



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

CWDM TECNOLOGÍA Y APLICACIONES

Jorge Alejandro Meza Morales

Asesorado por el PhD. Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

Guatemala, junio de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

CWDM TECNOLOGÍA Y APLICACIONES

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JORGE ALEJANDRO MEZA MORALES

ASESORADO POR EL PH. ING. ENRIQUE EDMUNDO RUIZ CARBALLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARÍA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Durán Córdova
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. José Antonio de León Escobar
SECRETARÍA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CWDM TECNOLOGÍA Y APLICACIONES,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Electrónica, el 28 de octubre de 2008.

Jorge Alejandro Meza Morales

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por haberme permitido soñar, vivir y concluir con esta meta.
Mi familia	Por haberme apoyado en todo incondicionalmente para llegar hasta aquí.
Mi asesor	Por toda la ayuda y consejo brindado para realizar este trabajo de graduación.
Mis amigos	Por haber pasado juntos tantos momentos buenos a lo largo de nuestra formación como profesionales.
La Universidad de San Carlos	Por haberme brindado la oportunidad de ser parte de esta casa de estudios.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XI
GLOSARIO	XXI
LISTA DE SÍMBOLOS	XXXI
RESUMEN	XXXIII
OBJETIVOS.....	XXXVII
INTRODUCCIÓN.....	XXXIX
1. ESTÁNDAR CWDM	1
1.1. Recomendación ITU – G 694.2	3
1.1.1. Alcance ITU – G 694.2	3
1.1.2. Referencias ITU – G 694.2.....	4
1.1.2.1. Referencias normativas ITU – G 694.2	4
1.1.2.2. Referencias informativas ITU – G 694.2	4
1.1.3. Definiciones ITU – G 694.2	5
1.1.3.1. Términos definidos en esta recomendación ITU – G 694.2	5
1.1.3.1.1. Plan de longitudes de onda ITU – G 694.2	5
1.1.3.2. Términos definidos en otras recomendaciones ITU – G 694.2	6

1.1.4.	Abreviaturas y siglas ITU – G 694.2.....	6
1.1.5.	WDM aproximada y sus aplicaciones ITU – G 694.2.....	6
1.1.6.	Longitudes de onda centrales nominales para sistemas con WDM aproximada ITU – G 694.2	7
1.1.7.	Recomendación ITU – G 695.....	9
1.1.8.	Alcance ITU – G 695.....	9
1.1.9.	Transmisión unidireccional y bidireccional ITU – G 695....	10
1.1.9.1.	Transmisión unidireccional ITU – G 695	10
1.1.9.2.	Transmisión bidireccional ITU – G 695	14
1.1.10.	Topologías ITU – G 695.....	16
1.1.11.	Consumo de potencia ITU – G 695.....	19
1.1.12.	Distancia ITU – G 695.....	20
1.2.	Recomendación ITU –T G 671.....	23
1.2.1.	Alcance ITU –T G 671.....	24
1.2.2.	Referencias ITU –T G 671	26
1.2.3.	Términos y definiciones ITU –T G 671	29
1.2.3.1.	Definiciones de componentes ITU –T G 671	29
1.2.3.1.1.	Subsistema multiplexor óptico de incorporación / extracción (<i>oadm optical add/drop multiplexer</i> subsystem).....	29
1.2.3.1.2.	Componente de derivación asimétrico	30
1.2.3.1.3.	Atenuador óptico.....	31

1.2.3.1.4. Componente de derivación óptico (no selectivo en longitud de onda).....	31
1.2.3.1.5. Conector óptico	32
1.2.3.1.6. Ecuador dinámico de canal (DCE, <i>dynamic</i> channel equalizer)	32
1.2.3.1.7. Filtro óptico.....	33
1.2.3.1.8. Aislador óptico.....	33
1.2.3.1.9. Compensador de dispersión (cromática) pasivo	34
1.2.3.1.10. Empalme óptico.....	34
1.2.3.1.11. Conmutador óptico	34
1.2.3.1.12. Terminación óptica.....	35
1.2.3.1.13. Filtro sintonizable	35
1.2.3.1.14. Multiplexor/demultiplexor de longitud de onda óptico (MUX)/(DMUX)	35
1.2.3.1.14.1. Dispositivo WDM aproximado (CWDM).....	36
1.2.3.1.14.2. Dispositivo WDM denso (DWDM).....	36
1.2.3.1.14.3. Dispositivo WDM amplio (WWDM)	37
1.2.3.1.15. Compensador de dispersión (cromática) pasivo de un canal óptico	37
1.2.3.1.16. Compensador de dispersión (cromática) sintonizable	37
1.2.3.2. Definiciones de parámetros funcionales.....	38

