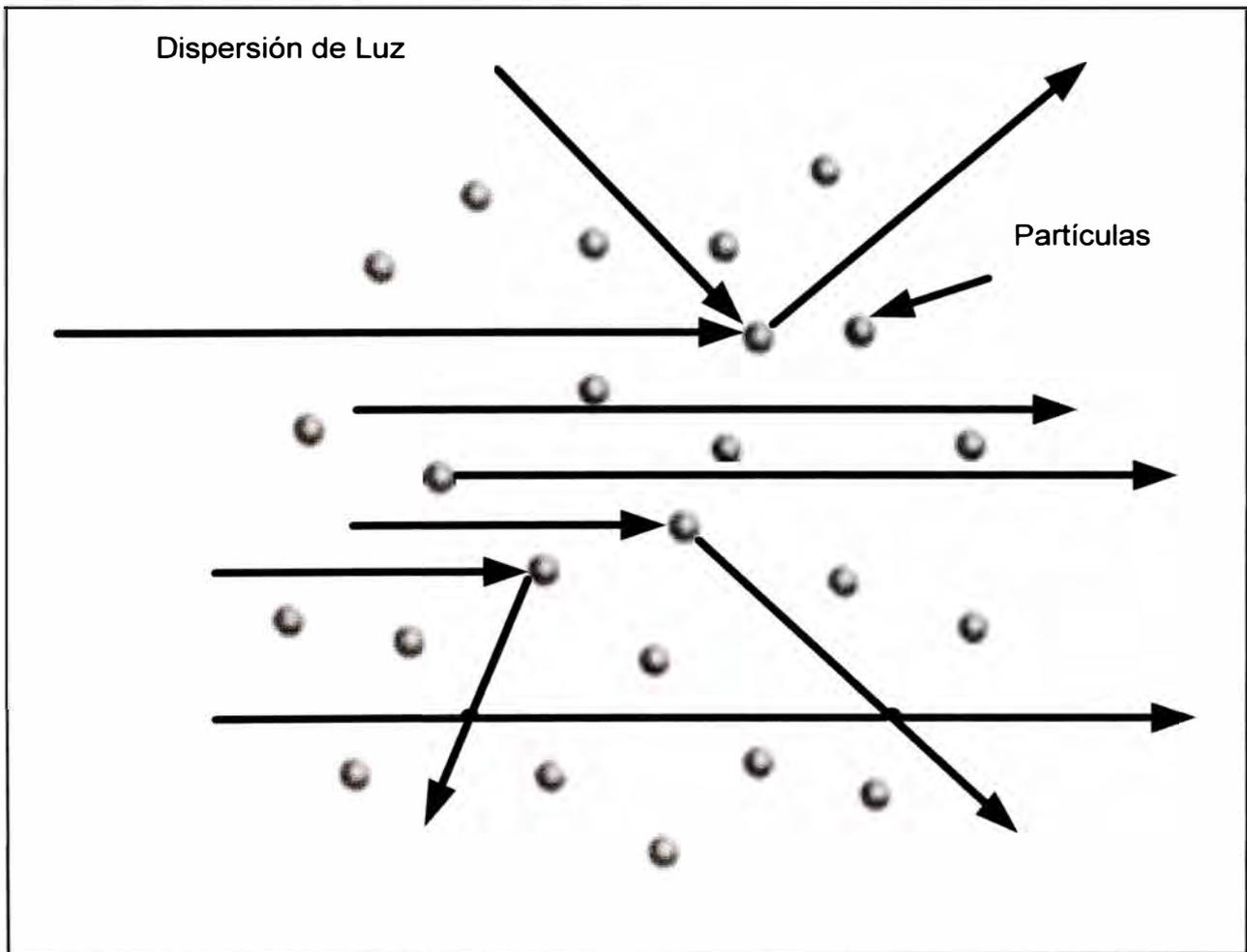


Fig.2.14 Pérdidas por dispersión de Rayleigh

2.2.6 Dispersión

La dispersión es inversamente proporcional al ancho de banda, que es la capacidad de transportar información de una fibra, e indica las limitaciones de propagación de impulsos de la fibra. La dispersión es de 3 tipos: intermodal (afecta únicamente a las fibras multimodo), cromática (afecta a ambos multimodo y monomodo, siendo su efecto más predominante en las fibras monomodo), y dispersión por modo de polarización ó PMD.

2.2.6.a) Dispersión modal

Únicamente afecta a fibras multimodo, y se origina debido a que los distintos modos de propagación siguen caminos distintos hasta llegar al receptor. Como se observa en la Fig.2.15, los modos propagados siguen recorridos diferentes a través del núcleo de la fibra, por esta razón llegan al extremo final en instantes de tiempo distintos. Es decir, la dispersión modal es función directa de la diferencia de caminos que recorre la luz por la fibra según el modo que se acople. Para atenuar este efecto se emplean fibras monomodo, o multimodo de índice gradual, en el primer caso ya no existe dispersión modal y en el segundo caso el valor de dispersión se reduce significativamente.

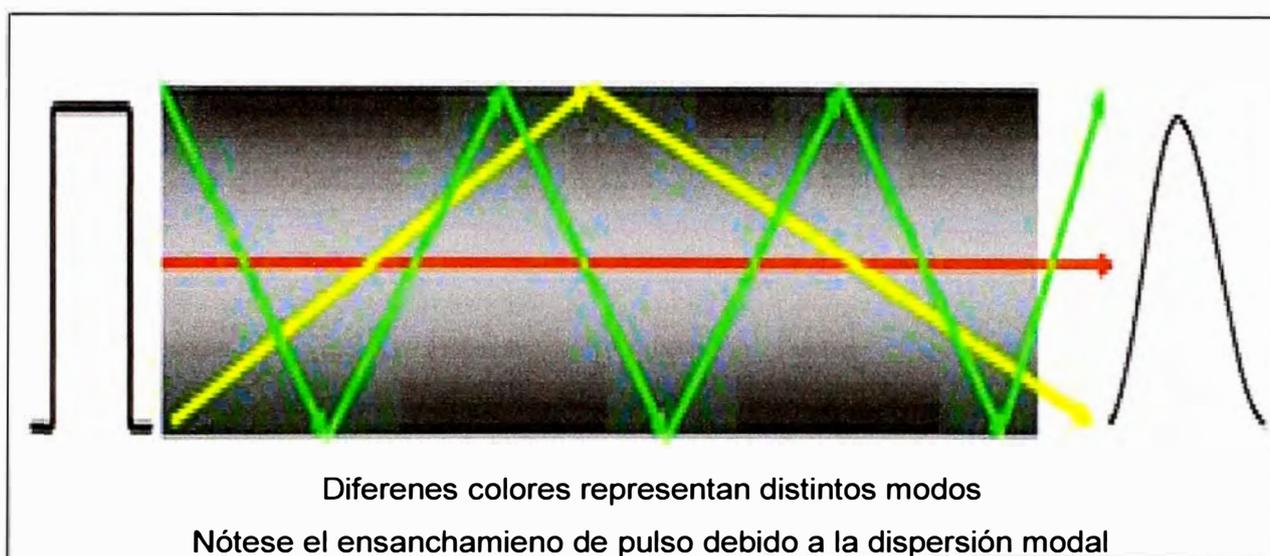


Fig.2.15 Dispersión modal

2.2.6.b) Dispersión cromática

La dispersión cromática representa el hecho de que diferentes longitudes de onda viajan a velocidades diferentes, incluso dentro del mismo modo. De hecho, cuando se transmite una longitud de onda no es un pico perfecto y en su lugar muestra un ancho espectral finito. Por lo tanto se trata de una pequeña longitud de onda que se transmite, y los componentes dentro de este rango viajan a velocidades ligeramente diferentes. Esto da lugar al ensanchamiento de los pulsos que viajan a una distancia significativa (ver Fig.2.16). Esta distancia varía dependiendo del tipo de fibra, el tipo de láser, y la velocidad de datos. La dispersión cromática es el resultado de la dispersión de material (debido a que el índice de refracción depende de la frecuencia) y la dispersión de guía de onda (debido a que a ciertas longitudes de onda, la luz se propaga también por el revestimiento del núcleo de la fibra).

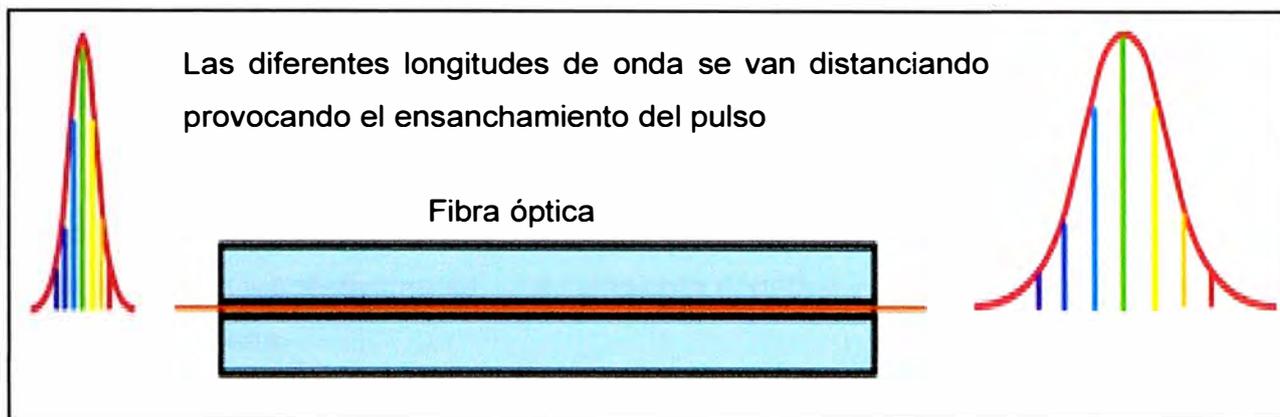


Fig.2.16 Dispersión Cromática

La dispersión es una función de la longitud de onda, la fibra monomodo estándar G.652 tiene dispersión cero a 1310nm, no así en 1550nm. La Fig.2.17 muestra la dispersión cromática junto con los componentes de dispersión de guía de onda y la dispersión del material para una fibra monomodo estándar G.652.

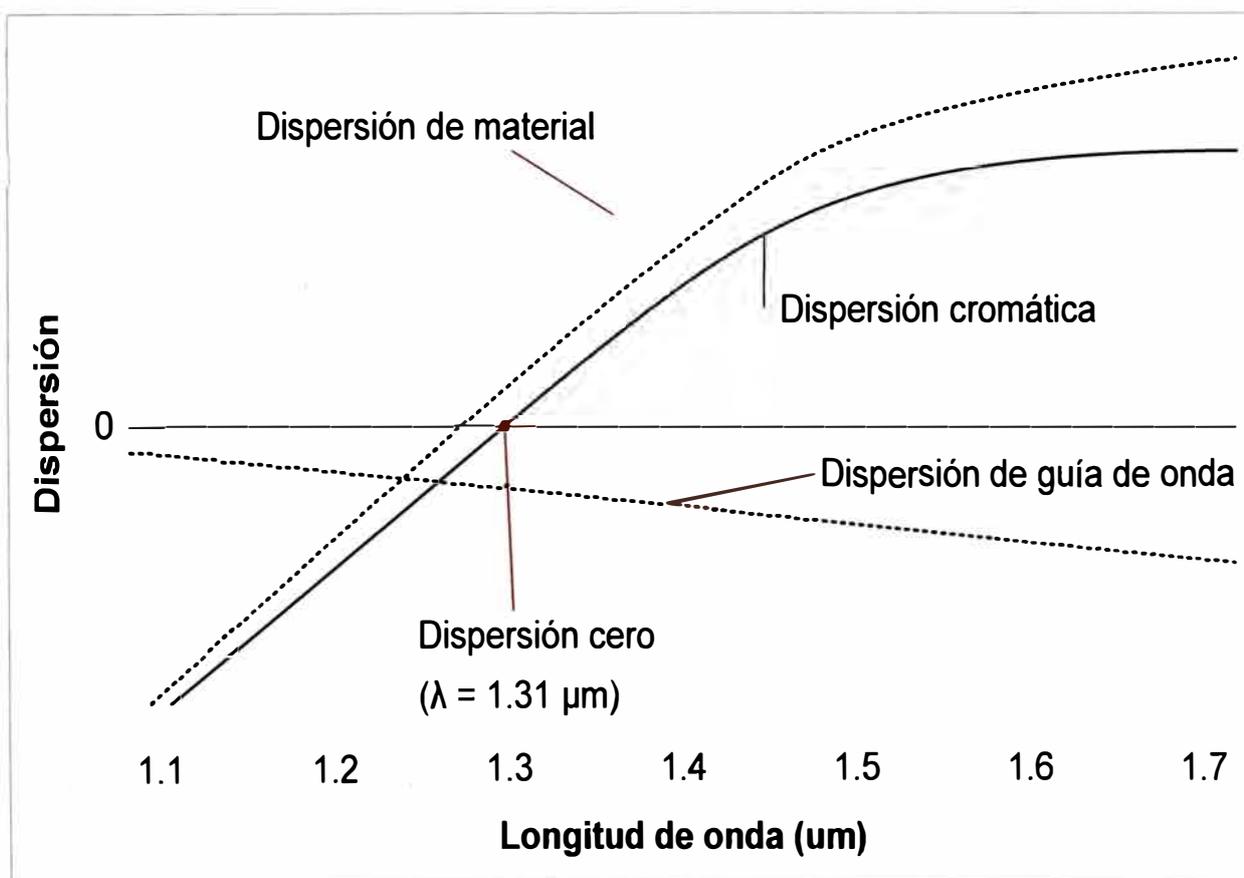


Fig.2.17 Dispersión cromática en una fibra monomodo estándar G.652

La banda de 1550 es ventajosa por su baja atenuación y porque permite el empleo de amplificadores ópticos dopados con erbio (EDFA). Por esta razón se desarrollaron fibras

monomodo con dispersión cero en 1550nm (G.653), pero esta fibra no es adecuada para técnicas de multiplexación de longitud de onda (WDM) debido a que presenta el efecto FWM ("four wave mixing", descrito en el apartado 2.2.7.a). Por lo cual se definieron las fibras cuya dispersión nula se desplazó de 1550 a 1510nm (G.655: NZDSF non zero dispersion shifted fiber), de modo que limita los efectos negativos tanto de la dispersión como del FWM. Hay dos tipos de NZDSF, conocidas como (-D) NZDSF y (+D) NZDSF. Tienen respectivamente, una pendiente negativa y positiva en comparación con la longitud de onda.

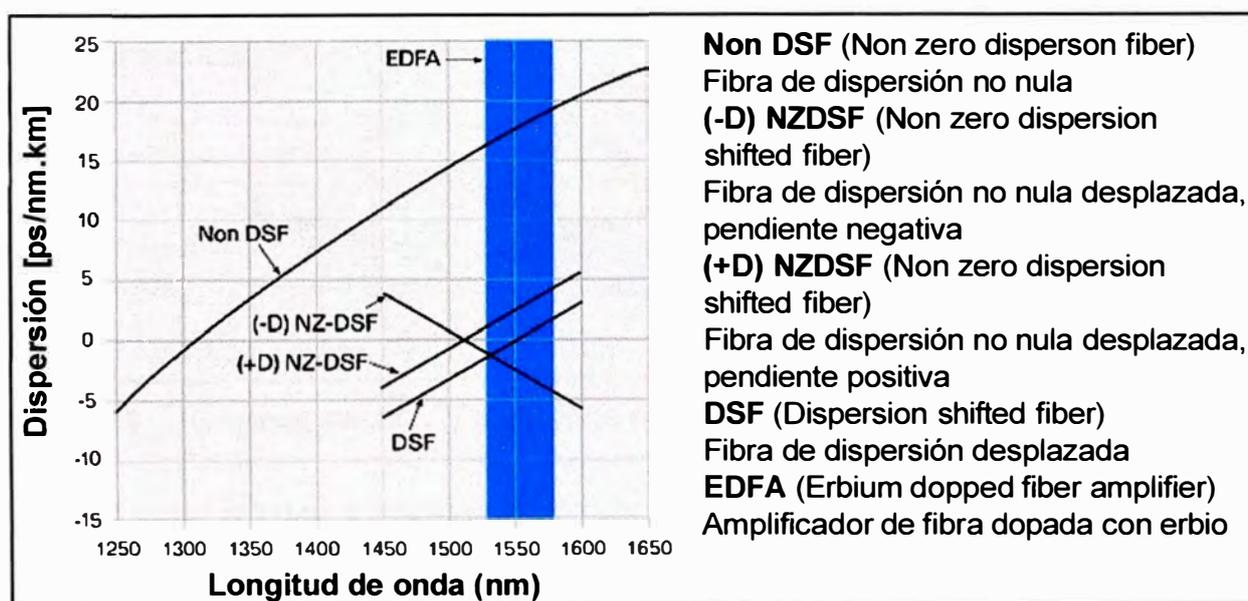


Fig.2.18 Dispersión cromática en fibras monomodo

La Fig.2.18 representa las propiedades de dispersión de los cuatro tipos principales de fibra monomodo. Nótese que las NZDSF tienen desplazada a 1510nm la dispersión con valor cero, mientras que en 1550nm, aún con baja dispersión, se encuentran dentro de la zona de empleo de amplificadores EDFA.

2.2.6.c) Dispersión por modo de polarización - PMD

La dispersión cromática es determinística y lineal, no se ve afectado por el entorno, y puede ser compensado a través de diversos métodos. Por otro lado, la dispersión por modo de polarización (PMD) es un fenómeno estocástico no lineal que se derivan de las pequeñas asimetrías de las fibras ópticas. Está sujeto a los cambios ambientales (tales como la temperatura, los movimientos de fibra, etc.) y no se puede compensar fácilmente. La luz se puede considerar como una onda que consiste de dos campos perpendiculares entre sí: Un campo eléctrico y un campo magnético (ver Fig.2.19).

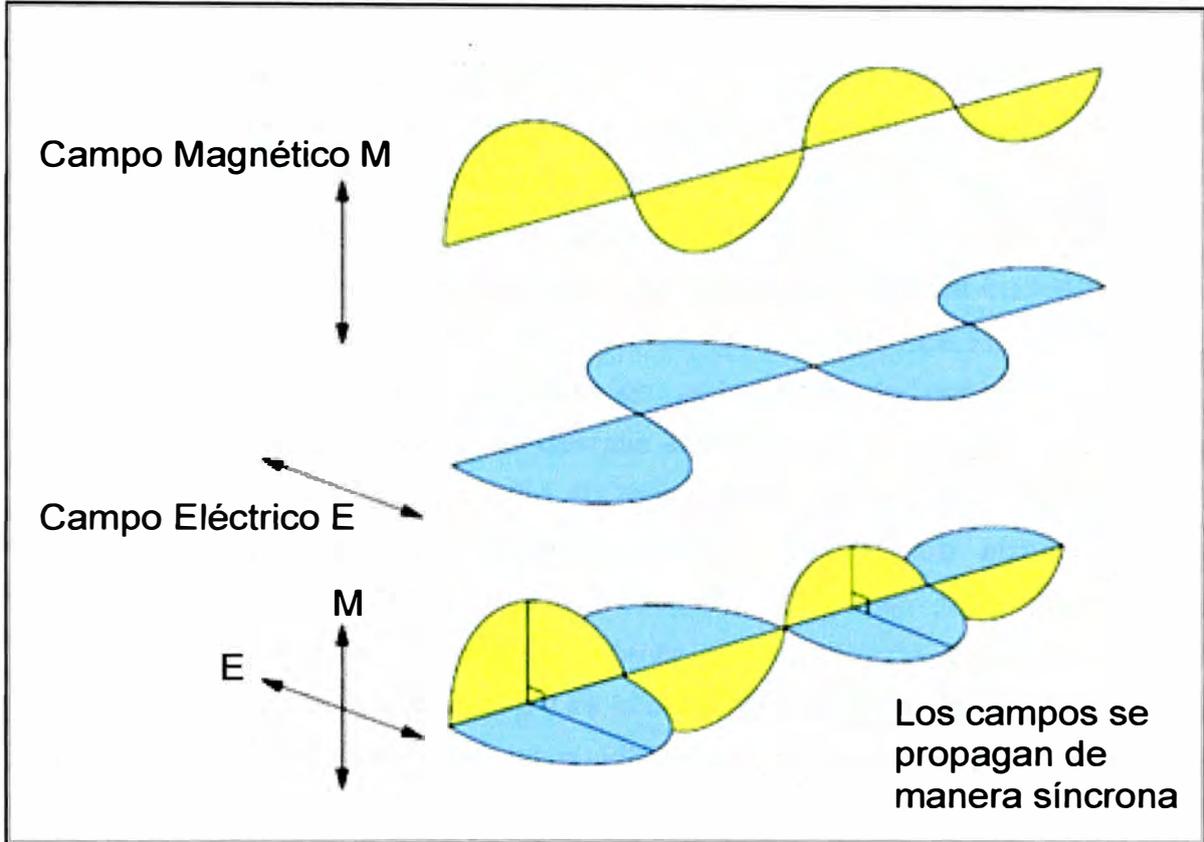


Fig.2.19 Campos eléctrico y magnético componentes de una transmisión óptica

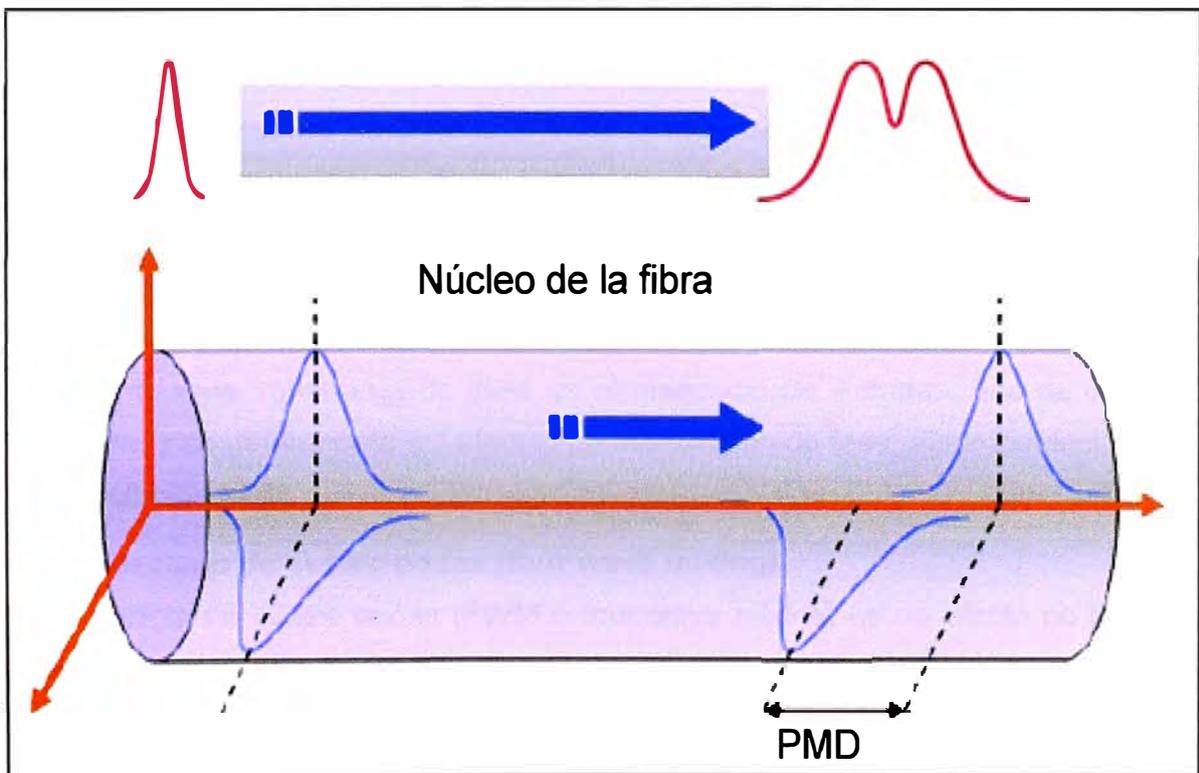


Fig.2.20 Efecto de la dispersión por polarización (PMD) en la propagación de un pulso a través de una fibra óptica

Idealmente, en ausencia de reflexión y refracción, los planos perpendiculares se propagan en dirección del sentido de propagación de la luz. Pero debido a la reflexión y refracción, la luz se polariza, y las polarizaciones perpendiculares viajan a velocidades diferentes y, en consecuencia, llegan al otro extremo en diferentes instantes. Entonces, se dice que la fibra tiene un eje rápido y un eje lento. La diferencia en los tiempos de llegada, normalizado con la longitud, es conocida como el PMD. La Fig.2.20 muestra la propagación de dos modos de polarización a lo largo de una fibra. Nótese el ensanchamiento de pulso producto del desfase en los modos. Es ampliamente conocido que las transmisiones moduladas a 10 ó 40Gbps imponen requisitos de fibra óptica muy estrictas. La PMD puede causar serias limitaciones en los enlaces de fibra implementados antes del 2001, debido a que se fabricaban para velocidades de transmisión menores que las actuales, por lo tanto los requisitos no eran estrictos.