1.2.3.2.1. Anchura de banda de paso a 1 dB y a 3 dB.....	38
1.2.3.2.2. Aislamiento de canal adyacente	39
1.2.3.2.3. Gama de atenuaciones (sólo para atenuadores variables)	40
1.2.3.2.4. Pérdida en el sentido inverso (aislamiento para un aislador de fibra óptica).....	41
1.2.3.2.5. Atenuación diafónica (de extremo cercano) bidireccional (para un dispositivo WDM).....	41
1.2.3.2.6. Aislamiento (de extremo cercano) bidireccional (para un dispositivo WDM).....	42
1.2.3.2.7. Extinción de canal.....	44
1.2.3.2.8. Gama de frecuencias de canal	45
1.2.3.2.9. Pérdida de inserción del canal (dispositivos WDM).....	45
1.2.3.2.10. Desviación de la pérdida de inserción de canal (dispositivos WDM)	47
1.2.3.2.11. No uniformidad de canal	48
1.2.3.2.12. Tiempo de respuesta de canal.....	49
1.2.3.2.13. Separación de canal	49
1.2.3.2.14. Gama de longitudes de onda de canal	49
1.2.3.2.15. Directividad	50
1.2.3.2.16. Incremento de atenuación (sólo para atenuadores variables)	50

1.2.3.2.17. Pérdida de inserción (dispositivos no WDM)	50
1.2.3.2.18. Tolerancia de pérdida de inserción (sólo para atenuadores ópticos).....	51
1.2.3.2.19. Aislamiento de un conmutador óptico	52
1.2.3.2.20. Aislamiento de canal no adyacente.....	52
1.2.3.2.21. Gama de longitudes de onda de funcionamiento.....	53
1.2.3.2.22. Atenuación fuera de banda	54
1.2.3.2.23. Pérdida dependiente de la polarización (PDL, polarization dependent loss).....	54
1.2.3.2.24. Reflectancia dependiente de la polarización	54
1.2.3.2.25. Dispersión en el modo de polarización (PMD, polarization mode dispersion).....	55
1.2.3.2.26. Reflectancia.....	57
1.2.3.2.27. Repetibilidad de un conmutador óptico	59
1.2.3.2.28. Reproductibilidad de la fijación de la banda de paso	59
1.2.3.2.29. Rizado	59
1.2.3.2.30. Tiempo de conmutación	60
1.2.3.2.31. Tiempo de sintonía (establecimiento).....	61
1.2.3.2.32. Atenuación diafónica (de extremo lejano) unidireccional (para un dispositivo WDM)	61

1.2.3.2.33. Aislamiento (de extremo lejano) unidireccional (para un dispositivo WDM).....	62
1.2.3.2.34. Uniformidad.....	64
1.2.3.2.35. Gama de ajuste de la compensación de dispersión (para el compensador de dispersión sintonizable).....	65
1.2.3.2.36. Rizado de retardo de grupo	65
1.2.3.2.36. Rizado de Retardo de Grupo	65
1.2.3.2.37. Gama de atenuación dinámica del canal(sólo para el ecualizador dinámico del canal).....	66
1.2.3.2.38. Resolución de atenuación del canal (sólo para el ecualizador dinámico del canal)	66
2. FIBRAS ÓPTICAS QUE SOPORTAN CWDM	67
2.1. Propiedades de la fibra y efectos sobre el rendimiento de sistemas CWDM	68
2.1.1. Atenuación por fibra.....	68
2.1.2. Pérdidas por dobleces inducidos	71
2.1.2.1. Pérdida por macrodoblez.....	72
2.1.2.2. Pérdidas por Microdoblez	76
2.1.3. Fibra monomodo estándar (SSMF) (ITU – G.652).....	79
2.1.3.1. Fibras con bajo pico de agua y cero pico de agua....	80