La PMD se mide en picosegundos [ps], y es la diferencia entre los tiempos de llegada de los dos modos de polarización, como se puede ver en la Fig.2.20. El coeficiente PMD de una fibra óptica se expresa en unidades $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. Las fibras actuales tienen normalmente coeficientes PMD menores a $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. La ITU-T propone que el PMD en un tramo de fibra no debe exceder 1/10 del período de bit. En el caso de una transmisión a 10Gbps, el tiempo de bit es 100ps, por lo cual el PMD de un enlace debe ser menor o igual a 10ps.

2.2.7 Efectos no lineales

Al operar a niveles de potencia [mW] y velocidades moderadas (<2.5Gbps) los parámetros de transmisión en fibra óptica se pueden aproximar a comportamientos lineales. Sin embargo, a velocidades mayores o iguales a 10Gbps o potencias superiores comienzan a aparecer efectos no lineales, cuyos efectos son muy importantes en sistemas WDM, pudiendo condicionar el número de canales del sistema y la separación entre ellas. El más importante de ellos es el mezclado de 4 ondas, que se describe a continuación, y posteriormente los efectos de modulación de fase, automodulación SPM y cross modulación XPM.

2.2.7.a) Mezclado de cuatro ondas (four wave mixing)

La mezcla de cuatro ondas (FWM ó four wave mixing) es un efecto no lineal, que consiste en la aparición de nuevas longitudes de onda viajando dentro de la señal, esto ocurre debido a que el índice de refracción varía con el nivel de potencia de la señal, creando un medio de propagación no lineal, conocido como efecto Kerr, y genera condiciones para generar componentes con nuevas frecuencias. Estas nuevas componentes se generan como productos de modulación cuyas frecuencias son

combinaciones de las frecuencias originales de operación. La cantidad de nuevas componentes generadas a partir de las frecuencias originales de operación se puede obtener según la ecuación.

$$N = M^2(M - 1)/2 \quad (2.3)$$

Donde:

M: Número de canales originales de operación propagándose en la fibra

N: Máximo número de componentes FWM generadas

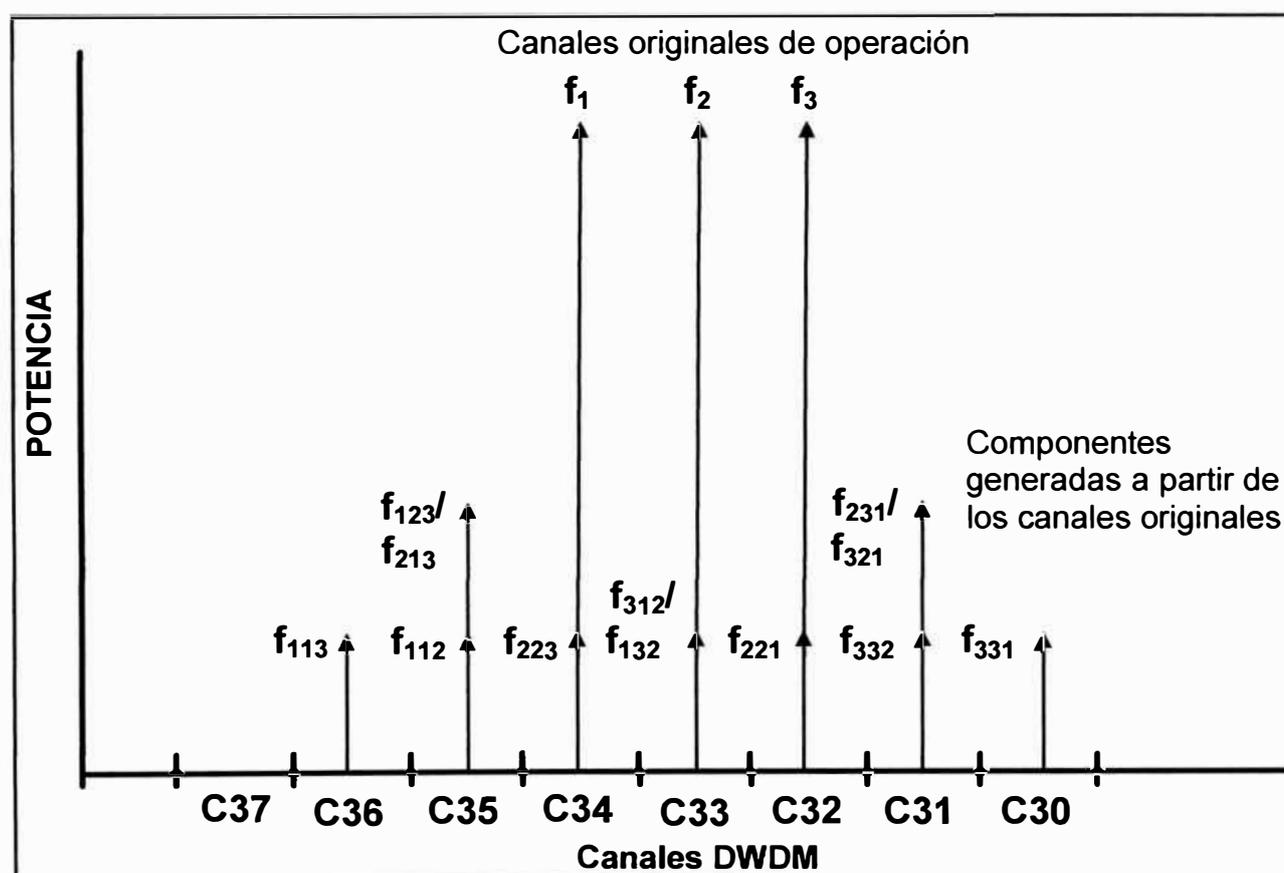


Fig.2.21 Efectos del FWM en 3 canales igualmente espaciados

El efecto se denomina FWM ó mezclado de cuatro ondas porque, porque dentro de los canales en operación, al combinar 2 ó 3 canales, se generan un cuarto componente adicional.

Cuando 3 canales están operando, se pueden generar hasta 9 componentes, y si los 3 canales originales están igualmente espaciados, entonces algunas de las componentes generadas van a coincidir con los canales originales de operación, generando interferencia (ver Fig.2.21).

En la Fig.2.22 se muestra la cantidad de componentes FWM generadas y de éstas, cuántas podrían coincidir con las frecuencias originales de operación.

Número de canales (M)	Máximo número de posibles componentes FWM generadas (N)	Número máximo de componentes FWM que interferirán con los canales originales
2	2	0
3	9	3
8	224	124
16	1920	1093
32	15872	9803
40	31200	19571
80	252800	167755

Fig.2.22 Número máximo de componentes FWM generadas

Nótese que incrementar el número de canales de operación genera exponencialmente gran cantidad de componentes FWM. Sin embargo, no todas estas componentes tienen la suficiente potencia como para generar interferencia, debido a que para que ocurra interferencia se requiere lo siguiente:

Las señales DWDM deben estar en fase, esto ocurre con valores bajos o ausencia de dispersión.

Poco espaciamiento entre canales

Altos niveles de potencia

Los métodos para reducir los efectos negativos del FWM son:

Emplear fibras con dispersión. Aún valores bajos de dispersión (G655, 4ps/nm.km) ayudan a reducir significativamente FWM. Las fibras G653 son vulnerables al FWM debido a que no presentan dispersión a 1550nm, aún con bajos niveles de potencia.

Emplear bajos niveles de potencia. La Fig.2.23 muestra los valores de potencia máximas estimadas en sistemas con canales igualmente espaciados, con la finalidad de obtener 25dB de diferencia entre los canales de operación y las frecuencias generadas.

Tipo de Fibra	NDSF G.652 CDc = 18ps/(nm.km) Aeff = 80um ²			NZ-DSF G.655 CDc = 4ps/(nm.km) Aeff = 72um ²			DSF G.652 CDc = 0ps/(nm.km) Aeff = 50um ²		
	100 Ghz	50 Ghz	25 Ghz	100 Ghz	50 Ghz	25 Ghz	200 Ghz	100 Ghz	50 Ghz
Potencia de señal [dBm]	17	11	5	13	8	2	3	-3	-4

Fig.2.23 Potencias máximas para un sistema DWDM

2.2.7.b) Modulación de fase cruzada (XPM) y Automodulación de fase (SPM)

Ambos XPM (Cross Phase Modulation ó modulación de fase cruzada) y SPM (Self Phase Modulation ó automodulación de fase) ocurren debido a un medio no lineal debido a la variación del índice de refracción con la potencia, y puede afectar los sistemas cuando se emplean elevadas potencias.

Nivel de potencia [dBm]	Tasa de transmisión [Gbps]	Distancia [km]
15	10	350
12	10	700
10	10	1100
7.5	10	2000
7	4	170
5	40	270
2	40	540
0	40	855
-2	40	1350

Fig.2.24 Potencia estimada por canal que limita las distancias debido a SPM

SPM genera una modulación de fase, mientras que XPM genera el mismo efecto pero la modulación es entre canales. Sus efectos se deben considerar para sistemas con tasas de transmisión a partir de 10Gbps. En la Fig.2.24 se muestran los valores estimados de distancia y potencia a partir de la cual el efecto de SPM es considerable. La automodulación de fase se presenta cuando el nivel de potencia por canal es demasiado elevado, situación que se presenta también para largas distancias.

2.2.8 DWDM

Ante el reto de aumentar drásticamente la capacidad de transmisión de información, las compañías de telecomunicaciones tienen dos opciones: instalación de nueva fibra o aumentar el ancho de banda efectivo de la fibra existente.

La instalación de nueva fibra es el medio tradicional utilizado por las compañías para ampliar sus redes. La implementación de una nueva fibra, sin embargo, es una proposición costosa, además que la mayor parte de los costos es en permisos y mano de obra, más que en la misma fibra. Por lo cual instalar nueva fibra tiene sentido sólo cuando es conveniente ampliar planta externa instalada.

El aumento de la capacidad efectiva de fibras existentes se puede lograr de dos maneras: Aumentar la velocidad de bits de los sistemas existentes:

Empleando TDM, los datos se transmiten normalmente a 2,5 Gbps (OC-48) y, cada vez más, a 10 Gbps (OC-192), e inclusive a 40 Gbps (OC-768). El circuito electrónico que lo hace posible, sin embargo, es complejo y costoso, tanto en la compra y mantenimiento. Además, existen importantes problemas técnicos que pueden limitar la aplicabilidad de este enfoque. La transmisión de OC-192 en fibra monomodo, por ejemplo, es afectado por la dispersión cromática 16 veces más que la siguiente velocidad más baja, OC-48. El incremento requerido en la potencia de transmisión requerido para transmitir a velocidades de bits más altas también introduce efectos no lineales que pueden afectar la calidad de la forma de onda. Por último, el PMD es también un problema.

Aumentar el número de longitudes de onda en una fibra:

En este enfoque, muchas longitudes de onda se combinan en una sola fibra. Empleando la tecnología de multiplexación por división de longitud de onda (WDM), varias longitudes de onda o colores, pueden ser transmitidas al mismo tiempo sobre el mismo hilo de fibra. Sin tener que instalar una nueva fibra, la capacidad efectiva de las instalaciones existentes puede ser aumentada por un factor de 16 o 32. Los sistemas con 128 y 160 longitudes de onda ya operan hoy en día. Los límites específicos de esta tecnología aún no se conocen.

WDM aumenta la capacidad de carga del medio físico (fibra), asignando a las señales ópticas entrantes a frecuencias específicas de la luz (longitudes de onda) dentro de una banda de frecuencias determinadas. Esta multiplexación se parece mucho a las estaciones de radio que transmiten en diferentes longitudes de onda sin interferir unos con otros (ver Fig.2.25). Debido a que cada canal se transmite en una frecuencia diferente, podemos seleccionar cualquiera de ellos con un sintonizador. Otra forma de pensar acerca de WDM es que cada canal es de un color diferente, varios canales forman un arco iris.

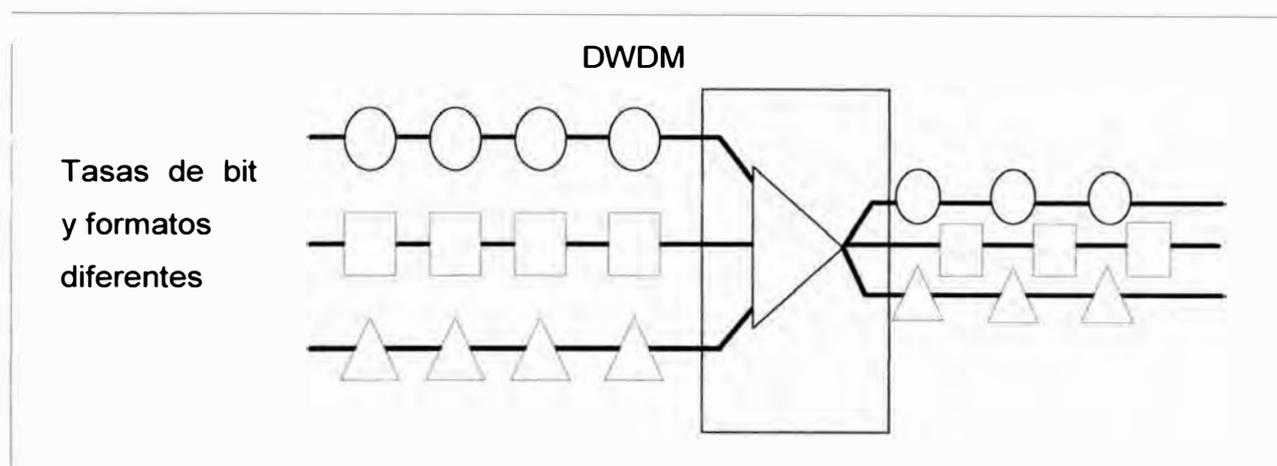


Fig.2.25 Aumento de la capacidad con DWDM

En un sistema WDM, las longitudes de onda se multiplexan en el transmisor, y son demultiplexadas en el extremo receptor. Al igual que TDM, la capacidad resultante es un agregado de las señales de entrada, pero WDM lleva cada señal de entrada de forma independiente de los demás. Esto significa que cada canal tiene su propio ancho de banda dedicado, todas las señales llegan al mismo tiempo, en lugar de ser segmentadas y lleva en timeslots.

En su núcleo, DWDM involucra un pequeño número de funciones de la capa física. Estos se muestran en la Fig.2.26, que muestra un esquema DWDM de cuatro canales. Cada canal óptico ocupa su propia longitud de onda.

El sistema realiza las siguientes funciones principales:

Generación de la señal:

La fuente, un láser de estado sólido, debe proporcionar la luz estable dentro de un ancho de banda específico y estrecho que lleva los datos digitales.

La combinación de las señales: Los sistemas modernos DWDM emplean multiplexores para combinar las señales. Hay una cierta pérdida inherentes asociados con la

multiplexación y demultiplexación. Esta pérdida depende del número de canales, pero se puede mitigar con amplificadores ópticos, que impulsan todas las longitudes de onda a la vez sin conversión eléctrica.

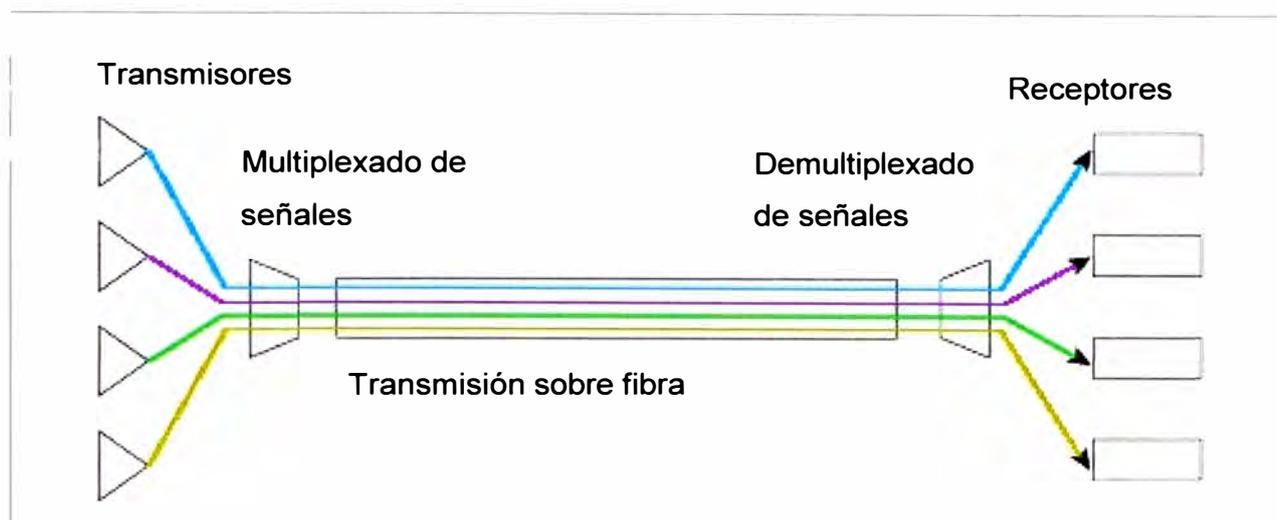


Fig.2.26 Esquema funcional DWDM

Transmisión de las señales:

Los efectos de interferencia y degradación de la señal óptica o pérdida deben tenerse presente en la transmisión óptica. Estos efectos se pueden minimizar controlando variables, tales como el espaciamientos de canal y los niveles de energía del laser. En un enlace de transmisión, la señal puede necesitar ser amplificada ópticamente.

La separación de las señales recibidas:

En el extremo receptor, las señales multiplexadas deben ser separadas. Aunque esta tarea parece ser simplemente lo contrario de la combinación de las señales, en realidad es técnicamente más difícil.

Recepción de las señales:

La señal demultiplexada es recibida por un fotodetector.

Además de estas funciones, un sistema DWDM también debe estar equipado con interfaces de lado de cliente para recibir la señal de entrada. Esta función es realizada por los transponder u OTU (Optical Transport Unit).

La diferencia entre WDM y DWDM (WDM denso) es una cuestión de grado solamente. En DWDM el espacio entre las longitudes de onda es más estrecho que en WDM, y por lo tanto tiene una mayor general capacidad. Los límites de este espaciado no se conocen con precisión, y probablemente no se han alcanzado, aunque los sistemas

están disponibles a mediados del año 2000 con una capacidad de 128 lambdas en una fibra. DWDM incluye además, la capacidad de amplificar todas las longitudes de onda a la vez, sin tener que convertirlas en señales eléctricas, y también la capacidad para transportar señales de diferentes velocidades y tipos de forma simultánea y transparente sobre la fibra (independencia de protocolo y la velocidad de bits).

2.2.9 Configuraciones de nodos DWDM

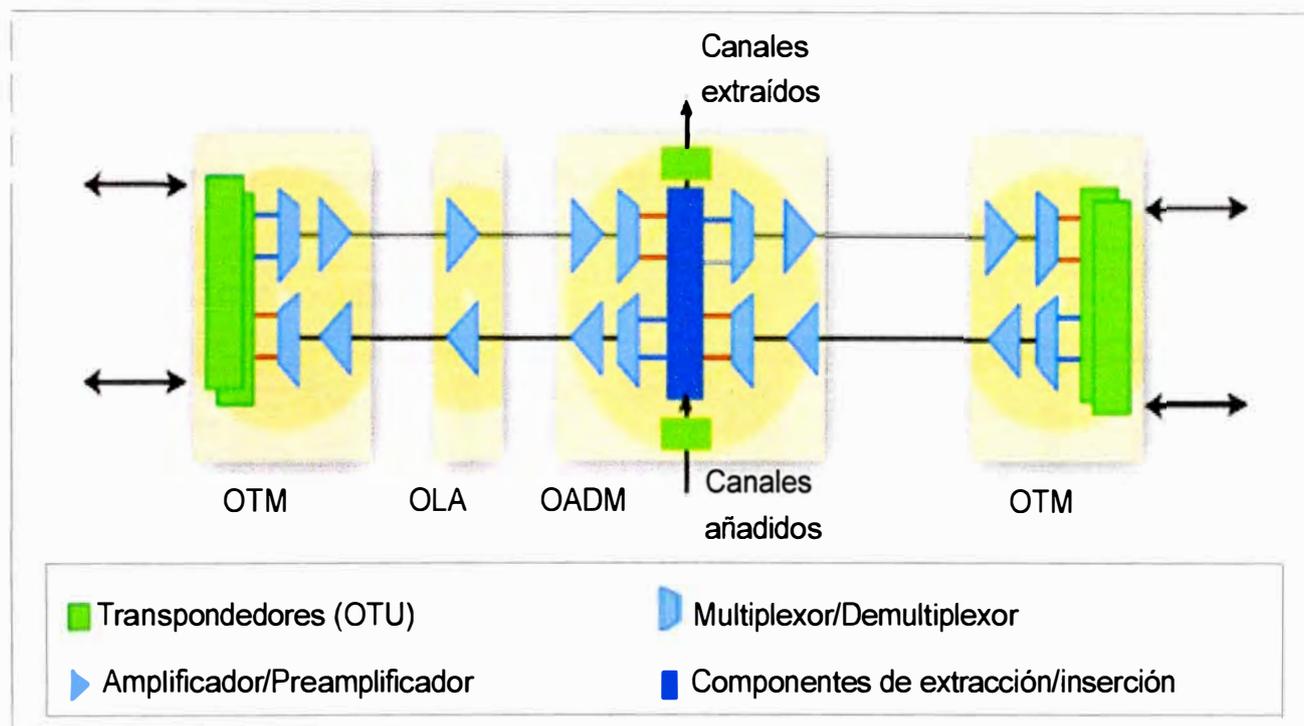


Fig.2.27 Componentes típicos de un esquema para un enlace DWDM

En referencia a la Fig.2.27, típicamente se tienen configuraciones en nodos denominados:

OTM: Optical terminal multiplexer, donde se agregan y retiran longitudes de onda

OLA: Optical line amplifier, es un nodo sólo de amplificación

OADM: Optical add/drop multiplexer, es un nodo donde se insertan y retiran longitudes de onda.

2.2.9.a) Transponders

La función básica de un transponder u OTU (Optical Transport Unit) es convertir una señal óptica no DWDM en una señal DWDM, como se puede apreciar en la Fig.2.28, se recibe una señal de segunda ventana y el transponder la modula en una longitud de onda apta para ser transportada por una señal DWDM.

Las señales no DWDM pueden ser: Ethernet, señales SONET/SDH, ATM, en todos los casos de diversas capacidades.

Dado que los sistemas DWDM envían señales de varias fuentes sobre una sola fibra, se debe incluir algún medio para combinar las señales entrantes. Esto se hace con un multiplexor, que toma varias longitudes de onda óptica a partir de varias fibras y converge en un solo haz. En el extremo receptor del sistema debe ser capaz de separar los componentes de la luz para que puedan ser detectados discretamente. Los demultiplexores realizan esta función mediante la separación del haz en sus componentes de longitud de onda y el acoplamiento a las fibras individuales. La demultiplexación debe hacerse antes de la detección de luz, porque los fotodetectores no detectan selectivamente una sola longitud de onda.

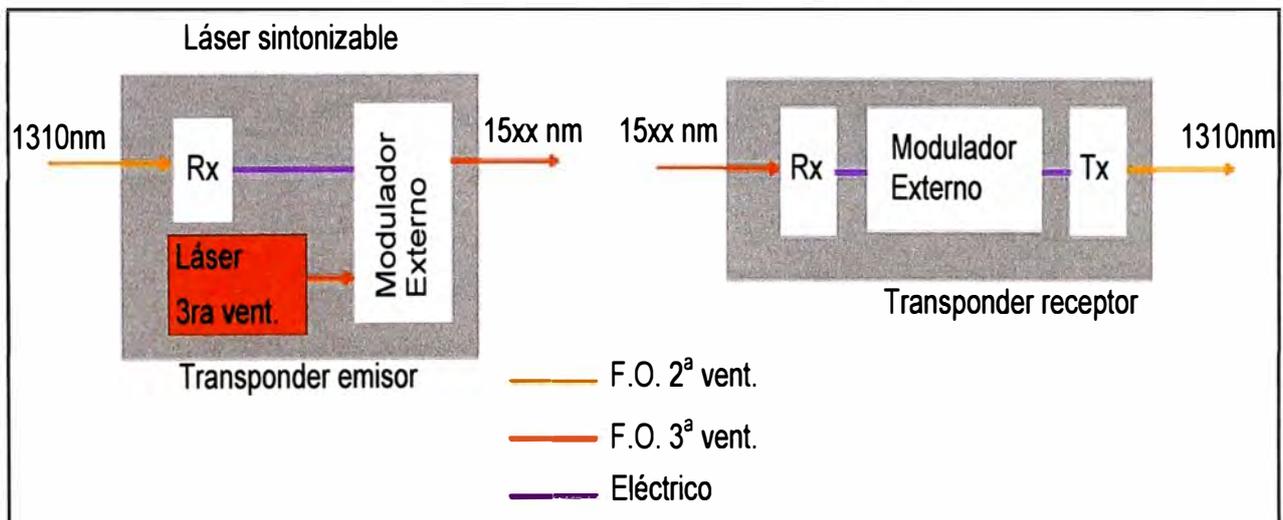


Fig.2.28 Operación de un transponder

2.2.9.b) Multiplexores / Demultiplexores

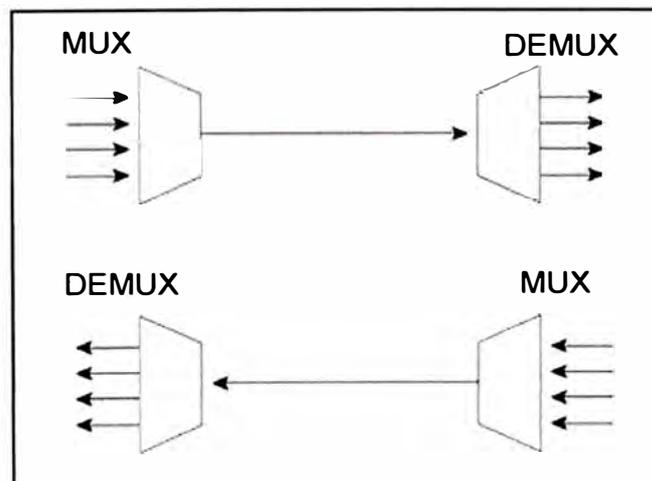


Fig.2.29 Multiplexación y demultiplexación en un sistema unidireccional

En un sistema unidireccional (ver Fig.2.29), hay un multiplexor en el extremo emisor y un demultiplexor en el extremo receptor. Para la comunicación bidireccional, se requieren multiplexores/demultiplexores en cada extremo y se necesitaría dos fibras por separado. En un sistema bidireccional, hay un multiplexor / demultiplexor en cada extremo (ver Fig.2.30) y la comunicación es en un único par de fibra.

Los multiplexores y demultiplexores puede ser pasivos o activos. Los diseños pasivos se basan en prismas, redes de difracción o filtros, mientras que los diseños activos se combinan dispositivos pasivos con filtros sintonizables. Los principales desafíos en estos dispositivos es reducir al mínimo la diafonía y maximizar la separación entre canales. La diafonía es una medida de qué tanto están separados los canales, mientras que la separación de canales se refiere a la capacidad de distinguir cada longitud de onda.

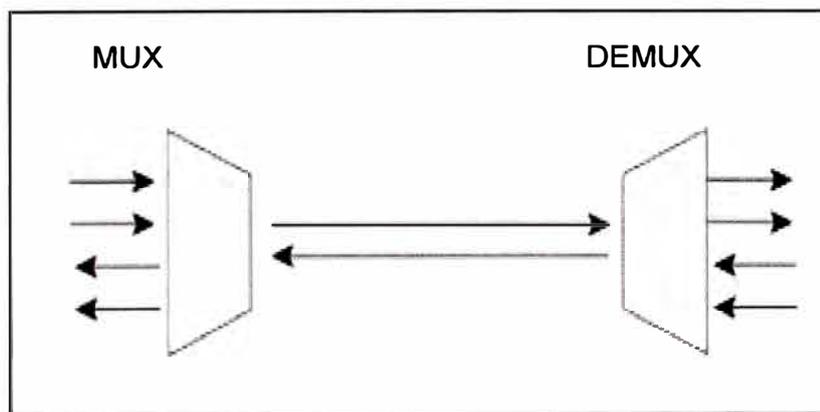


Fig.2.30 Multiplexación y demultiplexación en un sistema bidireccional

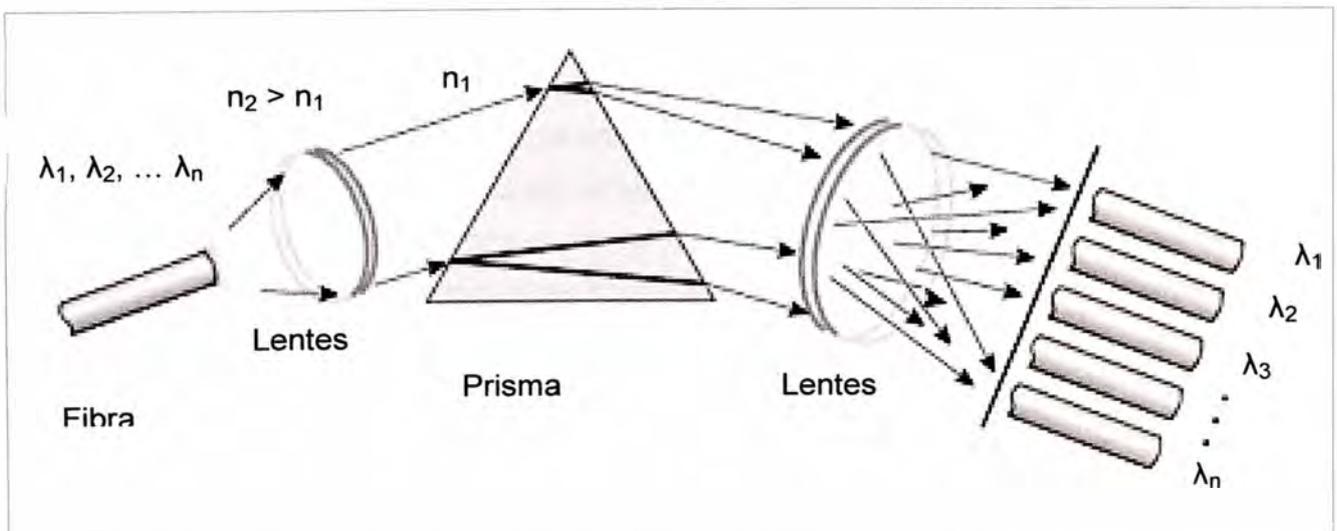


Fig.2.31 Demultiplexación empleando refracción a través de un prisma

Una forma simple de multiplexación o demultiplexación de la luz se puede hacer usando un prisma. La Fig.2.31 muestra el caso de demultiplexación. Un haz paralelo de luz policromática incide en una superficie del prisma, cada longitud de onda se refracta de forma diferente. Este es el efecto "arco iris". En la señal de salida, cada longitud de onda está separada de la siguiente por un ángulo. Un lente lleva cada longitud de onda hasta el punto de salida para que ingrese a una fibra. Los mismos componentes se pueden utilizar a la inversa para multiplexar.

Otra tecnología se basa en los principios de la difracción e interferencia óptica. Cuando una fuente de luz policromática incide sobre una rejilla de difracción (véase la Fig.2.32), cada longitud de onda se difracta en un ángulo diferente y por lo tanto hacia un punto diferente en el espacio. Con el uso de un lente, estas longitudes de onda se pueden enfocar en las fibras individuales.

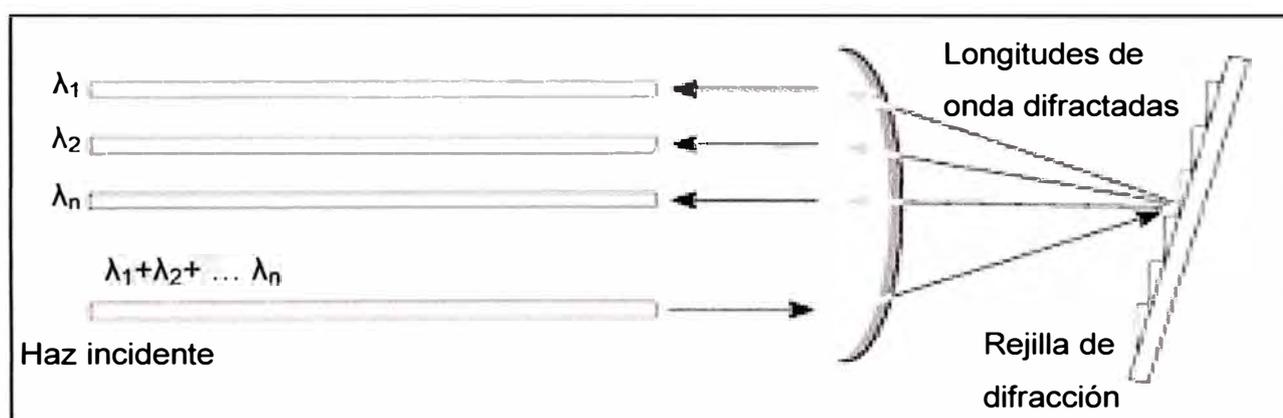


Fig.2.32 Demultiplexación empleando rejilla de difracción

Los dispositivos AWG (Array Waveguide Grating) también se basan en los principios de difracción. Un dispositivo AWG se compone de una serie de guías de onda con canales curvos, con una diferencia fija en la longitud del camino entre canales adyacentes (ver Fig.2.33). Cuando la luz entra en la cavidad de entrada, se difracta y entra en la matriz de la guía de onda. La diferencia de longitud de cada guía de onda representa retrasos de fase en la salida, donde las fibras se acoplan una matriz. El proceso da lugar a diferentes longitudes de onda con interferencia máxima en lugares espaciales diferentes, que corresponden a los puertos de salida.

Una tecnología diferente emplea filtros en dispositivos llamados filtros de película delgada o filtros de interferencia de múltiples capas. Por la posición de los filtros, que consiste en láminas delgadas, en la trayectoria óptica, las longitudes de onda puede ser demultiplexadas. La propiedad de cada filtro es tal que transmite una longitud de onda

mientras que refleja otras. Mediante estos dispositivos en cascada, muchas longitudes de onda se pueden demultiplexar (véase Fig.2.34).

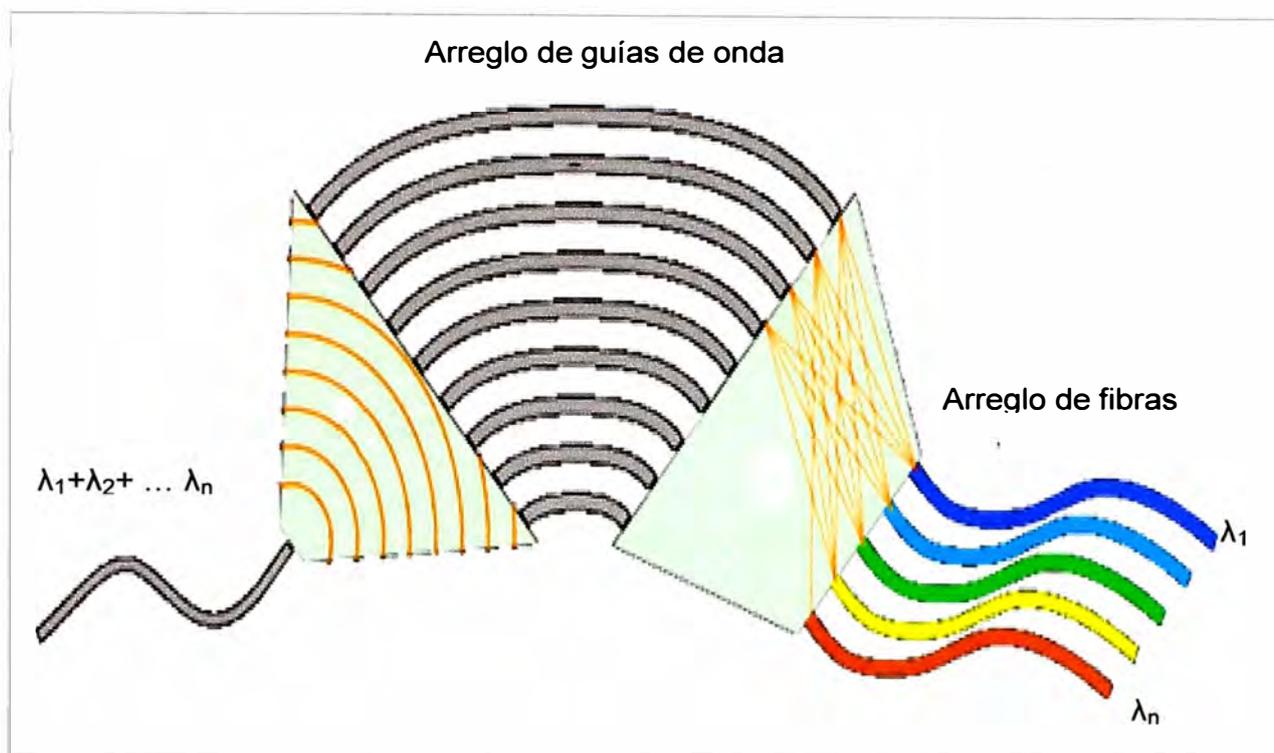


Fig.2.33 Demultiplexación empleando AWG

De estos diseños, los más populares son el AWG y los filtros de interferencia multicapa. Los filtros ofrecen una buena estabilidad y el aislamiento entre los canales a un costo moderado, pero con una alta pérdida de inserción. Los AWG son dependientes de la polarización (que puede ser compensada), y presentan una respuesta espectral plana y baja pérdida de inserción. Un inconveniente es que son sensibles a la temperatura de tal manera que son prácticos en todos los ambientes. Su gran ventaja es que pueden ser diseñados para realizar operaciones de multiplexación y demultiplexación de forma simultánea. Los AWG también son mejores con diseños con gran número de canales, donde el uso de filtros es poco práctico.

Los fabricantes ofrecen también equipamiento que facilita la (de)multiplexación de primer orden, este equipamiento se denomina selector de longitud de onda ó WSS (wavelength selective switch), permitiendo demultiplexar la señal compuesta y enviar distintos grupos de longitudes de onda hacia sus puertos de salida. De este modo por ejemplo, se puede desagregar un grupo de longitudes de onda hacia un multiplexor de menor orden mientras que las restantes se pueden pasar directamente hacia el siguiente nodo (ver Fig.2.35).

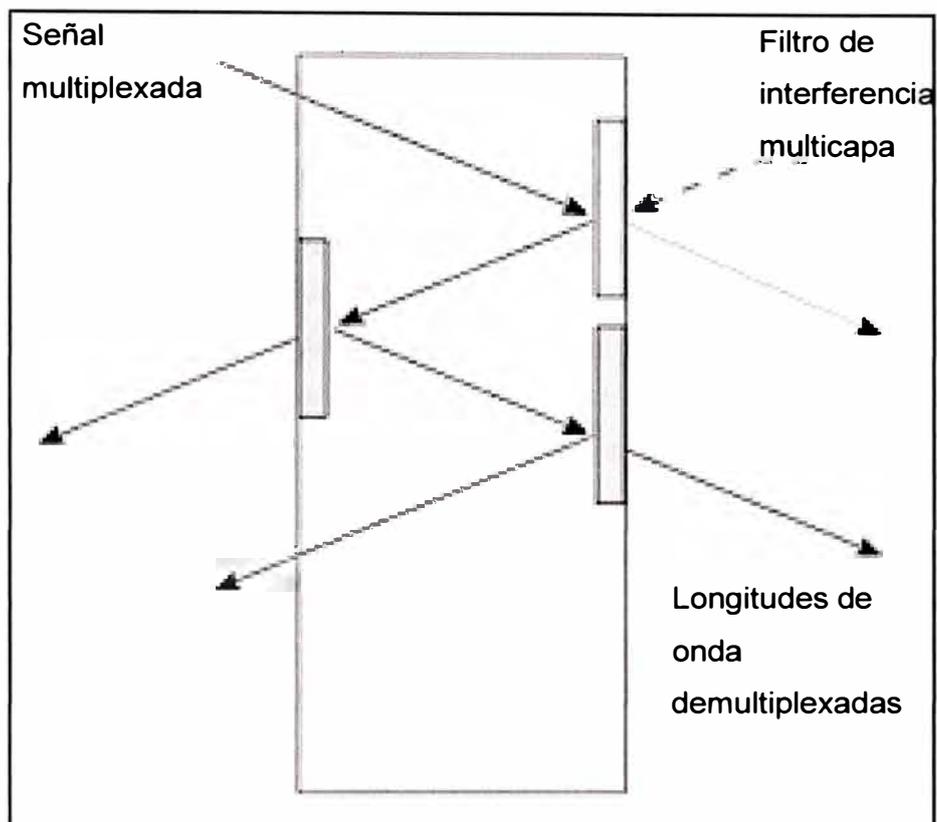


Fig.2.34 Filtros de interferencia multicapa

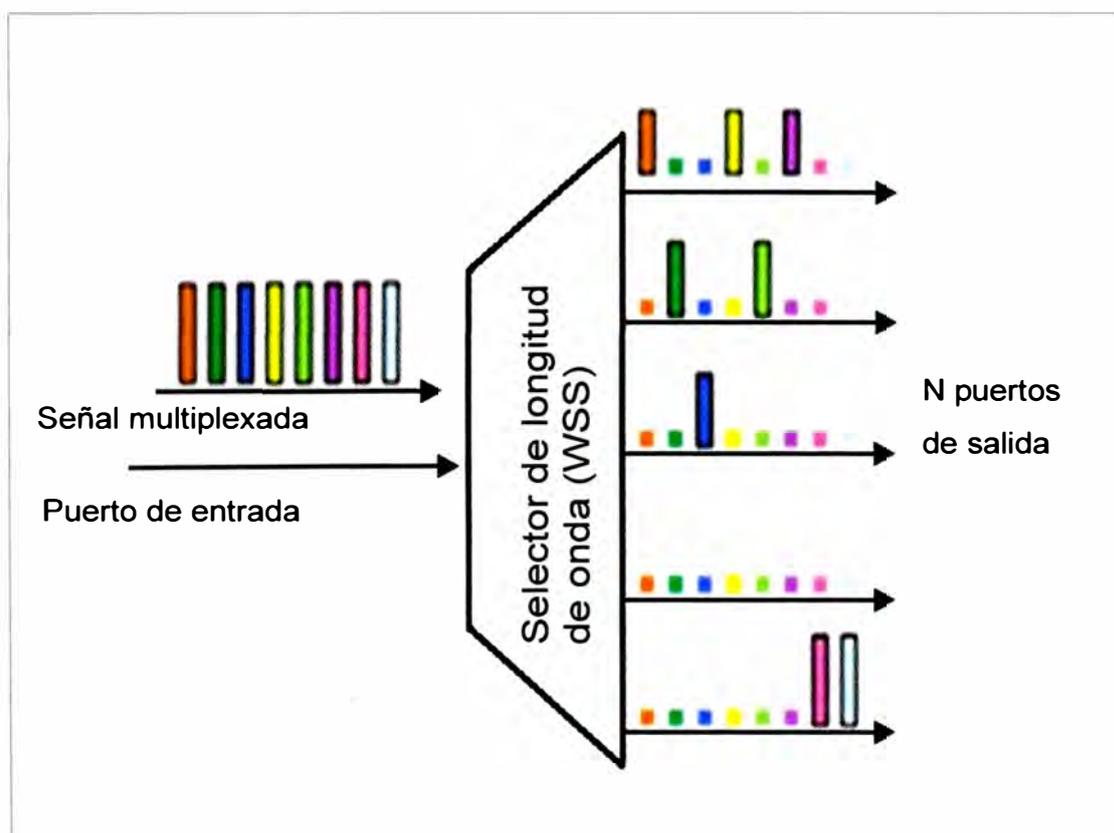


Fig.2.35 Esquema de operación de un selector de longitud de onda (WSS)

2.2.9.c) Amplificadores

El interés en DWDM es que los amplificadores tengan un comportamiento lo más lineal posible dentro de la banda de operación. La figura de ruido (NF) de un amplificador es importante para obtener un OSNR óptimo en el sistema.

Los amplificadores EDFA (ver Fig.2.36) están conformados por una bobina de 10 a 50m de fibra dopada con erbio, y es iluminada con fuentes láser de 980 y 1480nm. La energía emitida por los láser es absorbida por los átomos de erbio, de manera que pasan a un nivel energético mayor. En presencia de señales de banda C y L (tercera y cuarta ventana), esta energía es liberada en la misma frecuencia recibida de la banda C, retornando los átomos de erbio a su nivel de energía inicial. La luz de 980 y 1480nm es inyectada continuamente para volver a excitar los átomos de erbio, por lo cual el amplificador requiere una alimentación externa y continua de energía. La ventaja es que pueden amplificar una señal óptica sin convertirla al dominio eléctrico. La figura de ruido de los amplificadores EDFA es del orden de 3 a 5dB.