2.1.3.2.	Diseños de fibra de baja pérdida por doblez	82
2.1.4.	Fibra de dispersión desplazada no nula NZDSF	83
2.1.5.	Fibra NZDSF para transporte óptico de banda ancha (ITU-T G.656)	85
3.	TRANSCIEVERS PARA CWDM.....	87
3.1.	Fuentes para CWDM.....	92
3.1.1.	Tipos de láser y sus propiedades.....	94
3.1.1.1.	Láser Fabry Perot.....	95
3.1.1.2.	Láser emisor de superficie de cavidad vertical (VCSEL)	96
3.1.1.3.	Láser de realimentación distribuida.....	97
3.1.1.4.	Láser de rejilla de fibra (Fiber Grating Láser).....	99
3.1.1.5.	Láser externamente modulados.....	100
3.2.	Detectores para CWDM.....	102
3.2.1.	Diodos PIN	103
3.2.2.	Diodo de foto avalancha APD	105
3.3.	Transmisores y receptores	105
3.3.1.	Evolución del transceiver óptico	106
3.3.2.	Transmisores láser	109
3.3.3.	Transmisores sin enfriamiento para CWDM.....	111
3.3.3.1.	Deriva de longitud de onda	112

3.3.3.2.	Variación de potencia	116
3.3.4.	Receptores ópticos	117
3.3.5.	Enlace de transmisión CWDM	119
3.4.	Transcievers para CWDM.....	121
3.4.1.	Bloques de construcción.....	122
3.4.2.	Estándares para transcievers	127
3.4.2.1.	Factor de forma pequeña (Small Form Factor SFF).....	128
3.4.2.2.	Convertidor a interfaz gigabit (GBIC)	129
3.4.2.3.	Desconectable de forma pequeña (SFP).....	131
3.4.3.	Transcievers para 10Gb/s.....	132
4.	FILTROS Y AMPLIFICADORES PARA CWDM.....	135
4.1.	Filtros para CWDM.....	135
4.1.1.	Conceptos básicos de red.....	135
4.1.2.	Requerimientos para filtros CWDM.....	137
4.2.	Opciones técnicas para CWDM	138
4.2.1.	Rejillas, arreglos de guías de onda, y filtros de película delgada	139
4.2.1.1.	Rejillas de Fibra Bragg.....	139
4.2.1.2.	Arreglos de guía de onda.....	148
4.2.1.3.	Filtros de película delgada TFF.....	151

4.3.	Propiedades de los filtros de película delgada	153
4.3.1.	Estructuras multi-cavidad de película delgada	153
4.3.2.	Pasos de los procesos de fabricación	160
4.4.	Soluciones de empaquetamiento de filtros de película delgada.....	163
4.4.1.	Empaquetamiento de 3 puertos en cascada, multi-puertos, y empaquetamiento de vidrio.....	164
4.4.1.1.	Empaquetamiento de “3 puertos“	164
4.4.2.	Multi-puertos.....	166
4.4.2.1.	Empaquetamientos de vidrio	167
4.4.2.2.	Módulos CWDM	167
4.5.	Amplificadores para CWDM	169
4.5.1.	Principios de la amplificación óptica.....	170
4.5.1.1.	Tipos de amplificadores ópticos	170
4.5.1.1.1.	EDFA.....	171
4.5.1.1.2.	SOA.....	172
4.5.1.1.3.	Ramán.....	173
4.5.2.	Retos para amplificar CWDM.....	174
4.5.3.	Amplificadores CWDM con dopado basado en fibra	175
4.5.4.	Amplificadores CWDM basados en semiconductor.....	177
4.5.4.1.	Especificaciones de los dispositivos.....	177
4.5.4.2.	Transmisión por fibra utilizando SOA.....	180
4.5.5.	Amplificadores híbridos y Raman.....	183