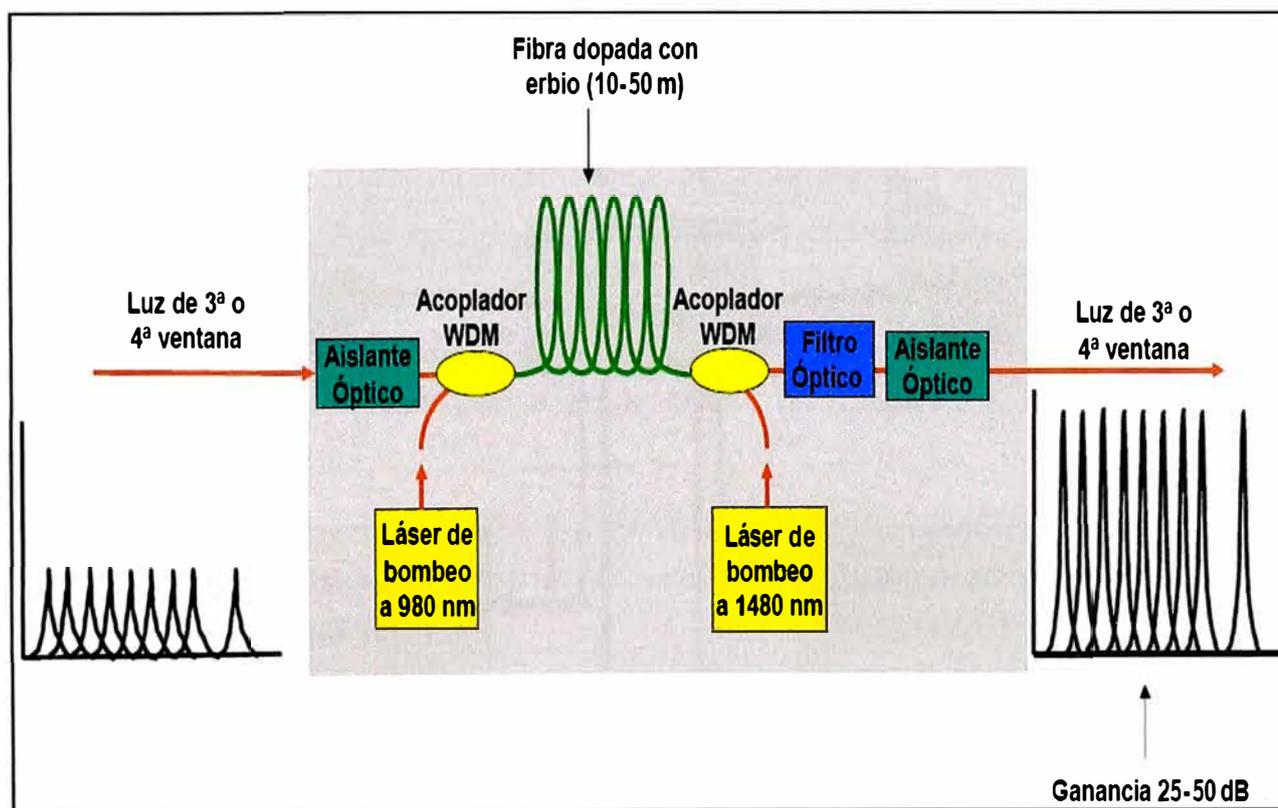


Fig.2.36 Esquema de un amplificador EDFA (Erbium Doped Amplifier)

Un amplificador Raman usa el principio del *scattering* de Raman estimulado (SRS), se origina cuando se inyectan simultáneamente dos ondas ópticas separadas en frecuencia por 13.2THz, la onda de menor frecuencia experimenta una ganancia generada a expensas de la onda de mayor frecuencia.

2.2.9.d) OADM

Entre la multiplexación y demultiplexación en un sistema DWDM, como se mostró en la Fig.2.26 , hay un área en la que existen múltiples longitudes de onda. A menudo es deseable poder quitar o insertar una o más longitudes de onda en algún momento a lo largo de este enlace. Un OADM (Optical add drop multiplexer) realiza esta función. En lugar de combinar o separar todas las longitudes de onda, el OADM puede retirar algunas y dejar pasar las demás. Los OADMs son una pieza fundamental para una evolución hacia redes totalmente ópticas.

Los OADMs son similares en muchos aspectos a los ADM SONET, excepto que sólo longitudes de onda ópticas se añaden o extraen, y no requiere la conversión de la señal óptica a eléctrica. La Fig.2.37 es una representación esquemática del proceso de adición/extracción de una longitud de onda. En este ejemplo se incluye una pre y post-amplificación, sin embargo estos componentes pueden o no estar presente en un OADM, dependiendo de su diseño. En este ejemplo se incluye una pre y post-amplificación, sin embargo estos componentes pueden o no estar presente en un OADM, dependiendo de su diseño.

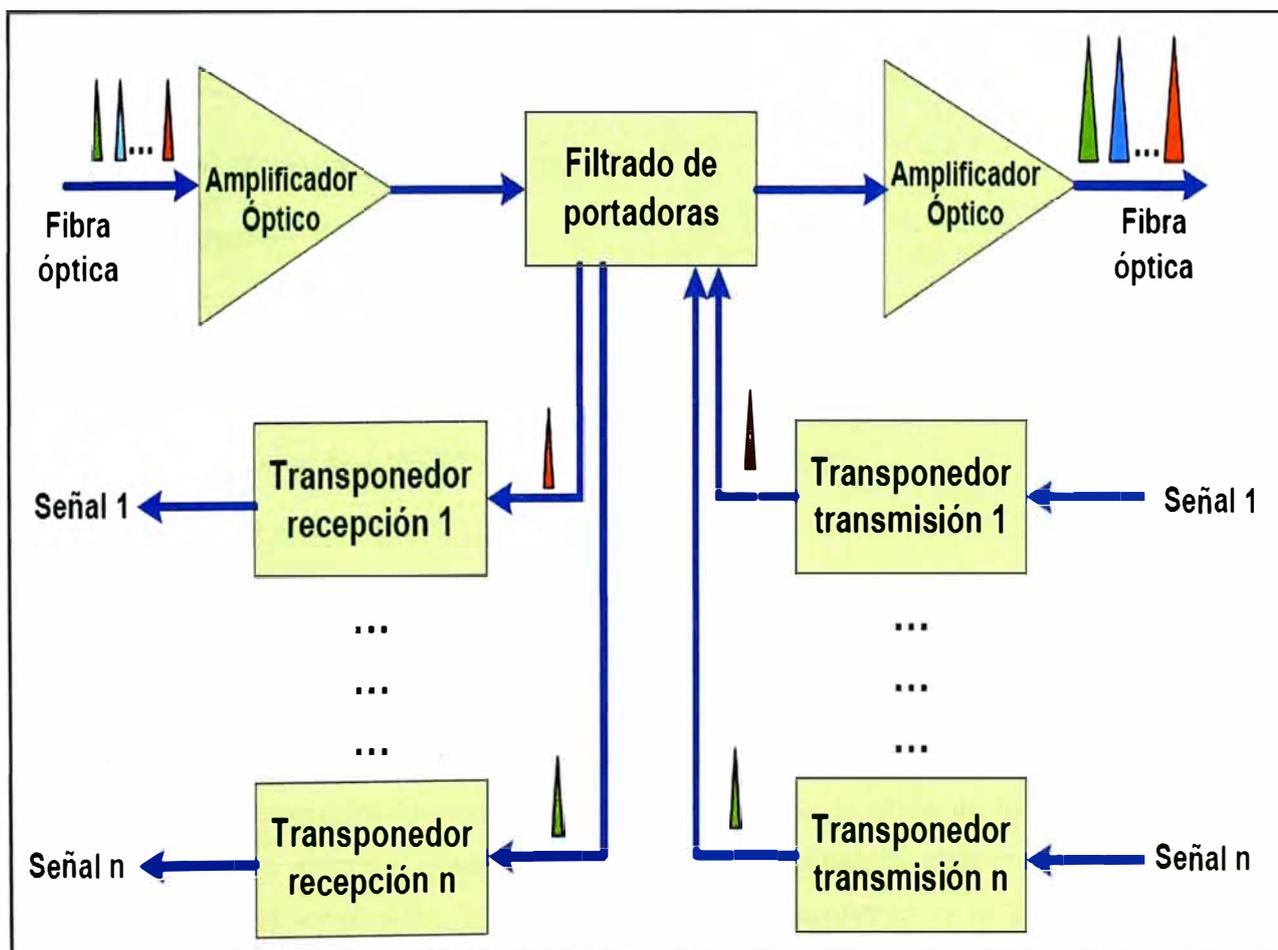


Fig.2.37 Extracción selectiva y adición de longitudes de onda

En general hay dos tipos de OADMs. La primera generación es un dispositivo fijo que es físicamente configurado para colocar longitudes de onda específicas, mientras que realizar también la adición de otros. La segunda generación es reconfigurable (ROADM) y capaz de seleccionar de forma dinámica las longitudes de onda que se agregan y extraen.

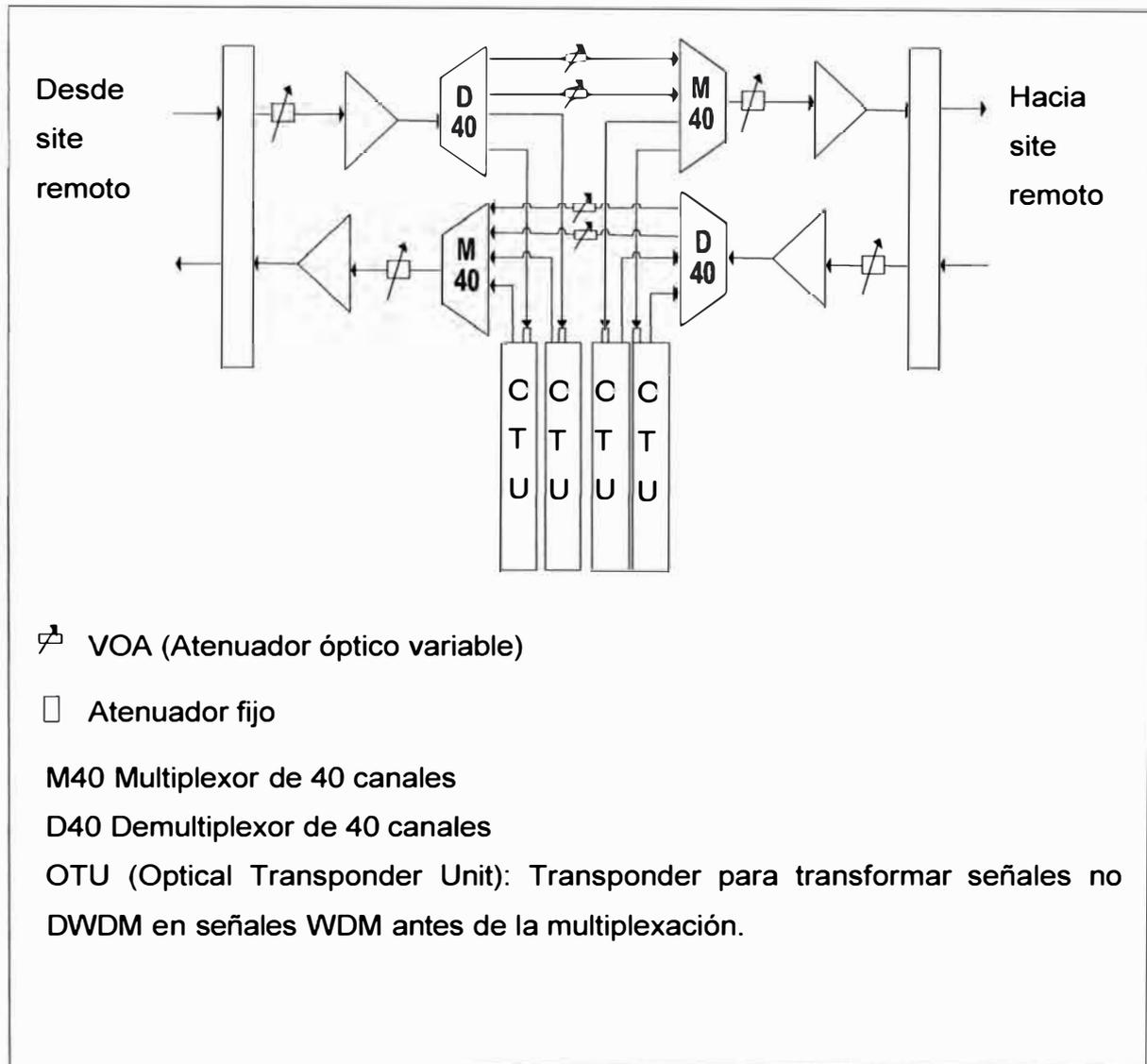


Fig.2.38 Agregación / Desagregación de todas las longitudes de onda en un OADM.

Considerando el equipamiento disponible en el mercado, tenemos dos opciones para implementar la agregación/desagregación de longitudes de onda en los nodos OADM: la primera opción es adquirir equipamiento para el crecimiento máximo del sistema e ir aprovisionando las longitudes de onda conforme se requieran, y la segunda opción es adquirir el equipamiento necesario para la cantidad necesaria de longitudes de onda que

permita el crecimiento posterior al máximo permitido por el sistema. En este caso, debido a la flexibilidad que permite, se empleará la segunda opción.

Para implementar un OADM, se requiere equipamiento de línea que pueda preamplificar la señal en recepción y amplificar la señal para transmisión. La señal recibida y preamplificada se pasa a los multiplexores para agregación/desagregación y posterior adecuación para transmisión en el otro sentido. Para aprovisionar las longitudes de onda necesarias sin limitar el crecimiento, se debe emplear multiplexores en cascada. En el caso de Huawei por ejemplo, el equipamiento que ofrece permite demultiplexar todas las señales de una banda, de modo que si se quiere tener longitudes de onda que no se van a desagregar y van a pasar directamente al siguiente nodo, se requiere realizar conexiones back to back entre los canales multiplexados hacia el multiplexor siguiente (Fig.2.38). Esta opción obliga a adquirir los multiplexores con capacidad de 40 canales. Una alternativa y evitar el uso de estos multiplexores es el empleo de multiplexores denominados MR2 (Fig.2.39), pero sólo pueden agregar/desagregar hasta 2 canales.

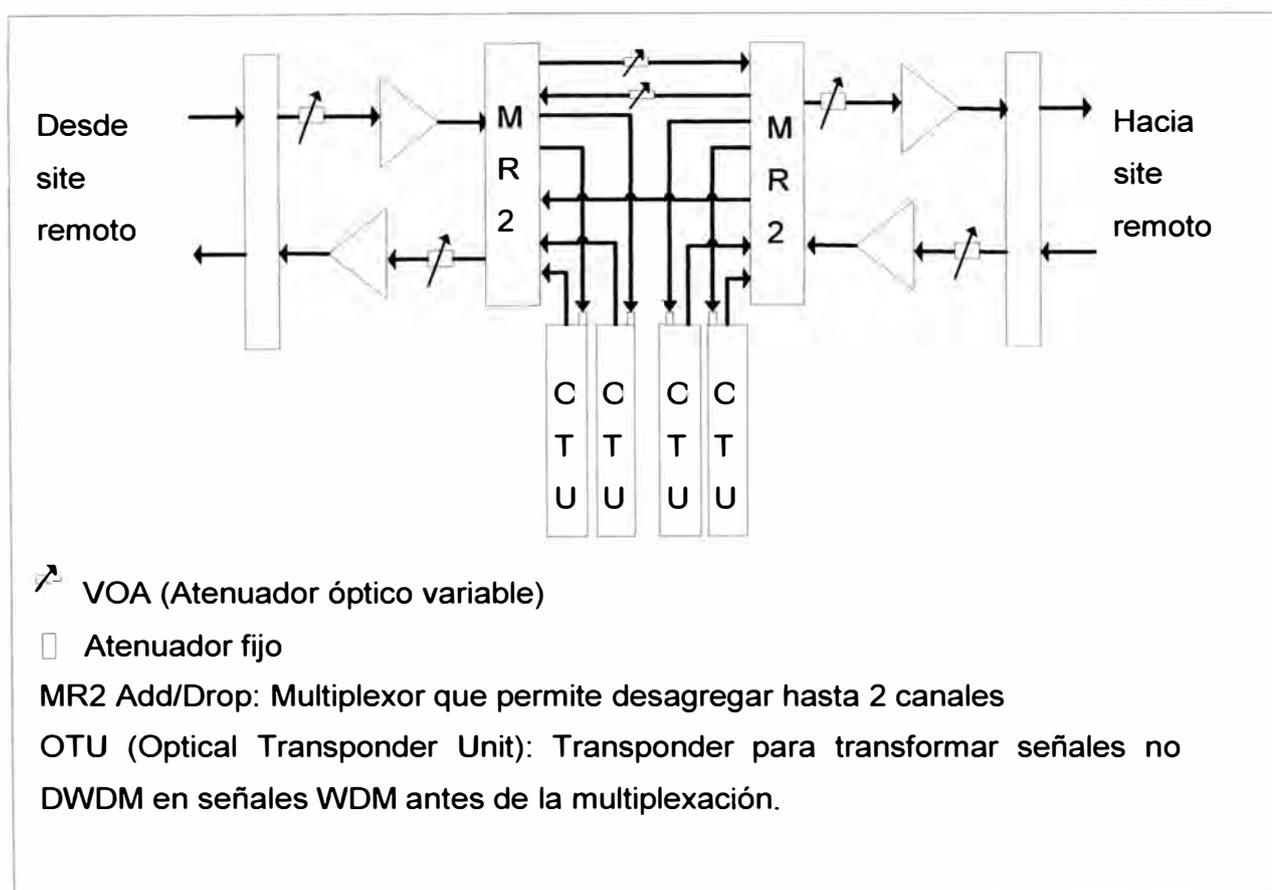
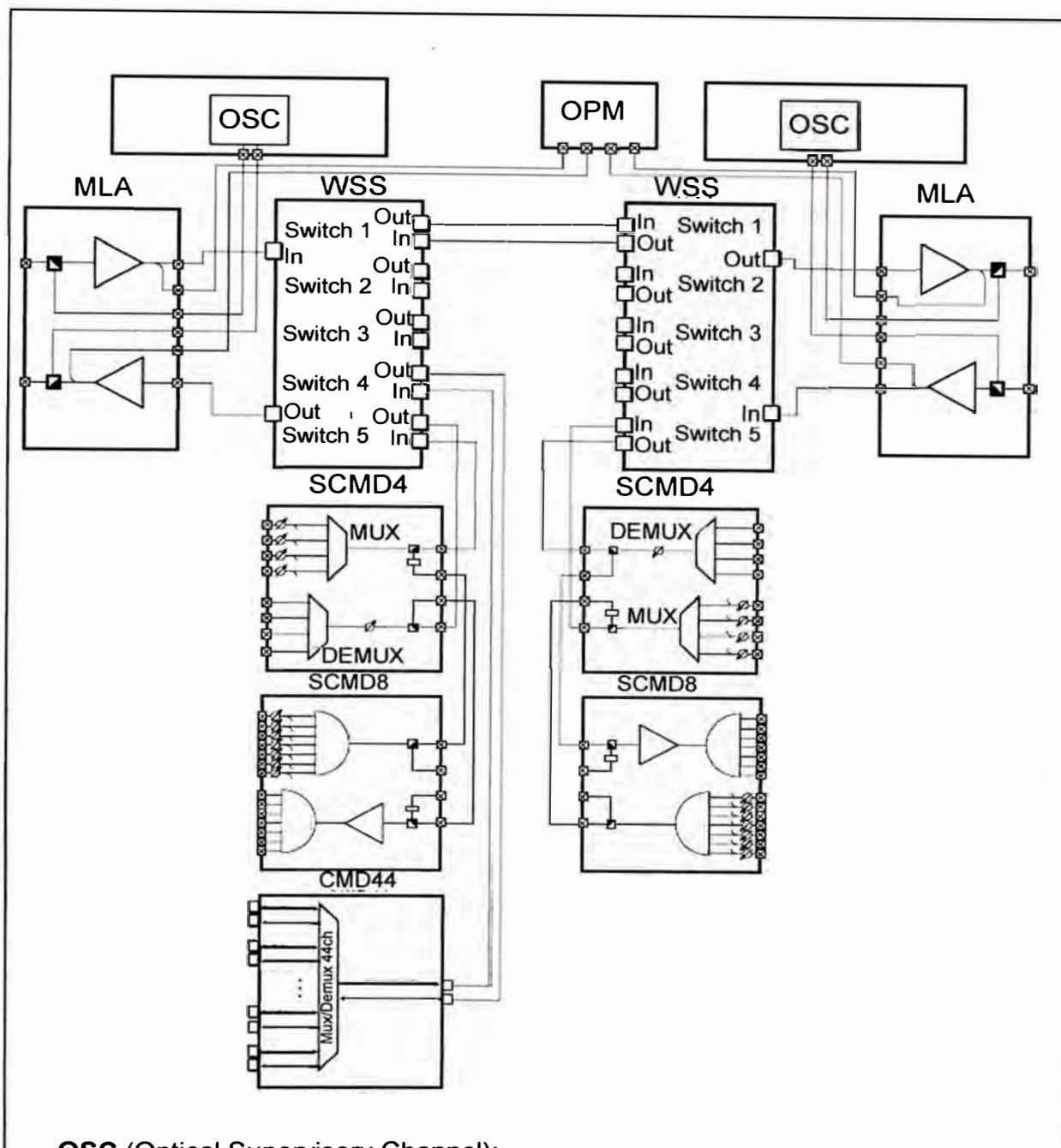


Fig.2.39 Agregación / Desagregación de dos longitudes de onda en un OADM empleando MR2



OSC (Optical Supervisory Channel):

Canal de supervisión óptico

OPM (Optical Power Module):

Módulo de potencia óptica

WSS (Wavelength selector switch):

Selector de longitud de onda

SCMD4: Multiplexor de longitudes de onda, 4 canales

SCMD8: Multiplexor de longitudes de onda, 8 canales

CMD44: Multiplexor de longitudes de onda, 44 canales

Fig.2.40 Agregación / Desagregación de longitudes de onda empleando WSS

Nortel por su parte, también ofrece multiplexores de hasta 44 canales a 100 Ghz en banda C, empleando WSS (ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), mientras que para implementar multiplexación en cascada emplea los grupos del 1 al 9. En el caso de banda C a 100Ghz, implementa hasta 36 canales (4 canales por grupo). En la Fig.2.41 se puede ver que se tiene los multiplexores que trabajan con grupos (GMD), y cada uno de ellos se interconecta con un multiplexor de 4 canales. En este esquema, se puede adquirir un GMD y un CMD4 para trabajar con 4 canales, y cuando se requiera implementar más canales, se adquieren más elementos CMD4.

2.2.9.e) Canal de supervisión Óptico OSC

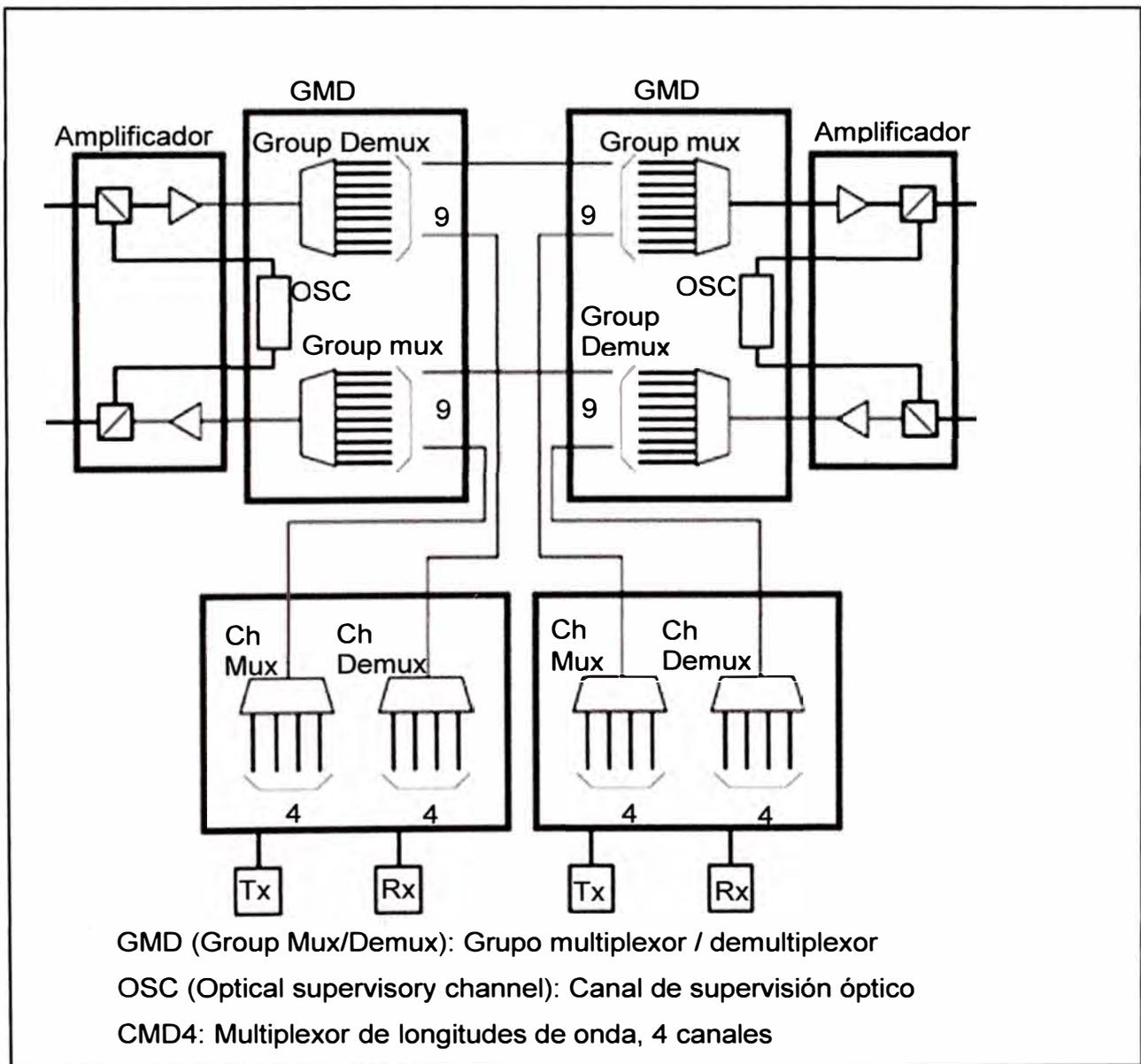


Fig.2.41 Agregación / Desagregación empleando multiplexores en cascada

El canal OSC (Optical Supervisory Channel) es un canal adicional que tiene una longitud de onda por lo general fuera de la zona de operación de los amplificadores EDFA. El OSC lleva información sobre la señal multiplexada, así como información sobre las condiciones de potencia en los nodos.

El canal de supervisión se utiliza normalmente para actualizaciones remotas de software y para brindar información de gestión. La ITU sugiere que el canal OSC debería emplear una señal OC-3, sin embargo los fabricantes han optado por utilizar FastEthernet u otros formatos. A diferencia de los canales de servicio wdm, el canal OSC siempre termina en nodos de amplificación, donde se recibe la información local de potencias, antes de que ocurra la retransmisión.

2.3 IP SOBRE DWDM

En las redes de datos e internet, el tráfico IP está creciendo exponencialmente a medida que los clientes migran sus servicios a aplicaciones basadas en IP. A medida que estas redes evolucionan para incluir voz sobre en IP, video y servicios de datos, haciendo un uso intensivo del ancho de banda, las compañías deben aumentar la capacidad en respuesta a la demanda de ancho de banda, y para hacerlo de manera óptima, deben buscar formas de optimizar la eficiencia operativa y el costo de las redes de servicios y reducir drásticamente el costo por bit. Sin embargo, las deficiencias inherentes de muchas de las arquitecturas de hoy en día pueden obstaculizar a los proveedores de servicios a alcanzar sus objetivos.



Fig.2.42 Encapsulamiento clásico de protocolos

En la actualidad, la mayoría de las compañías se basan en uno de los dos enfoques para el transporte de tráfico IP en su red de core. Pueden transportar tráfico IP a través de

longitudes de onda dedicada, en un enfoque IP sobre óptico. La segunda opción, es agregar el tráfico IP con otros tipos de tráfico y encapsular sobre una red SONET / SDH, a su vez soportada en una red DWDM, en un enfoque IP sobre SONET/SDH. También se dan casos en que se encapsula IP en ATM y éste en SONET (véase la Fig.2.42). Ambas estrategias han permitido a las compañías para satisfacer las demandas de ancho de banda IP de hoy, pero ambas tienen limitaciones, que se mencionan a continuación.

La mayoría de las redes de core de hoy emplean arquitecturas de capas, en los que se ha diseñado la capa de transporte óptico y de gestión por separado de la capa IP (a menudo por las organizaciones de estandarización distintas). A pesar de que estas arquitecturas han satisfecho las necesidades de los proveedores de servicios de datos en el pasado, sus limitaciones inherentes pueden resultar un obstáculo en las redes de mañana, que deben soportar mayor demanda de capacidad y gestión.

La arquitecturas IP sobre óptico, por ejemplo, dependen de transponders para convertir en los routers IP las señales no DWDM en longitudes de onda. Como resultado, los proveedores deben considerar en sus costos los transponder e interfaces en el router, así como los costos operativos para poder mantener y reparar este equipamiento. Esta capa adicional de equipo electrónico también aumenta la posibilidad de fallos, que afectan a la confiabilidad total de la red.

Debido a estos problemas, muchas compañías han adoptado el enfoque IP sobre SONET/SDH. Esta estrategia puede reducir la necesidad de transponders adicionales y de interfaces de corto alcance. Sin embargo, sufre también las deficiencias de la arquitectura de IP sobre SONET/SDH. Al igual que los transponders en el modelo IP sobre óptica, el enfoque IP sobre SONET/SDH requiere considerar el costo adicional en equipos para la agregación del tráfico SONET/SDH, y también interconexiones router – SONET/SDH. Esta capa adicional de SONET también aumenta la complejidad de la red y añade posibles puntos de fallo. Además, la intención original de la capa SONET/SDH - para la agregación de tráfico- es ahora redundante en las arquitecturas modernas. Las redes SONET puede agregar paquetes IP y señales TDM convencionales en una sola señal, pero las troncales IP de hoy son de la misma o mayor capacidad en comparación con las troncales SONET línea. Como resultado, la agregación del tráfico dentro de la capa SONET no ofrece ningún beneficio.

Ambos modelos (IP sobre óptica e IP sobre SONET/SDH) también se basan en configuraciones fijas, redes rígidas, por lo general consiste en enlaces DWDM punto a punto, así que hacer cambios en la red requiere un trabajo manual muy intensivo. En una arquitectura IP sobre óptico, los proveedores deben instalar y configurar los equipos en

cada nodo en el momento que requieren hacer un cambio. Aunque las compañías con una arquitectura IP sobre SONET/SDH puede utilizar cros-conexiones digitales (DXC) para volver a configurar de forma remota los nodos, sólo pueden hacerlo bajas velocidades de bit - por ejemplo, al reconfigurar una señal de 50-Mbps de transporte síncrono 1 (STS- 1). Cuando las compañías emplean conexiones 10 Gigabit Ethernet, cualquier cambio en la red exige a las compañías añadir o modificar manualmente las interfaces. Teniendo en cuenta estas preocupaciones, muchos proveedores están buscando un enfoque alternativo para el transporte de IP en las redes de core.

Existe una tercera opción, una arquitectura alternativa llamada IP sobre DWDM, que elimina la necesidad de una conversión óptica – electro – óptica (OEO) entre el router y la capa óptica (incluidos los transponders y equipos SONET) mediante la combinación de interfaces DWDM en el router con una capa DWDM ópticamente conmutada. Esta arquitectura simplificada mejora la flexibilidad, eficiencia energética y fiabilidad de la red core, mientras que proporciona funcionamiento y ahorro de costos.

Muchos de los problemas con las redes de transporte convencionales son el resultado de la separación de IP y las capas ópticas y la necesidad de convertir el tráfico para el transporte entre estas capas. El enfoque IP sobre DWDM fusiona las capas IP y óptica en una red única y flexible. Este enfoque elimina la necesidad de enlaces fijos DWDM, en su lugar emplea una capa óptica flexible y reconfigurable e interfaces DWDM sintonizables en el router. Como resultado, las compañías pueden reducir la necesidad de conversión eléctrico – óptico. (Fig.2.43).

A pesar de que la integración de IP y las capas óptica no era posible hace unos años, las recientes innovaciones de redes ópticas han hecho de esta arquitectura una opción viable para los proveedores de servicios. Estos avances incluyen innovaciones tales como la interfaz física WDM (WDM-PHY) para los router y la evolución de los ROADM.

En el pasado, al momento de elegir las interfaces para el router, las compañías tenían dos opciones: la LAN-PHY estándar 10 Gigabit Ethernet y el paquete sobre SONET (POS), usualmente OC-192, para el transporte de IP sobre SONET. El estándar LAN-PHY proporciona un medio de asignación de las tramas Ethernet directamente sobre un circuito óptico 10 Gigabit Ethernet. Esta estrategia es una solución eficaz y relativamente barata, pero no soporta las características esenciales de operación, administración, mantenimiento y aprovisionamiento (OAM & P), las características necesarias para los proveedores para poder gestionar las redes de core. Como resultado, muchas compañías utilizan interfaces IP sobre SONET, que soportan OAM & P. Sin

embargo, debido a que este modelo empaqueta IP dentro de TDM y debido al overread SONET, que requiere una inversión adicional.

Una arquitectura IP sobre DWDM se basa en una nueva generación de interfaces 10 Gigabit Ethernet, que pueden denominarse WDM-PHY. Las interfaces WDM-PHY combinan la interface básica LAN-PHY con el estándar ITU-T G.709 (OTN), que permite que las tramas Ethernet que sean mapeadas en contenedores digitales que leven la información OAM & P que los proveedores de servicios requieren. Como resultado, los proveedores pueden obtener las ventajas de Ethernet sin renunciar a la supervisión de la red y la capacidad de gestión.

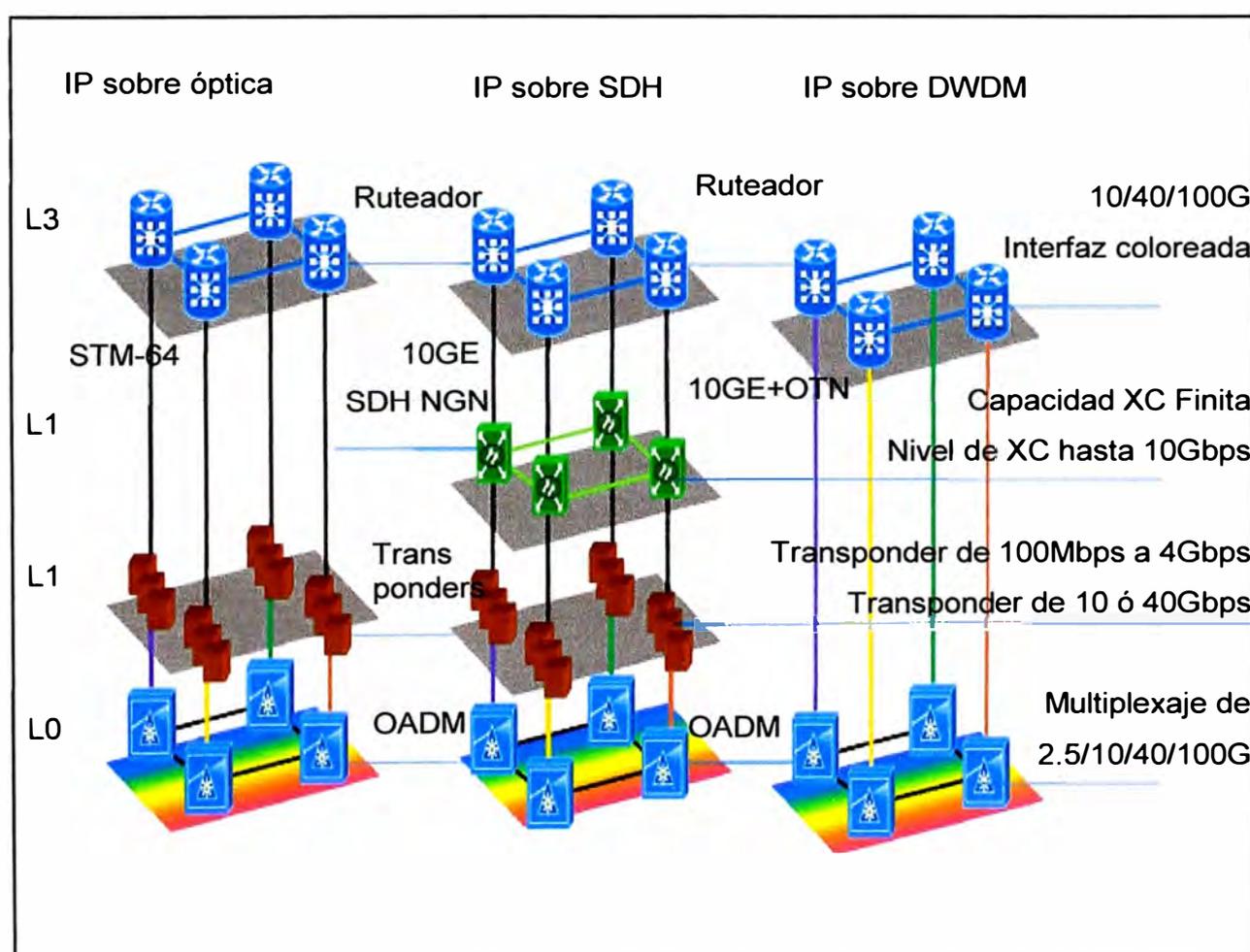


Fig.2.43 Comparación de arquitecturas de red core

A partir de las interfaces WDM-PHY y las innovaciones de tecnología ROADM, la arquitectura IP sobre DWDM puede ofrecer muchas ventajas sobre las arquitecturas convencionales arquitecturas de core de red.

Las redes basadas en SONET/SDH han desempeñado un papel crucial en las capacidades de red, pero posee limitaciones de flexibilidad y escalabilidad, las redes del mañana exigirán las capacidades de OTN. Mientras que SONET/SDH se diseñó para trabajar con una única longitud de onda, OTN permite manejar transmisiones de múltiples longitudes sobre una única fibra para conseguir capacidades de transmisión del orden de Terabits por segundo. OTN asegura interoperabilidad entre varios tipos de interface, del mismo modo que SDH/SONET. Una red OTN se compone de un conjunto de elementos ópticos conectados mediante enlaces de fibra óptica, y proporcionan las funcionalidades de multiplexación, transporte, gestión, encaminamiento, supervisión, y supervivencia de los canales ópticos.

Las innovaciones recientes en la tecnología DWDM, incluyendo una nueva generación de arquitecturas ROADM, permiten a los proveedores de servicios implementar una capa de transporte óptico más flexible y rentable, y con amplias prestaciones. La arquitectura ROADM ofrece interconectividad transparente entre los nodos, flexibiliza la agregación y desagregación de longitudes de onda por configuración, y soporta múltiples tasas de transmisión, incluyendo 2.5 Gbps, 10 Gbps, y 40 Gbps. En el futuro, la arquitectura ROADM soportará más sofisticadas redes de malla y mejorar la función del plano de control. Idealmente, estos avances permitirán a la capa IP para configurar de forma dinámica y volver a configurar la capa de transmisión óptica en respuesta al tráfico IP.

CAPITULO III INGENIERIA DEL PROYECTO

3.1 Red propuesta

En este ítem se va a describir la red que se va a emplear y su topología.

De acuerdo con el punto 1.2 donde se describe el problema, se indica que se va a implementar de un anillo 10 GigabitEthernet para la red MetroEthernet.

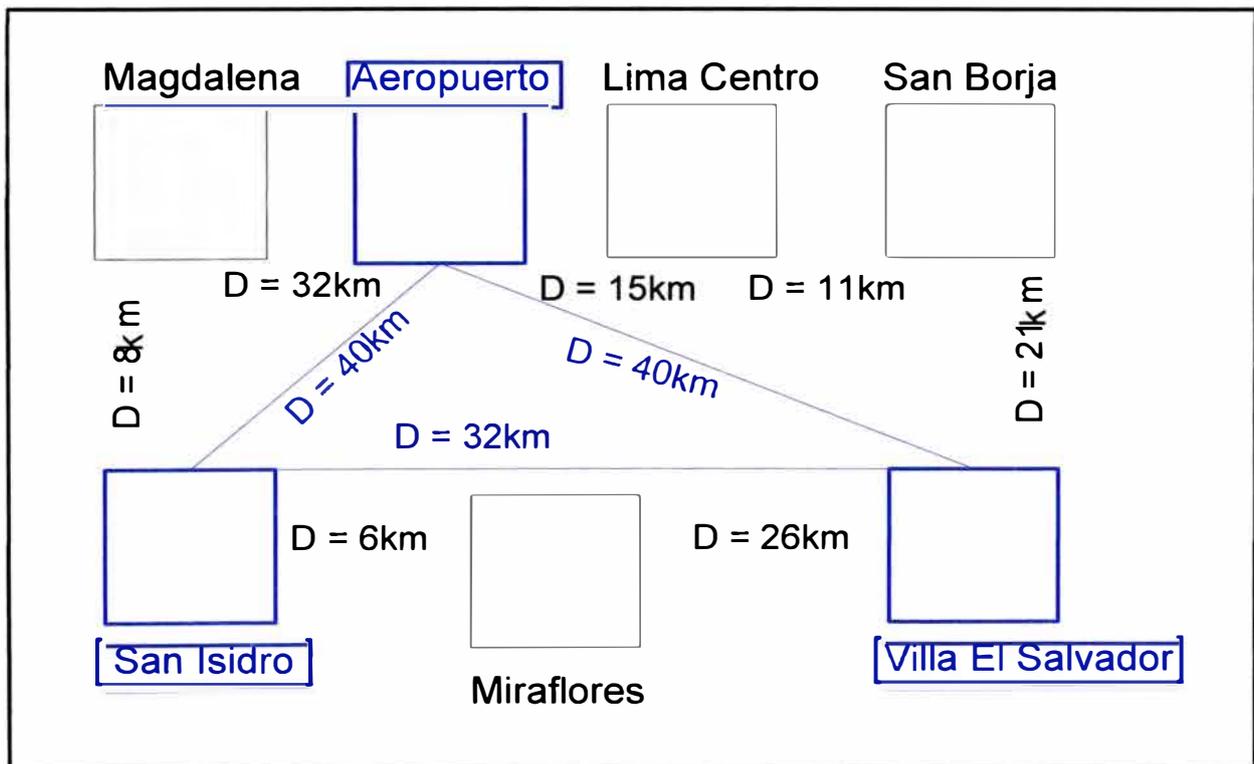


Fig.3.1 Nueva configuración 10 GigabitEthernet

Opción 1: Emplear la planta externa del anillo 1Gigabit actual, pero debido a que el nuevo equipamiento 10Gigabit estará disponible solamente en los POP San Isidro, San Borja y Aeropuerto, esta opción no es viable. Por supuesto que la migración a 10G de los otros POP ocurrirá en el futuro, pero no es una necesidad inmediata.

Opción 2: Insertar el equipamiento 10Gigabit empleando la fibra actual del anillo 1Gigabit, pero tendríamos un anillo mixto, donde la velocidad máxima sería la común a todo el equipamiento, es decir, 1Gigabit, con lo cual no se cumple el objetivo primario.

Opción 3: Implementar un anillo 10Gigabit en paralelo al actual, este anillo tendrá equipos 10Gigabit en solamente 3 POP, esta configuración se muestra en azul en la Fig.3.1.

Esta configuración se puede implementar desplegando un nuevo tendido de fibra óptica. Los costos asociados al tendido de fibra son demasiado elevados, y gran parte de estos costos no están asociados a la fibra óptica, sino a permisos y obras civiles. Esta solución no es escalable, porque, por ejemplo, llegado el momento de incluir otros POP en este anillo 10G, se tendría que realizar más tendido de fibra con los costos que esto supone. Esta configuración también se puede implementar empleando WDM, haciendo uso de la fibra óptica actualmente instalada G.652, transportando longitudes de onda de 10Gigabit de capacidad cada una. Este enfoque no requiere el despliegue adicional de fibra óptica, pero sí de equipamiento adicional en cada nodo. Es una solución escalable porque podrá transportar el anillo 1G actual, el anillo SDH existente, el nuevo anillo 10G y soportará el crecimiento futuro de la red.