5.	APLICACIONES CWDM Y COMPARACIÓN CWDM CON DWDM.....	185
5.1.	Red metro	185
5.1.1.	Definición de red metro	186
5.1.2.	Bloques de construcción CWDM.....	189
5.1.2.1.	Multiplexor y demultiplexor.....	190
5.1.2.2.	Multiplexor Add/Drop	193
5.1.2.3.	Cross conexión	195
5.1.2.4.	Transcievers a utilizar	195
5.1.3.	Anillos que utilizan CWDM.....	196
5.2.	Aplicaciones CWDM en la metro.....	198
5.2.1.	Recuperación de desastres	199
5.2.2.	Añadiendo CWDM a redes de una longitud de onda	200
5.2.3.	Escalabilidad con DWDM sobre CWDM	201
5.2.4.	Aplicaciones futuras.....	204
5.3.	Comparación económica entre CWDM y DWDM.....	206
5.3.1.	Hardware	206
5.3.2.	Requerimiento de energía.....	210
	CONCLUSIONES	213
	RECOMENDACIONES	215
	BIBLIOGRAFÍA	217

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Enfoque de caja negra.	11
2	Enfoque “enlace negro” lineal	11
3	Enfoque “enlace negro” en anillo	12
4	Enfoque “caja negra” para aplicaciones bidireccionales.	14
5	Enfoque “enlace negro” lineal para aplicaciones bidireccionales.	15
6	Enfoque “enlace negro” en anillo para aplicaciones bidireccionales	15
7	Enlaces de fibra bidireccionales.....	17
8	Enlace negro CWDM con add-drop lineal,OM/OD, multiplexor óptico/demultiplexor óptico.....	17
9	Anillo de enlace negro CWDM (con distribuidor).....	18
10	Anillo de enlace negro CWDM (sin distribuidor).....	19
11	Coeficientes de atenuación que se asume para fibras con bajo pico de agua.....	22
12	Coeficientes de. atenuación que se asumen para fibras con bajo a cero pico de agua.	22
13	G. 671 Subsistema de multiplexor óptico de incorporación/extracción (OADM)	30
14	G. 671 Representación de las anchuras de banda de paso a 1 dB y 3 dB.....	39
15	G. 671 – Ilustración del aislamiento de canal adyacente para un dispositivo WDM.....	40

16	G. 671 – Ejemplo de aislamiento (de extremo cercano) bidireccional.....	43
17	G. 671 Ejemplo de extinción de canal de un dispositivo WDM.....	44
18	G. 671 – Ilustración de las pérdidas de inserción máxima y mínima de un dispositivo WDM.....	47
19	G. 671 – Ilustración de la variación de las pérdidas de inserción de canal para un dispositivo WDM.....	48
20	G. 671 – Ilustración del aislamiento de canal no adyacente para un dispositivo WDM.....	53
21	G. 671 – Ilustración del rizado para un dispositivo WDM.....	60
22	G. 671 – Ilustración de aislamiento unidireccional (de extremo lejano) de un dispositivo WDM.....	63
23	G. 671 Ejemplo de dispositivo demultiplexor WDM por tanto, el aislamiento del puerto 2 a la longitud de onda 3 sería $a_{123} - a_{121}$	64
24	Comparación de atenuación espectral de una fibra ZWP (Cero pico de agua ITU-TG. 652D) con fibra monomodo de pico de agua estándar (SSMF, ITU-T G. 652). La ITU propuso que los canales CWDM fuesen traslapados, mientras que aquellos marcados en gris indican canales obtenidos gracias a la fibra ZWP.	70
25	Índice de refracción de (a) una fibra con salto de índice de doblez con radio de curvatura constante y (b) el equivalente a una fibra directa con índice de perfil completo. La línea punteada es el índice efectivo del modo fundamental.....	74
26	Pérdida por macrodoblez predicha para una SSMF lo largo de un espectro de canal CWDM.....	75