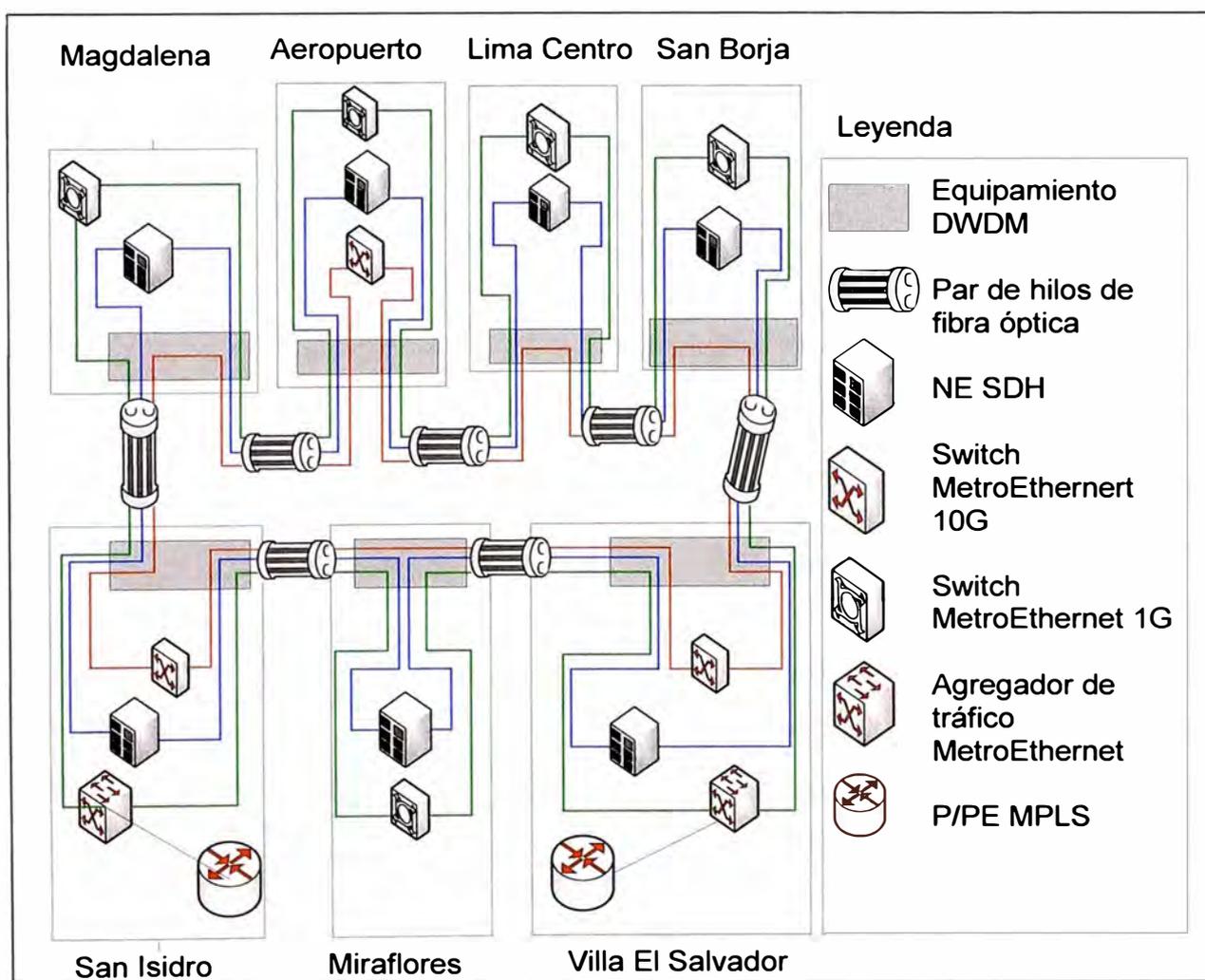


Fig.3.2 Red propuesta

La red propuesta se muestra en la Fig.3.2:

Las redes ahora son transportadas a través de equipamiento DWDM, el anillo 1G se muestra en color verde, el anillo SDH se muestra en color azul, y el nuevo anillo 10G requerido se muestra en color rojo.

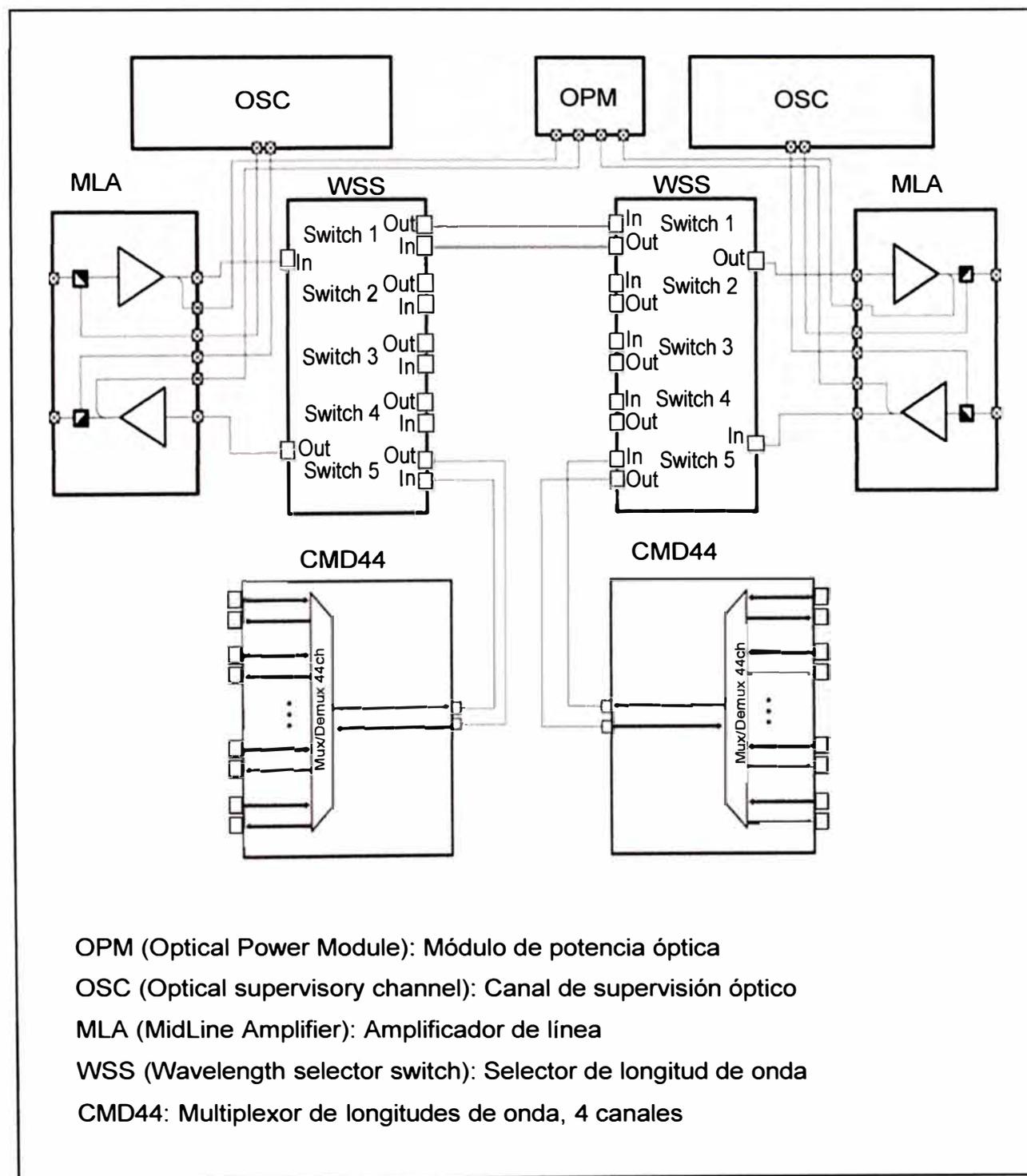


Fig.3.3 OADM que será empleado

Además, para el nuevo anillo se propone emplear tarjetas basadas en la recomendación G.709, con la finalidad de facilitar las tareas de gestión y optimizar el tiempo de respuesta ante fallos.

De los dos pares de fibra existentes, uno de ellos se empleará en el anillo DWDM, a través del otro par se puede conservar el anillo 1G, de modo que sirva de contingencia en caso de fallas en el anillo 10G. En el futuro se podrá realizar la migración del anillo 1G a la red DWDM, y finalmente completar el anillo 10G en todos los nodos, y cada equipo 1G se agregará en su respectivo equipo 10G del mismo POP. El anillo SDH empleará la red DWDM, la encapsulación se justifica debido a que los servicios efectivos son TDM.

El diseño no requiere de nodos de amplificación, si bien podría requerir amplificadores integrados en las tarjetas de línea.

Se propone emplear un sistema DWDM en anillo de 44 canales empleando equipamiento Nortel, sin embargo en un inicio se implementará únicamente 3 canales.

Debido a que en todos los POP se va a dejar al menos una señal (señales SDH), los tipos de nodo a implementar es OADM en todos los casos.

De acuerdo a las opciones de equipamiento para agregar/desagregar canales dentro de un OADM, además de factores económicos y de crecimiento futuro, se empleará WSS y multiplexores de 44 canales. Así, los OADM en el presente diseño tendrán una configuración según la Fig.3.3.

Los MLA son amplificadores que se encuentran en los extremos de línea del OADM, es decir, son los que preamplifican las señales recibidas desde la planta externa para pasarlas a los WSS, y asimismo, amplifican las señales que serán enviadas por el OADM hacia la planta externa.

Los OSC son tarjetas que procesan el canal de supervisión, y los OPM son tarjetas que procesan esta información, y sirve, de acuerdo al desarrollo del fabricante, para alimentar las variables del protocolo de autocompensación de potencia. Por ejemplo, en el caso de Nortel se denomina DOC (Domain Optical Control).

Dentro de los WSS, el Switch 1 es para los canales de paso, mientras que en el switch 5 se conectan los multiplexores de 44 canales, éstos agregarán y desagregarán las señales provenientes de los transponder conectados a ellos.

3.2 Tipo de fibra

En este ítem se va a determinar el tipo de fibra que se puede emplear en el diseño. El empleo de fibra multimodo no aplica en este caso, debido a que el alcance es de unos cientos de metros:

Como se describe en el ítem 3.5.1, la dispersión máxima permitida en la ecuación (3.2) es $\sigma_{\max} = 25\text{ps}$, por lo cual el ancho de banda analógico es:

$$\Delta f = 0.187 / \sigma$$

$$\Delta f = 0.187/25\text{ps} = 7.48\text{Ghz}$$

$$\Delta f = 7.48\text{Ghz}$$

La fibra multimodo ofrece un ancho de banda de 2Ghz.km, la distancia máxima a cubrir empleando este tipo de fibra sería

$$2\text{Ghz.km}/7.48\text{Ghz} = 267\text{m}$$

Este valor de 267m es insuficiente en nuestro caso. Con lo cual, se empleará fibra monomodo, consistente con la elección de conservar la planta externa existente basada en G.652C. Las limitaciones por la dispersión que afecta la transmisión monomodo se analizará en el ítem 3.5

3.3 Recomendación del uso de frecuencias ITU-T

El estándar G.694 establece el uso de las frecuencias a emplear en las bandas C, L y S en sistemas multicanal, con espaciamiento de 50 y 100Ghz.

Considerando que la fibra que se encuentra instalada es G.652C, nuestra ventana de trabajo es la banda C, y en esta banda:

Empleando espaciamiento de 100Ghz, se parte desde 1530.33nm (195.90Thz) hasta 1569.59nm (191Thz). Tenemos entonces hasta 50 canales

Empleando espaciamiento de 50Ghz, se parte desde 1529.94nm (195.95Thz) hasta 1569.59nm (191Thz). Tenemos entonces hasta 100 canales.

Los fabricantes desarrollan equipamiento en su mayoría con 4 variantes, cada una con más capacidad (y más costosa) que la anterior: 40 canales en una sola banda a 100Ghz, 80 canales empleando 2 bandas a 100Ghz, 80 canales en una sola banda a 50Ghz ó 160 canales en dos bandas a 50Ghz.

Al indicar 40 canales, hay que tener en cuenta que existen variantes alrededor de 40 canales (36, 40, 44, 45), del mismo modo, al hablar de 80 canales, existen variantes alrededor de 80 (72, 80, 88, 90).

Por ejemplo, a la fecha, Huawei ha desarrollado su sistema BWS1600G, el cual trabaja con 40 u 80 canales por banda (C ó L), a 100 o 50Ghz respectivamente, empleando ambas bandas simultáneamente a 50Ghz puede llegar a operar 160 canales. Mientras que, Nortel ha desarrollado su sistema OME, que opera en banda C con 44 u 88 canales, en 9 grupos de 4 u 8 canales espaciados 100 ó 50Ghz respectivamente, adicionando 8 ó 16 canales dentro del espaciamiento entre grupos, preservando el espaciamiento de 100Ghz.

3.4 Consideraciones de Potencia

Las pérdidas de potencia que se deben considerar en un sistema DWDM son las asociadas a la distancia del enlace entre nodos y las pérdidas dentro del nodo OADM (pérdidas de inserción y adecuaciones de potencia), que a continuación se observan:

3.4.1 Atenuaciones de los enlaces entre nodos

Estas pérdidas son debidas a la atenuación de la fibra óptica debido a la longitud recorrida, pérdidas por empalmes y conectores. Además de tener un margen por envejecimiento y para futuras reparaciones.

Denominación	Enlace	Distancia (km)	Pérdidas [dB]					Total [dB]
			Atenuación (0.4dB/km)	Empalmes (0.2dB c/u)	6 conectores (0.2dB c/u)	Margen del cable (2dB)	Margen de envejecimiento (0.3dB/km)	
L1	Magdalena - Aeropuerto	32	12.80	1.40	1.20	2.00	9.60	27.00
L2	Miraflores - Villa El Salvador	26	10.40	1.20	1.20	2.00	7.80	22.60
L3	San Borja - Villa El Salvador	21	8.40	1.00	1.20	2.00	6.30	18.90
L4	Aeropuerto - Lima Centro	15	6.00	0.60	1.20	2.00	4.50	14.30
L5	Lima Centro - San Borja	11	4.40	0.40	1.20	2.00	3.30	11.30
L6	Magdalena - San Isidro	8	3.20	0.20	1.20	2.00	2.40	9.00
L7	San Isidro - Miraflores	6	2.40	0.20	1.20	2.00	1.80	7.60

Tabla 3.1 Pérdidas por atenuación en los enlaces entre nodos

Se debe considerar:

La atenuación debida a la longitud de la fibra óptica, se puede cuantificar empleando el coeficiente de atenuación [db/km] que es fijo para las fibras basadas en estándares. En el caso de la fibra estándar G.652C, se tiene $\alpha = 0.4\text{dB/km}$.

Al fusionar los empalmes se incluyen pérdidas del rango de 0.1 a 0.2dB ($\alpha_e = 0.2\text{dB}$). En estos casos, se incluyen elementos de encapsulado, para proteger los empalmes de agentes externos. Se va a considerar que se tiene un empalme cada 4km.

En cuanto a las pérdidas en los conectores, para los extremos del enlace que se está diseñando se emplean conectores LC, que son los empleados para la transmisión de datos, y nominalmente introducen pérdidas de 0.2dB cada uno ($\alpha_c = 0.2\text{dB}$). Además, en cada extremo del enlace se cuenta con patchcord a la salida del ODF, el cual servirá para la conexión con los equipos activos del sistema. Por tanto, para cada enlace se tiene la existencia de seis conectores.

El margen de seguridad para los cables debido a futuras reparaciones está entre 1 y 2 dB ($M_c = 2\text{dB}$). El margen de reserva para envejecimiento por condiciones ambientales y paso del tiempo es del orden de 0.1 a 0.6 dB/km. Se tomará como referencia para el cálculo el valor de 0.3dB/km para el margen de reserva.

En la Tabla 3.1 se muestran las pérdidas obtenidas por atenuación.

Es necesario considerar un incremento de atenuación debido al empleo de fibras compensadoras de dispersión (DCF: Dispersion Compensating Fiber), la descripción y el cálculo se encuentran en el ítem 3.5.1, obteniendo así la 0.

Denominación	Enlace	Distancia (km)	Pérdidas [dB]						Total [dB]
			Atenuación (0.4dB/km)	Empalmes (0.2dB c/u)	6 conectores (0.2dB c/u)	Margen del cable (2dB)	Margen de envejecimiento (0.3dB/km)	Compensación por DCF [dB]	
L1	Magdalena - Aeropuerto	32	12.80	1.40	1.20	2.00	9.60	5.90	32.90
L2	Miraflores - Villa El Salvador	26	10.40	1.20	1.20	2.00	7.80	4.70	27.30
L3	San Borja - Villa El Salvador	21	8.40	1.00	1.20	2.00	6.30	3.90	22.80
L4	Aeropuerto - Lima Centro	15	6.00	0.60	1.20	2.00	4.50	2.65	16.95
L5	Lima Centro - San Borja	11	4.40	0.40	1.20	2.00	3.30	1.85	13.15
L6	Magdalena - San Isidro	8	3.20	0.20	1.20	2.00	2.40	1.10	10.10
L7	San Isidro - Miraflores	6	2.40	0.20	1.20	2.00	1.80	0.70	8.30

Tabla 3.2 Pérdidas por atenuación considerando fibras para compensar dispersión

3.4.2 Pérdidas dentro del nodo OADM

Debido a que la pérdida de potencia (y también la amplificación) depende de la longitud de onda de la señal, todas las pérdidas, mediciones y cálculos de las especificaciones se realizan tomando en cuenta la longitud de onda de operación.

Para sistemas de un solo canal (no WDM), las mediciones y cálculos se realizan normalmente a 1310 y/o 1550nm. Para los sistemas WDM el presupuesto de potencias considera la pérdida de cada canal individualmente. De este modo, las pérdidas de potencia deben considerarse entre los transponder extremo a extremo. En principio es el transponder el que debe transmitir la señal empleando un canal y en último término, el que debe de poder decodificarla en la recepción.

Los nodos OADM a ser empleados se muestran en la Fig.3.4.

Los módulos MLA de amplificación, tienen preamplificadores con un rango dinámico de -40 a $+10$ dBm, mientras que amplificadores de línea presentan una ganancia de 20dB con una potencia máxima de salida de 17dBm. Es decir, las potencias de ingreso menores o iguales a 3dBm se amplificarán 20dB, valores superiores de potencia de ingreso como máximo tendrán un valor de 17dBm de potencia a la salida.

Analicemos el flujo de potencias en un OADM para los canales de paso, es decir, que no se agregan ni desagregan en el OADM. Según la Fig.3.5:

Potencia en [D]

Para calcular la potencia a transmitir en el punto [D], tenemos que considerar la potencia máxima que permite el receptor en el otro extremo, en el OADM remoto se tiene el mismo preamplificador, de modo que la potencia máxima que puede recibir el receptor remoto es 10dBm. El peor caso para el receptor es cuando la atenuación en el tramo de planta externa es menor, de acuerdo a los valores obtenidos en la 0 el peor caso es de 8.3dB de atenuación, de modo que la potencia máxima en [D] debe ser 18.3dBm, ya que al atenuarse 8.3dB se tendrá un máximo de 10dBm en la entrada del receptor. Para contar con un margen de seguridad, vamos a considerar en el diseño una potencia fija de transmisión en [D] de 10dBm.

Ahora, partiendo de un nodo, por ejemplo San Borja, analicemos el OADM de Villa El Salvador (considerando los puntos referenciales de la Fig.3.5 y también los valores de potencia de la Tabla 3.3).

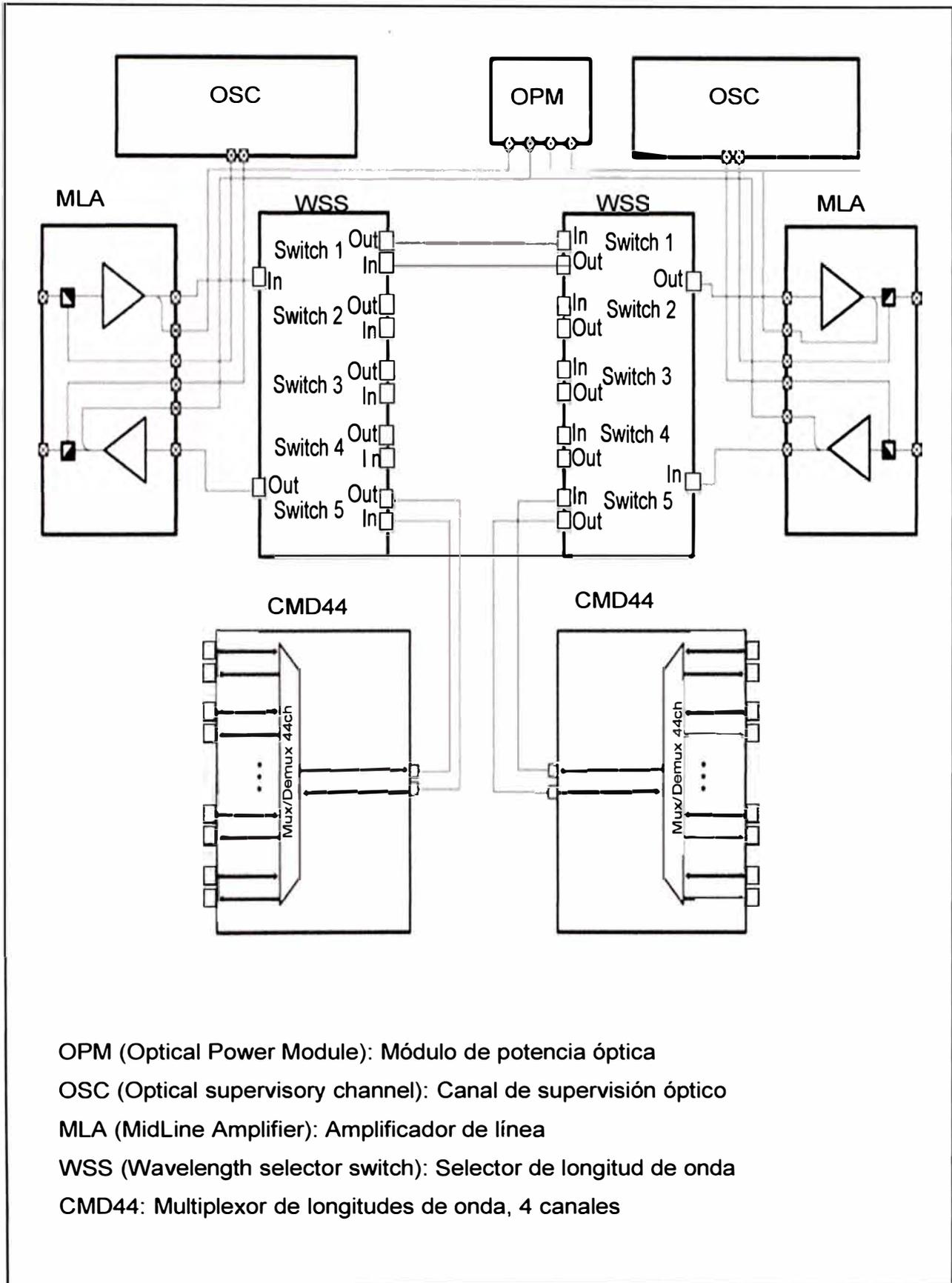


Fig.3.4 OADM que será empleado

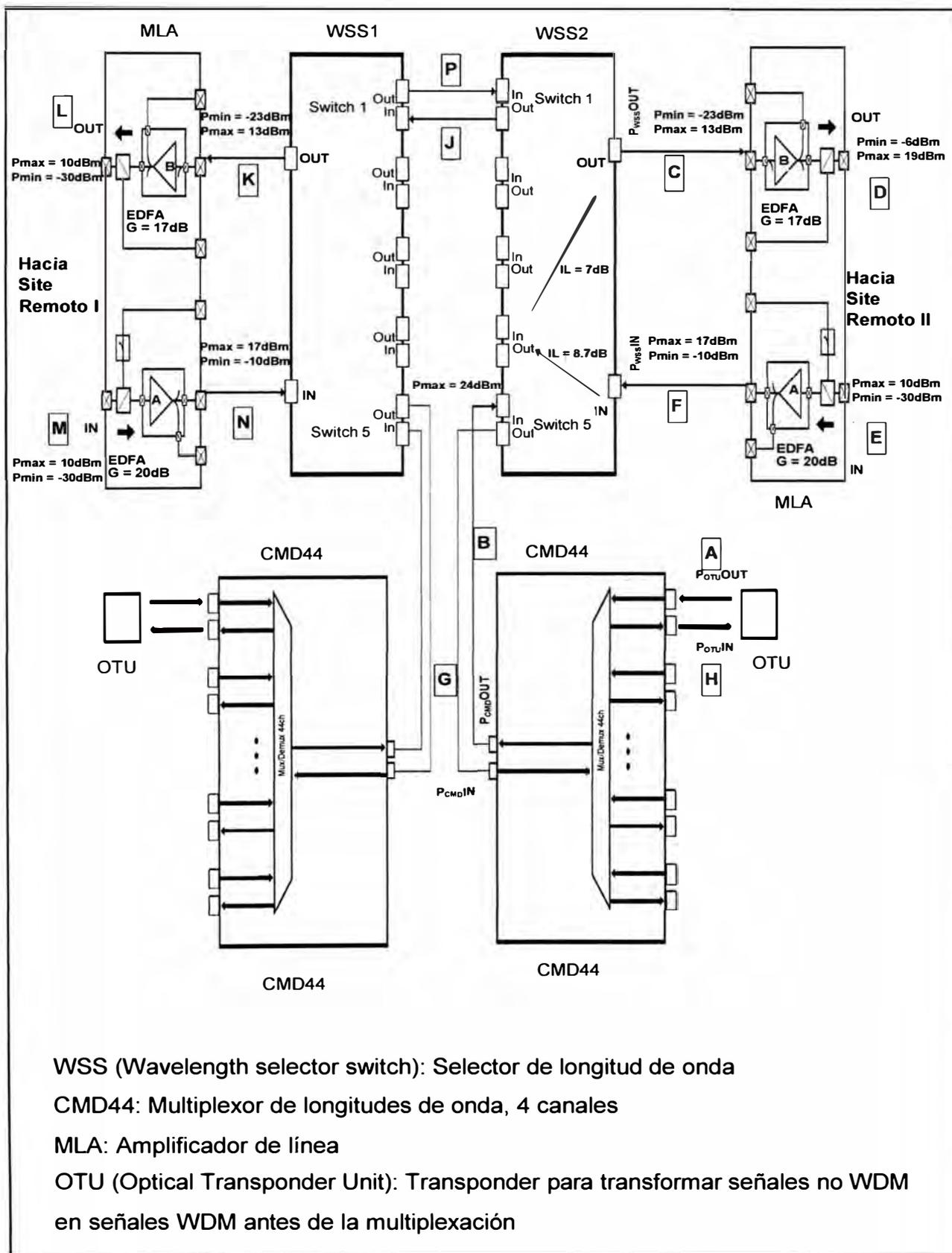


Fig.3.5 Consideraciones de potencia los canales agregados dentro de un OADM

La atenuación entre San Borja y Villa El Salvador es de 22.80dB, de modo que una potencia de 10dBm desde San Borja será atenuada y en Villa El Salvador será recibida en el punto [M] con:

$$10\text{dBm} - 22.80\text{dB} = -12.80\text{dBm} \quad (\text{potencia en [M]})$$

Luego del preamplificador (ganancia de 20dB) la señal tendrá una potencia de:

$$-12.80\text{dBm} + 20\text{dB} = 7.20\text{dBm} \quad (\text{potencia en [N]})$$

El primer WSS tiene una pérdida de inserción de 8.7dB (de canal común a puerto, de [N] a [P]) y el segundo WSS tiene una pérdida de inserción de 7dB (de puerto a canal común, de [P] a [C]), entonces a la entrada del amplificador [C] tendremos:

$$7.20\text{dBm} - 8.7\text{dB} - 7\text{dB} = -8.5\text{dBm} \quad (\text{potencia en [C]})$$

En este punto se puede colocar un atenuador para lograr una señal menor, pero éste no es el caso. Luego del paso por el amplificador (ganancia de 17dB) nos dará la potencia de salida de:

$$-8.5\text{dBm} + 17\text{dB} = 8.5\text{dBm} \quad (\text{potencia en [D]})$$

Al realizar un análisis similar para todo el recorrido, tenemos como resultado la Tabla 3.3. Estas potencias son suficientes para operar dentro del rango dinámico de los receptores de los OADM (-30 a 10dBm).

Se analiza ahora el flujo de potencias en un OADM para los canales de agregación/desagregación, también en referencia a la Fig.3.5:

De acuerdo con la Tabla 3.3, las potencias que se reciben en los preamplificadores (potencias recibidas en [M]) están en el rango de -20.30 a -0.10dBm, estas son recibidas tanto en los puntos [E] y [M] (Fig.3.5), luego de la amplificación de 20dB, en [F] se tendrán salidas entre -0.3 y 17.0dBm:

$$-20.30\text{dBm} + 20\text{dB} = -0.3\text{dBm} \quad (\text{potencia mínima en [F]})$$

$$-0.10\text{dBm} + 20\text{dB} = 19.9\text{dBm} \quad (\text{Max} = 17\text{dBm}) \quad (\text{potencia máxima en [F]})$$

La pérdida de inserción de 8.7dB genera una salida en [G] entre -9 y 8.3dBm:

$$-0.30\text{dBm} - 8.7\text{dB} = -9\text{dBm} \quad (\text{potencia mínima en [F]})$$

$$17\text{dBm} - 8.7\text{dB} = 8.3\text{dBm} \quad (\text{potencia máxima en [F]})$$

Site Remoto I	OADM		Site Remoto II	Atenuación hacia site I [dB]	Atenuación hacia site II [dB]	Potencia de salida [D] del Site I [dBm]	Potencia recibida [M] desde el Site I [dBm]	P[N] [dBm]	P[P] [dBm]	P[C] [dBm]	Atenuador previo a la amplificación [dB]	Potencia de salida [DI] hacia el Site II [dBm]
San Borja	1	Villa El Salvador	Miraflores	22.80	27.30	10.00	-12.80	7.20	-1.50	-8.50	0.00	8.50
Villa El Salvador	2	Miraflores	San Isidro	27.30	8.30	8.50	-18.80	1.20	-7.50	-14.50	0.00	2.50
Miraflores	3	San Isidro	Magdalena	8.30	10.10	2.50	-5.80	14.20	5.50	-1.50	5.50	10.00
San Isidro	4	Magdalena	Aeropuerto	10.10	32.90	10.00	-0.10	17.00	8.30	1.30	5.70	12.60
Magdalena	5	Aeropuerto	Lima Centro	32.90	16.95	12.60	-20.30	-0.30	-9.00	-16.00	0.00	1.00
Aeropuerto	6	Lima Centro	San Borja	16.95	13.15	1.00	-15.95	4.05	-4.65	-11.65	0.00	5.35
Lima Centro	7	San Borja	Villa El Salvador	13.15	22.80	5.35	-7.80	12.20	3.50	-3.50	3.50	10.00

Tabla 3.3 Cuadro de potencias entre los OADM. Los puntos [D, M, P y C] se refieren a los indicados en la Fig.3.5

Se debe restar la pérdida de inserción de 1dB del multiplexor CMD44, en [H] tendremos entre -10 y 7.3dBm, hacia los puertos de recepción de los transponder:

$$-9\text{dBm} - 1\text{dB} = -9\text{dBm} \quad (\text{potencia mínima en [H]})$$

$$8.3\text{dBm} - 1\text{dB} = 7.3\text{dBm} \quad (\text{potencia máxima en [H]})$$

De este modo, el rango dinámico del transponder se puede especificar:

La sensibilidad deberá ser menor a -10dBm y la potencia máxima deberá ser 7.3dBm, pero puede ser menor si se emplea atenuadores. La potencia máxima a la entrada del multiplexor CMD44 la fijaremos en 0dBm, cuando el sistema opere a máxima capacidad se tendrá una potencia de la señal compuesta de 16.4dBm:

$$0\text{dBm} + 10 \cdot \text{Log}(44) = 16.4\text{dBm} \quad (\text{potencia máxima en [B]})$$

Esta potencia será la máxima a la entrada del WSS, y con esto operamos dentro del margen, ya que la potencia máxima que soporta es 24dBm. Esta condición puede obtenerse con potencias de transponder mayores pero reduciéndolas a 0dBm empleando atenuadores.

En resumen, las atenuaciones entre los nodos no son una limitante en nuestro diseño, al emplear equipamiento Nortel como ejemplo en el diseño, los OADM a implementar tendrán: 2 amplificadores, 2 WSS, 2 multiplexores CDM44 y atenuadores en algunos casos, sin embargo las potencias obtenidas en transmisión no limitan la recepción en el OADM siguiente, debido a que se encuentran dentro del rango dinámico de operación. Asimismo, los transponder deberán tener una sensibilidad menor a -10dBm y la potencia máxima de recepción (usualmente entre 0 y 3dBm) en diseño se puede obtener empleando atenuadores. La potencia de entrada a los multiplexores CMD44 deberá ser 0dBm, pudiendo emplear transponder con valores mayores de potencia pero atenuados para alcanzar este valor.

3.5 Limitaciones por la dispersión

Como se expuso anteriormente, la dispersión limita la distancia máxima del enlace, ya que el ensanchamiento aumenta con la distancia y con la tasa de bits. Los límites son establecidos en base a criterios de conservación de potencia y a la duración del bit. Para evitar interferencia intersímbolos (ISI), el ensanchamiento máximo permitido en el pulso es el 25% del ancho del bit. Esto permite limitar la anchura eficaz (σ), según:

$$\sigma \leq \frac{0.25}{B} \quad (3.1)$$

Considerando que $B = 10^{10}$ bps, reemplazando este valor en la ecuación (3.1) tenemos:

$$\sigma_{MAX} = 25\text{ps} \quad (3.2)$$

Además, considerando que la anchura eficaz se relaciona con el ancho de bit:

$$\sigma = \Delta T / \sqrt{2} \quad (3.3)$$

Reemplazando el valor de σ_{MAX} en la ecuación (3.3) tenemos:

$$25\text{ps} = \Delta T_{MAX} / \sqrt{2}$$

Con lo cual:

$$\Delta T_{MAX} = 35.35\text{ps} \quad (3.4)$$

De este modo el ensanchamiento máximo de pulso, para evitar la interferencia intersímbolos, es 35.35ps. Y este valor es la suma de todas las dispersiones en el sistema.

3.5.1 Dispersión Cromática

El ensanchamiento del pulso debido a la dispersión cromática depende de la anchura espectral del transmisor óptico ($\Delta\lambda$), de la distancia (L) que recorre el haz de luz y del coeficiente de dispersión cromática (Dc). El coeficiente de dispersión cromática Dc [ps/nm.km] nos indica cuántos picosegundos se ensancha un pulso por cada kilómetro recorrido y por cada nanómetro relacionado a la anchura espectral del emisor.

Tenemos entonces, para el cálculo del ensanchamiento del pulso:

$$\Delta T = Dc \times \Delta\lambda \times L \quad (3.5)$$

Donde:

ΔT : ensanchamiento del pulso [ps]

Dc: Coeficiente de dispersión cromática [ps/nm.km], forma parte de las especificaciones técnicas del fabricante de la fibra óptica. Por ejemplo, para una fibra monomodo G.652C, se tienen valores que $Dc \leq 20$ ps/nm.km.

$\Delta\lambda$: Anchura espectral del emisor de luz [nm], forma parte de los parámetros del fabricante.

Por ejemplo, en el caso de emisores basados en láser, la anchura espectral es del orden de 0.1nm. En el diseño vamos a considerar como valor comercial, $\Delta\lambda = 0.2\text{nm}$.

L: longitud del enlace [km]

Analicemos el enlace Magdalena – Aeropuerto: Tenemos $L = 32\text{km}$, considerando que $\Delta\lambda = 0.2\text{nm}$ y $D_c = 20 \text{ ps/nm.km}$, al reemplazar estos valores en la ecuación (3.5) tenemos:

$$\Delta T = 20 \frac{\text{ps}}{\text{nm.km}} \times 0.2\text{nm} \times 32\text{m}$$

$$\Delta T = 128\text{ps}$$

Con este resultado, se observa que es necesario compensar la dispersión en este tramo, debido a que se supera el valor máximo de dispersión obtenido en (3.4).

Al realizar esta misma operación sobre los demás enlaces, obtenemos los valores de ensanchamiento de pulso debido a la dispersión en todos los tramos. Para la implementación del anillo 10GigabitEthernet, debido a que este equipamiento se encuentra en esta etapa solamente en 3 nodos, se requiere que esta longitud de onda sea de paso en los demás OADM. De este modo, en el cálculo de dispersión es necesario considerar 3 tramos que no se unen directamente, sino a través de OADM de paso: San Isidro – Aeropuerto, Aeropuerto – Villa El Salvador y Villa El Salvador – San Isidro. Estos valores de dispersión se muestran en la Tabla 3.4.

Denominación	Enlace	Distancia (km)	Atenuación [dB]	Ensanchamiento del pulso [ps] Sin compensación
L1	Magdalena - Aeropuerto	32	20.4	128
L2	Miraflores - Villa El Salvador	26	17.8	104
L3	San Borja - Villa El Salvador	21	15.6	84
L4	Aeropuerto - Lima Centro	15	12.8	60
L5	Lima Centro - San Borja	11	11	44
L6	Magdalena - San Isidro	8	9.6	32
L7	San Isidro - Miraflores	6	8.8	24
L8	San Isidro - Aeropuerto	40	24.2	160
L9	Aeropuerto - Villa El Salvador	47	27.2	188
L10	Villa El Salvador - San Isidro	32	20.6	128

Tabla 3.4 Valores de dispersión entre POPs

Nótese en la Tabla 3.4 que únicamente para Magdalena – San Isidro (L6) y San Isidro – Miraflores (L7) tenemos valores de dispersión debajo del límite obtenido en (3.4), por lo cual no sería necesario compensar en estos tramos. Sin embargo, la longitud de onda que une San Isidro – Aeropuerto (L8) que requiere compensación, pasa por el tramo Magdalena – San Isidro (L6), de modo que compensar L8 implica compensar L6. Del mismo modo, compensar L10 implica compensar L7. Entonces, todos los tramos requieren compensación de dispersión debido a la dispersión cromática.

Para el caso de Magdalena – Aeropuerto por ejemplo, se tiene un ensanchamiento de pulso de 128ps, se propone compensar 118ps para llegar a tener 10ps y poder así estar debajo del máximo establecido en (3.4). Tener un valor de ensanchamiento de pulso de 10ps, reemplazaremos $L = 32\text{km}$ y $\Delta\lambda = 0.2\text{nm}$ en la ecuación (3.5):

$$10\text{ps} = D_c \left[\frac{\text{ps}}{\text{nm. km}} \right] \times 32\text{km} \times 0.2\text{nm}$$

Con lo cual

$$D_c = 1.563\text{ps/nm. km.}$$

La dispersión [ps/nm] resultante debido a $D_c = 1.563\text{ps/nm. km}$, para $L = 32\text{km}$, es:

$$D = (1.563\text{ps/nm. km}) \times (32\text{km}) = 50\text{ps/nm.}$$

De este modo, el objetivo es tener 50ps/nm en recepción. La dispersión debida a $D_c = 20\text{ps/nm. km}$ es:

$$D = (20\text{ps/nm. km}) \times (32\text{km}) = 640\text{ps/nm}$$

De modo que se requiere compensar 490ps/nm. Considerando una fibra que compense -60ps/nm. km , se requiere:

$$\frac{490\text{ps/nm. km}}{60\text{ps/nm}} = 9.833\text{km}$$

Asimismo, esta fibra posee una pérdida por atenuación de 0.6dB/km, entonces la atenuación adicional en el tramo es de 5.9dB (considerar $9.833\text{km} \times 0.6\text{dB/km}$).

Es decir, para este tramo, 32km de fibra G.652 seguidos de 9.833km de fibra de compensación, dan como resultado un ensanchamiento de pulso de 10ps, e incrementa 5.9dB la atenuación en el tramo. Al realizar cálculos similares para los demás tramos, obtenemos los resultados de la Tabla 3.5. Nótese que al compensar los 7 tramos originales, se compensa también en los OADM para los canales de paso.

Denominación	Enlace	Distancia (km)	Atenuación [dB]	Ensanchamiento del pulso [ps] Sin compensación	Compensación requerida [ps]	Ensanchamiento del pulso [ps] Con compensación	Coefficiente requerido [ps/nm.km]	Dispersión requerida en recepción [ps/nm]	Dispersión debida a la distancia [ps/nm]	Compensación requerida [ps/nm]	Distancia requerida [km] de DCF con - 60ps/nm.km	Atenuación adicional considerando DCM [dB], 0.6dB/km
L1	Magdalena - Aeropuerto	32	20	128	118	10	1.563	50	640	59 0	9.833	5.90
L2	Miraflores - Villa El Salvador	26	18	104	94	10	1.923	50	520	47 0	7.833	4.70
L3	San Borja - Villa El Salvador	21	16	84	78	6	1.429	30	420	39 0	6.500	3.90
L4	Aeropuerto - Lima Centro	15	13	60	53	7	2.333	35	300	26 5	4.417	2.65
L5	Lima Centro - San Borja	11	11	44	37	7	3.182	35	220	18 5	3.083	1.85
L6	Magdalena - San Isidro	8	9.6	32	22	10	6.250	50	160	11 0	1.833	1.10
L7	San Isidro - Miraflores	6	8.8	24	14	10	8.333	50	120	70	1.167	0.70
L8	San Isidro - Aeropuerto	40	24	160		20						
L9	Aeropuerto - Villa El Salvador	47	27	188		20						
L10	Villa El Salvador - San Isidro	32	21	128		20						

Tabla 3.5 Compensaciones requeridas

3.5.2 Limitaciones por la dispersión PMD

ITU-T recomienda que el DGD (Differential Group Delay, ó retardo diferencial de grupo) promedio $\sigma_{\text{PMD Max}}$ entre los dos modos de polarización sea menor a 1/10 de la duración de un bit (en nuestro caso, la duración de un bit es 100ps), en otras palabras, tenemos:

$$\sigma_{\text{PMD Max}} = 10\text{ps}$$

Considerando la ecuación:

$$\sigma_{\text{PMD}} = D_p \times \sqrt{L} \quad (3.6)$$

Donde:

D_p [ps/km^{1/2}] es el coeficiente de dispersión PMD, para la fibra G.652C es un valor máximo de 0.5ps/km^{1/2}.

Entonces, en el peor caso ($L = 32\text{km}$ y $D_p = 0.5\text{ps/km}^{1/2}$), reemplazando en la ecuación (3.6), tenemos:

$$\sigma_{\text{PMD}} = 0.5 \frac{\text{ps}}{\text{km}^{1/2}} \times \sqrt{32\text{km}} = 2.83\text{ps}$$

Operando del mismo modo para los demás enlaces, obtenemos los valores de dispersión PMD y se muestran en la Tabla 3.6.

Denominación	Enlace	Distancia (km)	PMD [ps]
L1	Magdalena - Aeropuerto	32	2.83
L2	Miraflores - Villa El Salvador	26	2.55
L3	San Borja - Villa El Salvador	21	2.29
L4	Aeropuerto - Lima Centro	15	1.94
L5	Lima Centro - San Borja	11	1.66
L6	Magdalena - San Isidro	8	1.41
L7	San Isidro - Miraflores	6	1.22

Tabla 3.6 Dispersiones PMD en cada enlace

Con lo cual, la solución planteada no presentará limitaciones debido a PMD, ya que el valor obtenido es menor al establecido por recomendación.

3.6 Limitaciones por FWM

Tomando como base la información de la Fig.2.23, vemos que los efectos negativos de las ondas FWM son perjudiciales a partir de 17dBm, y considerando además que los enlaces entre nodos van a tener fibra con dispersión no nula, el FWM no va a afectar nuestro diseño.

3.7 Cálculo de la relación señal a ruido OSNR

Emplearemos las ecuaciones:

$$\text{OSNR}[\text{dB}] = P_o + 58 - \text{NF}[\text{dB}] \quad (3.7)$$

Donde:

P_o : Potencia de entrada

NF: Figura de ruido para los amplificadores, se asume el mismo en todo el tramo (5dB)

Y para un sistema compuesto por dos etapas con OSNR1 y OSNR2 respectivamente:

$$\frac{1}{\text{OSNR}} = \frac{1}{\text{OSNR1}} + \frac{1}{\text{OSNR2}} \quad (3.8)$$

En relación a la Fig.3.6, el OSNR medido desde el transponder OTU hacia el siguiente transponder (tramo A > B > C > D > M > N > Q > R).

Los tramos que varían el OSNR son C>D y N>Q, donde se tienen amplificadores.

Considerando la ecuación (3.8), tenemos entonces:

$$\frac{1}{\text{OSNR}_{A-R}} = \frac{1}{\text{OSNR}_{1C-D}} + \frac{1}{\text{OSNR}_{2N-Q}} \quad (3.1)$$

Para obtener OSNR_{1CD} a partir de la ecuación (3.7), consideremos:

P₀ = -16dBm que es, de acuerdo a la Tabla 3.3, el valor más bajo de potencia en [C]

NF = 5, para el amplificador EDFA:

$$\text{OSNR}_{1C-D} = 37\text{dB}$$

Nótese que si P₀ se incrementa, el OSNR también se incrementa, por lo cual 37dB es el menor valor que tenemos, y consideraremos el mismo valor en el tramo N>Q. Entonces, reemplazando estos valores en la ecuación (3.8).

$$\frac{1}{\text{OSNR}_{A-R}} = \frac{1}{37} + \frac{1}{37}$$

Con lo cual:

$$\text{OSNR}_{1A-R} = 18.5\text{dB}$$

De esta manera el OSNR de extremo a extremo es de 18.5dB y forma parte de la especificación del transponder. Es usual que el OSNR requerido sea inclusive del orden de los 10dB empleando corrección de errores de acuerdo a la recomendación G.709.

Los sistemas actuales tienen potencias P₀ del orden de 3dBm, consideremos como caso extremo que el transmisor tendrá un P₀ de 0dBm (1mW), suele emplearse un preamplificador, por su mejor estabilidad y bajo NF, consideremos un EDFA, el NF es del orden de 5dB; con lo cual el peor OSNR de nuestro sistema es de 32.4 dB, los receptores requieren en promedio 20dB de OSNR, con lo cual nuestro sistema no presentará problemas en la recepción, no requiriendo puntos intermedios de amplificación.