27	Modelo del núcleo de una fibra en la vecindad de una microdoblez. Potencia acarreada en el modo fundamental antes que la microdoblez se acople al modo fundamental y a modos de alta pérdida debido a microdoblez.	78
28	Pérdida por microdoblez predicha como una función de la longitud de onda de acuerdo con el modelo de Marcuse. Las cuatro curvas muestran el cambio en la dependencia de la longitud de onda y el cambio de la magnitud de la atenuación cuando la correlación, L_c , del espectro de potencia de la microdoblez aumenta desde 1 a 500 μ m.	79
29	Dispersión versus longitud de onda para fibras de transmisión comunes. SSMF -- ITU-T G. 652; DSF – ITU-T G. 653; LD NZDSF -- ITU-T G. 655; y MD NZDSF -- ITU-T G. 656.	85
30	Longitud de onda utilizada en un enlace de comunicaciones ópticas. (a) Transmisor de longitud de onda simple; (b) extensión a un transmisor sistema/color WDM.....	90
31	Comparación de desempeño y costo de láser FP y DBF.....	94
32	Responsividad de un diodo PIN fotodetector de InGsAs/InP.	104
33	(a) Primeros transmisores y receptores. (b) Principio de un enlace bidireccional básico utilizando dos fibras separadas y pares transmisor receptor.	107
34	Transmisor láser utilizando circuito de control de temperatura para estabilización de longitud de onda.	110
35	Transmisor sin control de temperatura comúnmente utilizado para CWDM.....	111

36	Deriva de longitud de onda de un láser CWDM con enfriamiento dentro del pasabanda CWDM de 1550nm, la longitud de onda actual es una función de la temperatura.	113
37	Definición de un centro de pasabanda CWDM para láser sin enfriamiento, mostrado para canal a 1550nm.	113
38	Distribución estática de longitudes de onda láser alrededor de 1550nm a temperatura de cuarto. Longitud de onda láser nominal a $T = 25^{\circ}C$; líneas grises: cantidad de la producción, $\pm 2nm$, también a $T = 25^{\circ}C$	114
39	Variaciones de temperatura y cantidad de producción con láser distribuidos alrededor del centro del pasabanda.	115
40	Bloques de construcción de un receptor típico utilizado en transceivers.	119
41	Un enlace de transmisión estándar de 16 canales CWDM utilizando 16 pares de transmisores (TX) y receptores (RX).	120
42	Juego de transceivers para uso en CWDM; cada dispositivo tiene un conector óptico para el transmisor y receptor.	122
43	Enlace bidireccional CWDM que consiste de dos enlaces unidireccionales separados y 2x16 transceivers llevando así a obtener 16 canales de transmisión en cada dirección.	125
44	Enlace CWDM bidireccional sobre una sola fibra con 2X8 transceivers y un total de 16 longitudes de onda.	126
45	enlace bidireccional con 16 transceivers de cada lado. Cada longitud de onda es utilizada dos veces en este arreglo y combinadas en el mismo puerto multiplexor.	126
46	Un transceiver 1x9.	128
47	Un transceiver SFF.	129

48	Un transceiver GBIC para longitud de onda CWDM de 1610nm	131
49	Transceiver SFP para longitud de onda de 1570nm CWDM.....	132
50	Conceptos básicos de multiplexión. Combinando cuatro canales diferentes A, B, C y D en (a) SDM, (b) TDM y (c) WDM.....	136
51	Principio del punteo de la rejilla de fibra Bragg reflejando diferentes longitudes de onda.	140
52	Dos métodos para crear rejillas de fibra Bragg.	140
53	Multiplexor óptico tipo Add/Drop utilizando una rejilla y dos circuladores.....	142
54	Rejilla de fibra Bragg con diseño de empaquetamiento atermalizado.....	142
55	Rejillas de fibra Bragg del centro de longitud de onda con temperatura y resultados de atermalización.....	143
56	Fuerza relativa de la modulación del índice de refracción en (a) una rejilla uniforme y (b) una rejilla apodizada.	144
57	Función de respuesta calculada de una (a) rejilla uniforme y (b) una rejilla apodizada.	145
58	Pérdida espectral medida para una FBG escrita en una fibra monomodo. Longitudes de onda más cortas experimentan pérdida adicional.	146
59	Pérdida espectral medida para una fibra Bragg apodizada en fibra no estándar con apertura numérica alta, señal transmitida y reflejada.	147
60	Elementos estructurales de un multiplexor de un arreglo de guía de onda.	149