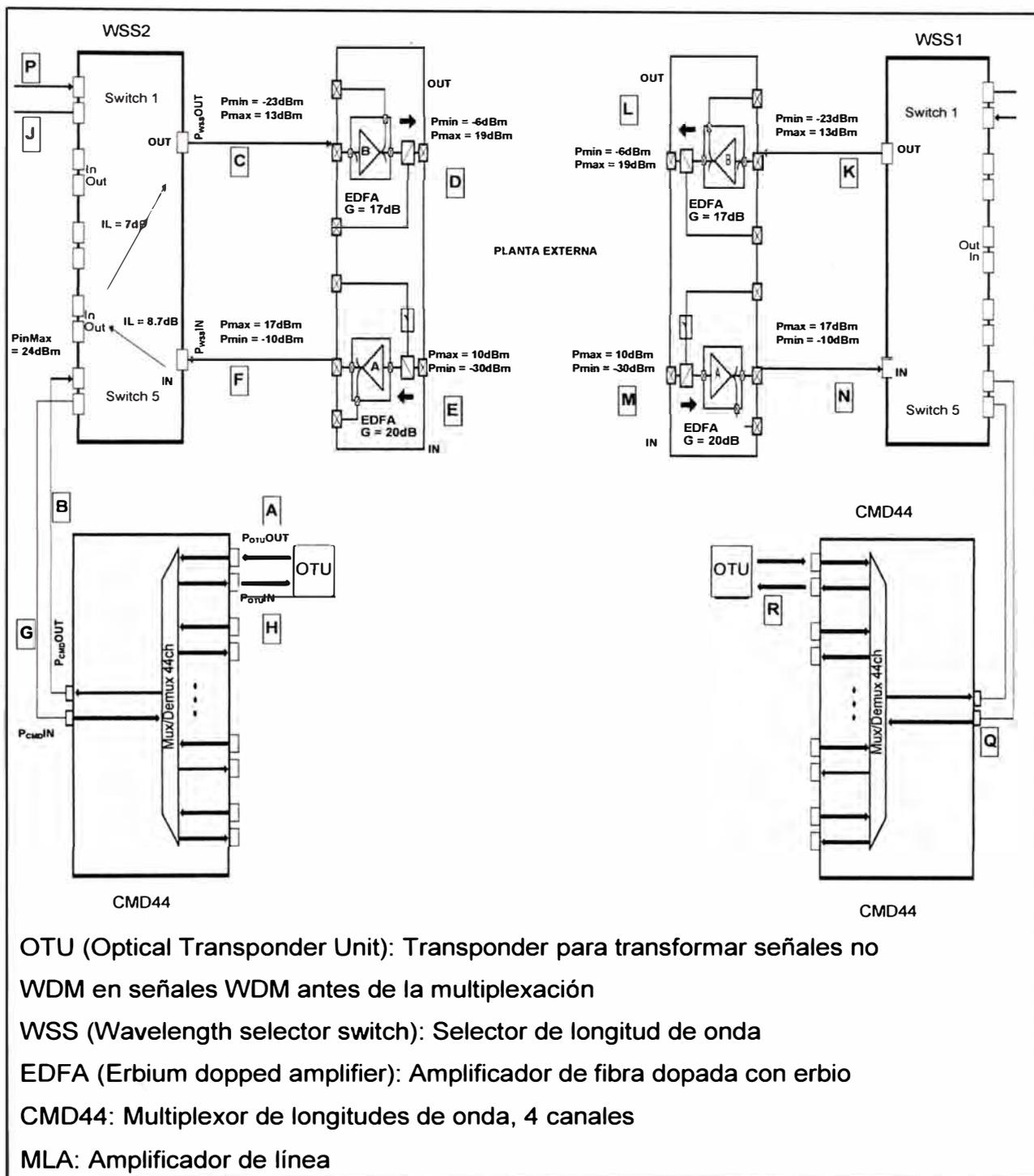


Fig.3.6 Cálculo del OSNR extremo a extremo

3.8 Equipamiento DWDM

Se requiere componentes para implementar un sistema DWDM compuesto por nodos OADM.

Del ítem 3.3, se requiere que el equipamiento sea compatible con la recomendación ITU-T G.694.1 y G.609, con espaciamiento de 100Ghz y capacidad de operar en banda C.

El OADM a ser empleado se muestra en la Fig.3.4. Cada OADM requiere cada uno:

2 amplificadores

2 WSS de 5 puertos cada uno

2 multiplexores CDM44 y

Atenuadores en algunos casos (los valores de atenuación según Tabla 3.3).

Para especificar los rangos de potencia de operación, se debe tener en cuenta las consideraciones de potencia dentro de un nodo OADM, ítem 3.4.2.

Las atenuaciones en los enlaces no limitan la recepción en el OADM, debido a que se encuentran dentro del rango dinámico de operación.

Para el anillo SDH, se requiere 14 transponder (2 por cada OADM) con capacidad de llevar señales STM-64. El anillo 10G no requiere transponder, ya que están integrados a las tarjetas del equipamiento 10GigabitEthernet.

Amplificadores

Los amplificadores deben ser basados en fibra dopada con erbio (EDFA), con etapa de preamplificación en recepción. Deben presentar ganancias mínimas de 20dB y 17dB en transmisión. Antes de la preamplificación debe poderse filtrar el canal OSC para permitir tareas de gestión, como monitoreo de la calidad de la señal, y debe permitir también multiplexar el canal de gestión OSC antes de la transmisión. En recepción debe tener una sensibilidad mínima de -30dBm y en transmisión manejar potencias de por lo menos 10dBm.

Selectores de canal, WSS

De 5 puertos y un canal común, con pérdidas de inserción como máximo de 8.7dB (de canal común a puerto) y 7dB (de puerto a canal común). Este equipamiento debe permitir agregar/desagregar cualquiera de los 44 canales en los puertos, teniendo adicionalmente VOAs internos por cada canal.

Multiplexores CMD44

Debe permitir multiplexar 44 canales espaciados 100Ghz en banda C, presentar una pérdida de inserción de 1dB como máximo.

Transponder y/o tarjetas del equipamiento 10GigabitEthernet:

Deberán tener una sensibilidad menor o igual a -10dBm y la potencia máxima de recepción se puede obtener empleando atenuadores. La potencia de entrada a los multiplexores CMD44 deberá ser 0dBm, pudiendo emplear transponder con valores mayores de potencia pero atenuados para alcanzar este valor. Deberán trabajar con

OSNR mínimo de 18.5dB (obtenido en el ítem 3.7 donde se calculó el OSNR). Deben ser compatibles con el estándar G709 y tener capacidad de emplear FEC (permitiendo valores menores de OSNR). Deberán tener una anchura espectral menor o igual a 0.2nm (consideración para el ancho espectral del ítem 3.5.1, cuando se realizaron los cálculos de dispersión).

Llegado el momento en que se requiera migración del anillo 1GigabitEthernet a la red DWDM, se va a requerir 14 transponders para el anillo 1GigabitEthernet (2 por cada OADM). De este modo la red 1Gigabit se podrá integrar al backbone DWDM, liberando así un anillo físico de fibra óptica.

3.9 Resumen del diseño

La red propuesta es una red DWDM en anillo donde cada nodo será instalado como OADM. El equipamiento DWDM dentro de cada nodo OADM se encuentra especificado en el ítem 3.8.

La capacidad máxima del sistema es de 44 canales con capacidad de 10Gbps cada uno, con equipamiento Nortel (100Ghz de espaciamiento), empleo inicial de 2 canales: anillo SDH y anillo 10G. Una tercera longitud de onda se empleará próximamente para migrar el anillo 1G y llevarlo también sobre DWDM. La capacidad para crecimiento está asegurada, ya que se tienen 41λ de reserva con capacidad de llevar 10Gigabit cada una. Fibra óptica a emplear: G.652C, conectores LC.

La atenuación no es un factor limitante en el diseño, como se puede ver en la 0 se opera dentro de los rangos dinámicos de los receptores.

Se requiere compensación de dispersión, en longitudes de acuerdo a la Tabla 3.5 y empleando DCF con atenuación de 0.6dB/km y $D_c = -60\text{ps/nm.km}$

La compensación de dispersión será en la recepción, para permitir operar sin los efectos negativos del FWM. Se opera dentro de los rangos de dispersión PMD según recomendación ITU.

CAPITULO IV

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN PLANTEADA

4.1 Análisis económico

Una comparación exhaustiva del modelo de IP sobre DWDM con los enfoques IP sobre óptica e IP sobre SONET, realizada por el grupo de investigación de Cisco (fabricante de equipos de comunicación), demuestra las ventajas sustanciales de emplear IP sobre DWDM en muchos entornos de servicio. Estas ventajas son las siguientes:

- Ahorro de capital
- Ahorro en operación
- Mejora la confiabilidad de la red
- Aumento en la flexibilidad de la red
- Protección de tráfico más inteligente y proactivo
- Mayor escalabilidad de la red

Mediante la integración de IP y las capas ópticas conservando las capacidades OAM & P sin SONET/SDH, el modelo de IP sobre DWDM reduce sustancialmente los gastos de capital (CapEx) en las redes de core. Con esta arquitectura, el anillo 10GigabitEthernet ya no requiere una capa adicional de equipos SONET o transponders, tampoco las interfaces de líneas de enlace SONET/SDH a router.

El estudio del grupo de investigación de Cisco destaca las diferencias en costos de equipamiento y costos de las arquitecturas IP sobre óptica, IP sobre SONET, e IP sobre DWDM. En la Fig.4.1 se observan los costos de de los diversos componentes de estas arquitecturas como un porcentaje del costo de una interfaz WDM-PHY 10 Gbps en una arquitectura IP sobre DWDM. Estas cifras reflejan los precios actuales del mercado.

Uno podría suponer que la eliminación de una cantidad significativa de equipamiento SONET o transponders en una arquitectura IP sobre DWDM daría lugar a un menor consumo de energía y OAM & P. El estudio del grupo de investigación de Cisco cuantificó estos ahorros mediante la comparación de gastos OAM & P para varios componentes expresados en horas trabajador por semana, alquiler mensual o costos de mantenimiento del edificio por rack de equipos, y el consumo de energía para las tres

arquitecturas. En la figura Fig.4.2 se observa el OPEX (costo de operación) de las tres arquitecturas, para el mismo equipamiento mostrado en la Fig.4.1.

Item	Capex relativo
WDM-PHY ITU 10 Gigabit Ethernet router interface	1.00
Router chassis	*
SR OC-192 router interface	1.53
SR 10 Gigabit Ethernet router interface	0.77
10-Gbps transponder	0.28
DXC Chassis	1.91
DXC SR 10 Gigabit Ethernet interface	0.32
DXC ITU OC-192 interface	0.48
DWDM system	0.85

Fig.4.1 Comparación de CAPEX para diferentes arquitecturas

* El chasis se requiere en todas las arquitecturas, por lo que no se incluye

Item	OAM&P Horas por semana	Unidades por rack	Potencia [Watts]
WDM-PHY ITU 10 Gigabit Ethernet router interface	*	64	-
Router chassis	8	2	8500
SR OC-192 router interface	-	64	-
SR 10 Gigabit Ethernet router interface	-	64	-
10-Gbps transponder	0	36	70
DXC Chassis	4	2	1900
DXC SR 10 Gigabit Ethernet interface	-	64	-
DXC ITU OC-192 interface	-	64	-
DWDM system	1	6	520

Fig.4.2 Comparación de OPEX para diferentes arquitecturas

* No aplica

La arquitectura IP sobre DWDM emplea menos equipos electrónicos que las arquitecturas IP sobre óptica, que requiere un equipo de conversión OEO, y también menos que la arquitectura IP sobre SONET/SDH, que requiere equipamiento DXC para

cross conexiones (Digital Cross Connect). De acuerdo con los análisis de confiabilidad de la red, los transponders y algunos DXC tienen tasas significativas de falla. Al reducir la cantidad de equipos en un nodo de red, también se reducen las posibilidades de falla.

Muchas compañías han seguido utilizando SONET, a pesar de sus ineficiencias, debido a su excelente capacidad de OAM & P, y cuenta con protección falla. Sin embargo, las nuevas tecnologías de protección IP, tales como Fast Reroute (FRR) y la protección de la capa activa en la interfaz G.709 puede realizar las mismas funciones o similares, sin capas adicionales y sus costos asociados. Además, a pesar de SONET/SDH proporciona una excelente protección en la capa de transmisión, no puede proteger contra las fallas de la capa IP. Como resultado, los proveedores de servicio hoy en día también usan un esquema de protección basado en IP - a menudo conduce a la duplicación del ancho de banda de protección y los recursos de gestión.

La arquitectura IP sobre óptica también tiene problemas con la protección de la capa IP. En los modelos tradicionales de core de red, los routers IP no tienen manera de reconocer las señales ópticas degradadas y la protección basada en IP, sólo funcionará en el caso de fallo de una troncal. En arquitecturas de IP sobre DWDM que utilizan interfaces WDM-PHY con tramas G.709, la red puede directamente alertar a los routers, para ejecutar funciones de contingencia. Los routers IP pueden conmutar desde una conexión degradada antes de que ésta quede fuera de servicio.

4.1.1 Elección de equipamiento OADM

En un OADM se requiere agregar y desagregar canales. Como nodo DWDM, requiere de amplificadores y transponders. De acuerdo a las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Fig.2.41, se puede hacer de forma gradual (en cascada) o empleando WSS (capacidad para demultiplexar los 36 canales desde la instalación).

Vamos a considerar los costos relativos a un CMD4 (un CMD4 con costo relativo 1), el equipamiento considerado es Nortel.

La implementación en cascada requiere:

2 unidades GMD, el costo de cada uno es 2.43, con lo cual el costo parcial es 4.86.

2 unidades CMD4 para agregar/desagregar 4 canales, con lo cual el costo parcial es 2.

El costo total sin considerar los amplificadores y transponders es 6.86.

La implementación de los 36 canales empleando WSS requiere:

2 unidades WSS de 36 canales c/u, el costo de cada uno es 3.9, el costo parcial es 7.8.

2 unidades CMD44, el costo de cada uno es 1.86, el costo parcial es 3.72

El costo total sin considerar los amplificadores y transponders es 11.52,

Como se puede apreciar, implementar la multiplexación de los 36 canales cuesta 67% más que empleando multiplexación en cascada inicialmente para 4 canales.

Sin embargo, aprovisionar 4 canales adicionales empleando WSS no requiere inversión adicional, mientras que en cascada, se requiere de 2 CMD adicionales (costo adicional de 2). Los costos se acercan cuando el total de canales aprovisionados es 12 (8 adicionales al plan inicial).

Al implementar 12 canales adicionales (16 canales en total) se requiere, en cascada, un costo adicional de 6, con un total de 12.86. Mientras que con WSS el costo se mantiene en 11.52. A partir de 12 canales es más económico hacerlo con WSS que en cascada.

Considerando que se trata de un proveedor de servicios de telecomunicaciones, el crecimiento le demandará en el peor de los casos 2 canales en un año, es decir, en sólo 4 años habrá llegado al punto en que fueron convenientes los WSS. Por esta razón, se considera más adecuado invertir inicialmente adquiriendo WSS para soportar el crecimiento futuro.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La solución planteada evita el despliegue de nuevos hilos de fibra óptica con el costo que esto supone.
2. Pueden subsistir la red actual 1GigabitEthernet con la nueva red 10GigabitEthernet debido a que se cuenta con dos anillos de fibra óptica, es potestad del operador migrar el anillo actual a la red DWDM ó agregarla sobre la red 10GigabitEthernet.
3. El anillo SDH debe ser migrado a la red DWDM, que usará el anillo de fibra empleado por la red SDH.
4. Se usan equipamiento común a varios fabricantes (WSS, multiplexores, DCM) tomando como referencia los de Nortel, de manera que se puede analizar de manera similar equipamiento de otros fabricantes.
5. Se optó por emplear multiplexores de 44 canales en vez de cascadas, ya que al operar con 12 canales, la multiplexación en cascada se hace más costosa.
6. El diseño considera 20 ps/nm.km como coeficiente de dispersión, este valor hace necesario realizar compensación, la cual se hace en recepción con la finalidad de poder evitar los efectos negativos del FWM.
7. La alta sensibilidad en recepción de los amplificadores de línea permite transmitir con bajos niveles de potencia, evitando así los problemas no lineales que se presentan ante los cambios en el índice debido a la potencia.
8. Las interfaces del nuevo anillo 10GigabitEthernet deben ser compatibles con G.709, para conseguir las bondades de gestión de OTN.
9. Se tendrá disponibles 41 longitudes de onda para futuro crecimiento.
10. La arquitectura IP sobre DWDM elimina el entramado GFP de SONET/SDH ó AAL5 de ATM, además el tiempo de conmutación ante fallas brindado por SONET/SDH puede ser conseguido ahora con OTN según G.709.

ANEXO A
GLOSARIO DE TÉRMINOS

ALOHA: Sistema de redes de ordenadores desarrollado en la Universidad de Hawai.

ADM (Add/Drop Multiplexer): Configuración de nodo para agregar y desagregar longitudes de onda.

ATM (Asynchronous Transfer Mode): Modo de transferencia asíncrono. Es una tecnología para transmisión de datos.

ANSI: American National Standards Institute.

AWG (Array Waveguide Grating): Arreglo de guías de onda.

Bellcore: Empresa que propone el estándar SDH a ANSI

Cisco: Fabricante de equipos de comunicación de datos.

CMD4: Multiplexor de longitudes de onda, 4 canales

CMD8: Multiplexor de longitudes de onda, 8 canales

CMD44: Multiplexor de longitudes de onda, 44 canales

DGD (Differential group delay): Retardo diferencial de grupo.

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing): Multiplexación por división en longitudes de onda densa.

DXC (Digital Cross Connect): Se refiere a interconexiones digitales para interconectar contenedores virtuales, el término es empleado en tecnología SDH.

EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier): Amplificador de fibra dopada con erbio

FRR: Fast Reroute, reenrutamiento rápido, un esquema de protección de redes MPLS.

Full-Dúplex: Modo de operación al momento de transmitir datos, en el cual se puede transmitir y recibir datos en forma simultánea.

FWM (Four wave mixing): Mezclado de cuatro ondas.

GFP: Generic frame protocol, para encapsulación de Ethernet sobre SONET/SDH.

GMD (Group Mux/Demux): Equipo para realizar multiplexación en grupo

Hilos hidroexpansibles: Material resistente al agua conformando un sellado en seco.

Ion OH: También llamado hidroxilo, es un grupo funcional compuesto de 1 átomo de oxígeno y 1 de hidrógeno.

ITU: Unión Internacional de Telecomunicaciones

LAN: Red de área local (Local Area Network)

MetroEthernet: Es una red destinada a suministrar servicios de conectividad en un área metropolitana y está basado en el estándar Ethernet.

MPLS (Multiprotocol Label Switching): Es una tecnología que emplea etiquetas para tomar decisiones de envío de tráfico.

Multiplexación: Método empleado para transmisión de datos que consiste en compartir un mismo medio de transmisión para varias comunicaciones. En el caso de DWDM, se

asignan frecuencias distintas a cada comunicación, para evitar que las comunicaciones se mezclen o se interfieran entre sí.

Nortel: Fabricante de equipos de comunicaciones.

OADM (Optical Add/Drop Multiplexer) es un nodo donde se insertan y retiran longitudes de onda.

OAM&P (Operation, Administration, Maintenance and Provisioning): Operación, administración, mantenimiento y aprovisionamiento. Es un término referido a la gestión de redes de datos.

OEO: Término que se refiere a la conversión de una señal óptica en eléctrica y luego nuevamente en óptica, se emplea cuando se refiere a regeneración de una señal óptica.

OLA (Optical line amplifier): Amplificador de línea óptico, es una configuración de nodo donde se amplifica la señal óptica para ampliar su alcance.

OME: Denominación dada por Nortel para uno de sus sistemas DWDM.

OSNR: Optical signal to noise ratio: Relación óptica de señal a ruido.

OSI (Open System interconnection): Es el modelo de interconexión de sistemas abiertos, es un modelo de red descriptivo creado en el año 1984.

OTM (Optical terminal multiplexer): Terminal multiplexor óptico, es una configuración de nodo donde se agregan y retiran longitudes de onda

OSC (Optical Supervisory Channel): Canal de supervisión óptico. En sistemas wdm (y sus variantes) se refiere a una longitud de onda donde se transporta información del estado de los canales en términos de parámetros de calidad de señal.

P/PE MPLS: Los P (Provider router) y PE (Provider Edge router) son equipos que pertenecen a una red MPLS.

PDH: Jerarquía digital plesiosíncrona

PMD (Polarization mode dispersion): Dispersión por modo de polarización.

POP: Point of Presence. Punto de presencia, es el sitio de acceso de los abonados hacia la red de servicios.

Petrolato: Es una mezcla semisólida de hidrocarburos, prácticamente sin olor y sin color. Se obtiene a partir de la transformación de aceites minerales pesados.

Red de Core: Red principal o núcleo de la red principal de una empresa.

Reflexión: Fenómeno por el cual un rayo de luz que incide sobre una superficie es reflejado.

Refracción: Es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro.

RDSI: Red Digital de Servicios Integrados, es una red que facilita conexiones digitales extremo a extremo para proporcionar una amplia gama de servicios, tanto de voz como de otros tipos, y a la que los usuarios acceden a través de un conjunto de interfaces normalizadas.

RDSI-BA: RDSI de Banda Ancha, para velocidades superiores a 2Mbps.

Red de core: Red principal o “núcleo” de la red principal de un proveedor de datos.

ROADM: Se trata de un OADM reconfigurable.

SDH: Synchronous Digital Hierarchy, Jerarquía Digital Síncrona. Es una norma para el transporte de datos en telecomunicaciones, desarrollada en E.E.U.U. bajo el nombre de SONET y posteriormente la ITU-T publicó una serie de recomendaciones donde se normalizó como SDH.

Slot de tiempo: Es un término empleado en comunicaciones para indicar la duración de un período de tiempo en el cual se transmite información. Usualmente durante un slot de tiempo se transmite sólo una señal. Así, para una transmisión de varias señales se requiere que cada fuente de comunicación transmita en un slot de tiempo distinto de otra fuente.

SONET: Synchronous optical network, Jerarquía Digital Síncrona (Estándar ECSA)

Switch: Dispositivo que filtra y encamina paquetes de datos, operan en la capa de enlace del modelo OSI.

SPM (Self Phase Modulation): Automodulación de fase, fenómeno no lineal en las transmisiones ópticas.

SRS (Stimulated Raman Scattering): Dispersión estimulada de Raman, se refiere a la interacción que sufren las ondas ópticas con las vibraciones moleculares del material.

TDM: Time división multiplexing, multiplexación por división de tiempo. Es una técnica que permite la transmisión de señales digitales y cuya idea consiste en ocupar un canal de gran capacidad de transmisión a partir de distintas fuentes, logrando así un mejor aprovechamiento del medio de transmisión.

Transponder: Equipo que transforma las señales no WDM en señales WDM (ó en su forma densa, DWDM) antes de la multiplexación.

UIT: Unión internacional de telecomunicaciones, es una organización de las Naciones Unidas en lo concerniente a tecnologías de la información y la comunicación.

VAD: Vapor Phase Axial Deposition (Deposición axial en fase de Vapor). Método de fabricación de fibra óptica desarrollado por NTT

VC4: Virtual container level 4, contenedor virtual nivel 4

VOA: Atenuador óptico variable

VPN: Virtual Private Network, redes privadas virtuales.

WDM (Wavelength division multiplexing) multiplexación por división de longitud de onda

WSS (Wavelength selective switch): Selector de longitud de onda, equipo empleado en la multiplexación y demultiplexación de longitudes de onda en tecnologías wdm.

XC: Nivel de cross conexión, se refiere a la capacidad de manejar conexiones en un equipo de interconexión de troncales, usualmente SDH.

XPM (Cross Phase Modulation): Modulación de fase cruzada, fenómeno no lineal en las transmisiones ópticas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ramón Millán, "IP sobre WDM".
Comunicaciones World nº 174, IDG Communications, 2003.
- [2] B. Perny, "Swiss Telecom PMD Specification"
ETSI STC – TM1/WG1 Swiss Telecom Oslo, Norway, 1996
- [3] B Perny. N. Gisin, "Information on PMD Statistics"
ETSI STC – TM1/WG1 Swiss Telecom Oslo, Norway, 1996
- [4] N. Gisin, COST 241 Group, "Definition of Polarization Mode Dispersion and First Results of the COST 241 Round-Robin Measurements"
Pure Appl. Opt. 4, pp. 511-522 (1995)
- [5] N. Gisin, Y. Salama –, "Polarization Mode Dispersion for single mode fibers with polarization dependent losses"
University of Geneva and M. O. Hongler of Universitat Bielefeld , 1993
- [6] Ashwin Gumaste, Tony Antony, "DWDM network designs and engineering solutions "
Ciscopress, 2003
- [7] Daniel Pastor Abellán, "Sistemas de comunicaciones ópticas"
Ed. Univ. Politéc. Valencia, 2007
- [8] Biswanath Mukherjee, "Optical WDM networks"
Birkhäuser, 2006
- [9] www.cisco.com
- [10] Stamatios V. Kartalopoulos, "Introduction to DWDM technology: data in a rainbow"
IEEE Communications Society, 2000
- [11] Jean-Pierre Laude, "DWDM fundamentals, components, and applications"
Artech House, 2002