61	Función de respuesta de un arreglo de guía de onda. El espectro muestra la típica distribución Gaussiana.	150
62	Estructura de revestimiento de capa de un filtro de película delgada de 3 cavidades.....	154
63	Un número de cavidades aumentado resulta en banda de detención pequeña o asilamiento de canal adyacente mejorado.....	155
64	Definiciones para haz de salida y entrada, IN, Transmisión y reflexión.	156
65	Filtro rechaza banda (de paso largo) separando la ventana de 1310nm de la ventana de 1550nm.....	158
66	Ejemplo de un filtro pasabanda CWDM. El filtro transmite la luz al canal correspondiente de 1551nm mientras todas las demás longitudes de onda aparecen en el puerto reflector.	158
67	Ejemplo para un tipo especial de filtro pasabanda llamado "4-skip-0".....	159
68	Diagrama de flujo para revestimientos de dieléctricos de película delgada.	159
69	Capacidad de monitoreo <i>in situ</i> de las cámaras modernas de revestimiento. Un haz de luz es dirigido a través del substrato que gira para monitorear el progreso del proceso de deposición.	161
70	Un empaquetamiento típico "3 puertos".....	164
71	Elementos ópticos clave de un empaquetamiento de 3 puertos.....	165
72	Dibujo conceptual de un dispositivo de 6 puertos; el mismo filtro es utilizado en dos "3 puertos" compartiendo el mismo empaquetamiento.	166

73	Configuración de amplificador híbrido EDFA – TDFA: las dos longitudes de onda más cortas son amplificadas por el TDFA mientras que las cuatro restantes son amplificadas por el EDFA.....	176
74	Ganancia luego de ecualización y características de NF de un amplificador híbrido EDFA – TDFA.	177
75	Espectro de emisión espontánea amplificada de un SOA, el cual típicamente tiene una forma de parábola suavizada.....	178
76	Medida de las ganancias TE y TM y PDG de un chip SOA utilizando una estructura de pozo de cuantos acoplada con ganancia de banda ancha.	179
77	Dependencia de ganancia, saturación de potencia de salida y NF sobre una señal de longitud de onda. Estos parámetros son referenciados a las facetas de chip.....	180
78	Transmisión de 8 canales WDM modulados a 10Gb/s a lo largo de 6 espacios de 40km de fibra estándar utilizando un total de nueve SOAs.....	181
79	Arquitectura de acceso con SOA en los nodos de usuario final. Los SOA proveen la amplificación necesaria en el anillo metro y doble a como moduladores para subida de datos.....	182
80	Perfil de ganancia plana (100nm centrada sobre la banda L y C) obtenida por una fibra de bombeo Raman utilizando una fuente multi longitud de de onda.	184
81	Red de fibra óptica con larga distancia, metro regional y acceso metro.	187
82	Topología en anillo CWDM utilizando cuatro nodos $N_1 \dots N_4$ interconectados por medio de enlaces.....	190

83	MUX CWDM del lado Tx del enlace mostrado con tres diferentes canales teniendo una longitud de onda centro $\lambda_1 \dots \lambda_3$	191
84	DEMUX CWDM del lado RX del enlace mostrado con tres diferentes canales teniendo longitud de onda centro $\lambda_1 \dots \lambda_3$	191
85	Conexión bidireccional punto a punto CWDM entre dos edificios.....	192
86	(a) Esquema de un OADM con un canal add/drop mas canales expresos, el OADM es compuesto funcionalmente por un par MX y DEMUX; (b) uso de un OADM dual en una configuración de anillo con protección.....	194
87	Multiplexor add/drop, transceiver primario y multiplexor utilizado para crear un anillo CWDM con cuatro nodos sin protección.	197
88	Multiplexor add/drop, transceiver y multiplexor utilizados para crear un anillo CWDM con cuatro nodos y protección.	198
89	Modo de extender redes de almacenamiento con CWDM: (a) Conexión con una sola fibra, (b) dos canales y (c) tres canales multiplexados.	199
90	Enlace SONET con una sola longitud de onda de 1310nm.	201
91	Modo de agregar longitudes de onda CWDM a un enlace de una sola longitud de onda. Se muestra una solución común para añadir IP o servicios de datos por canal de fibra a un enlace SONET sin una actualización de mejor my costosa.	202
92	Uso de DWDM (parte baja de la figura) multiplexado sobre CWDM para proveer una capacidad de actualización de mejor para la red de la figura anterior.	204
93	Productos representativos DWDM vs CWDM – Diferencias de potencia y ocupación de espacio.	211

TABLAS

I	G.694. 2 – Longitudes de onda centrales nominales.....	8
II	G.671 Valores y probabilidades de S.....	56
III	Propiedades de cubierta típica encajada y cubierta comprimida, fibra que cumple con la recomendación G. 652B.....	81
IV	Requerimientos de pérdida de fibra cableada de la recomendación ITU-T G652.....	81
V	Desempeño de pérdida por macrodoblez (en dB) de una SSMF (Diámetros de 60, 50y 15mm para 100 vueltas y 30 32mm para una vuelta).....	83
VI	Definición del rango de longitud de onda CWDM permisible bajo condiciones de operación.....	90
VII	Vistazo general a las fuentes de luz.....	93
VIII	Datos de los dispositivos láser DFB.....	98
IX	Comparación entre los dos tipos principales de detectores.....	103
X	Comparación entre los diferentes transcievers disponibles.....	133
XI	Comparación entre los diferentes tipos de filtros para CWDM.....	152
XII	Comparativa CWDM vs DWDM.....	209

GLOSARIO

10GbE	Tecnología con la capacidad de transmisión de datos a una velocidad de 10×10^9 bits por segundo.
<i>4-skip-0</i>	Elemento óptico de filtro el cual sus características de paso de banda son diseñadas de tal manera que cuatro canales CWDM son transmitidos por el elemento de filtro.
<i>Add-drop</i>	Calificativo para un multiplexor de inserción extracción.
ADSL	Línea digital de suscriptor de transferencia asimétrica.
AOI	Ángulo de Incidencia por sus siglas en inglés.
ASIC	Circuito Integrado para aplicaciones específicas.
ATM	Acrónimo para modo de transferencia asíncrona.

Backbone

Principales conexiones troncales a una red primaria.

Blades

Hardware de tipo bandeja con diferentes ranuras para la inserción de módulos para la expansión de funciones o capacidad.

Broadcasting

Difusión, es un modo de transmisión de información donde un nodo emisor envía información a una multitud de nodos receptores de manera simultánea, sin necesidad de reproducir la misma transmisión nodo por nodo.

CAPEX

Gastos de capital son gastos de la creación de beneficios futuros. Se incurre en ellos cuando una empresa gasta tanto dinero para comprar los activos fijos o para añadir al valor de un activo fijo existente con una vida útil que se extiende más allá de la base imponible.

<i>Carriers</i>	Empresa dedicada al transporte de datos y provisión de servicios de red.
CATV	Televisión por cable.
CEI	Comisión electrónica internacional.
Chirrido	Sonido agudo y continuo del láser que causa interrupciones en la generación de luz del mismo.
<i>Core</i>	Núcleo.
<i>Crosstalk</i>	En español diafonía, efecto que se da cuando parte de las señales presentes en transmisión, una señal es considerada perturbadora, aparece en la otra señal, considerada perturbadora.
<i>Cross-talk</i> Interferométrico	Crosstalk proveniente de varias señales.
<i>Crosstalk</i> lineal	Crosstalk proveniente de una sola señal.

Dispersión de Rayleigh	Dispersión de la luz o cualquier otra radiación electromagnética por partículas menores que la longitud de onda de los fotones dispersados.
Distribución Gaussiana	Distribución de probabilidad que aparece con más frecuencia estadística y teoría de probabilidades.
EDGE	Tasas de datos mejoradas para la evolución de GSM.
ESCON	Conexión de sistemas empresariales por sus siglas en inglés. Interfaz óptica serial desarrollada por IBM.
<i>Ethernet</i>	Tecnología con capacidad de velocidad de transmisión de 10×10^6 bits por segundo.
<i>FastEthernet</i>	Tecnología con capacidad de velocidad de transmisión de 100×10^6 bits por segundo.

Fiber Channel

Tecnología de red utilizada principalmente para redes de almacenamiento, disponible primero a la velocidad de 1×10^9 bits por segundo, y posteriormente a 2, 4 y 8×10^6 bits por segundo.

FICON

Interfaz óptica desarrollada por IBM siendo la evolución de la interfaz ESCON.

Fonones

Modo cuantizado de vibración que tiene lugar en redes cristalinas como la red atómica de un sólido.

FTTH-PON

Transmisión por fibra hasta el hogar por medio de redes ópticas pasivas.

Función de Bessel

Se utilizan cuando se buscan soluciones a la ecuación de Laplace o a la ecuación de Helmholtz por el método de separación de variables en coordenadas cilíndricas o esféricas.

Fused Biconic Taper

Tipo de conector de fibra óptica.

Ganancia Raman	Amplificación resultante de la estimulación de dispersión Raman. Puede ocurrir en los medios de comunicación transparente sólidos, tales como fibras ópticas, bajo la influencia de una bomba de luz intensa.
GbE	Gigabit Ethernet.
<i>GigabitEthernet</i>	Tecnología de red con capacidad de velocidad transmisión de 1×10^9 bits por segundo.
GPRS	Servicio general de paquetes vía radio es una extensión del sistema global para comunicaciones móviles GSM para la transmisión de datos por paquetes.
<i>Grid</i>	Reja o rejilla.
GRIN	Lente de índice gradiente.
H ₂	Hidrógeno gaseoso.

HFC	Híbrido de fibra y coaxial, que incorpora tanto fibra óptica como cable coaxial para crear una red.
<i>In Situ</i>	Término en latín que significa operación que ocurre sin interrumpir el funcionamiento normal de un sistema.
InGsAs	Arsénico de Galio e Indio.
InP	Fosfato de Indio.
LAN	Red de área local.
<i>Legacy</i>	Sistema computacional o programa que continua siendo utilizado aunque nuevas tecnologías estén a disponibilidad.
LMDS	Sistema de distribución local multipunto, tecnología de conexión vía radio inalámbrica que permite, gracias a su ancho de banda, el despliegue de servicios fijos de voz, acceso a internet, comunicaciones de datos en redes privadas, y video bajo demanda.

<i>Loop</i>	Bucle.
Macrodobleces	Dobleces relativamente amplios con respecto del radio de doblez de una fibra óptica.
Microdobleces	Curvaturas microscópicas agudas pero que generan pérdida en fibras ópticas.
Monomodo	Calificativo para fibras ópticas que propagan la luz en un solo camino dentro de ellas.
MOVPE	Epítaxis de vapor de fase metal orgánico.
MBE	Epítaxis de haz molecular.
Multimodo	Calificativo para fibras ópticas que propagan la luz en varios caminos dentro de ellas.
NA	Apertura numérica, se refiere al rango de ángulos para los cuales la fibra acepta luz.
NF	Figura de ruido.

OC-192	Tecnología de redes ópticas simples con capacidad de transmisión de 9953.28×10^6 bits por segundo.
OC-3	Tecnología de redes ópticas simples con capacidad de transmisión de bit 149.76×10^6 por segundo.
OH	Ion hidróxilo.
PDL	Pérdida dependiente de polarización.
PLC	Comunicaciones mediante cable eléctrico.
<i>Plug and play</i>	Capacidad de sistemas informáticos de configurar dispositivos automáticamente al ser conectarlos.
RDSI	Red digital de servicios integrados.
RMS	Abreviatura para la raíz cuadrada media.
SAN	Abreviatura para una red de almacenamiento.

SiOH	Gel de Sílice.
SOA	Amplificador óptico semiconductor.
<i>Socket</i>	Conector hembra de múltiples agujeros para la inserción de pines.
STM-64	Tecnología con velocidad de transmisión de 9.953×10^9 bits por segundo.
Telcordia GR-1221	Recomendación internacional de parámetros ópticos para equipos de transmisión de este tipo.

LISTA DE SÍMBOLOS

°	Grados sexagesimales
A/W	Amperios por watt
dB	Decibeles
dBm	Decibeles referenciados a 1 miliwatt
Gb/s	Giga bits por segundo
GHz	Giga hertz
Km	Kilómetros
m/s	Metros por segundo
Mb/s	Mega bits por segundo
mm ³	Milímetros cúbicos
nm	Nanómetros
nm/°C	Nanómetros por grado Celsius
ps/(nm- km),	Pascales por nanómetro kilometro
V	Volts
µm	Micrometros

RESUMEN

La transmisión por CWDM está ganando popularidad en aplicaciones tales como acceso metropolitano 10GbE, CATV, FTTH-PON, y otros sistemas de corto alcance punto a punto con servicios transparentes utilizando protocolos tales como ESCON, FICON, Fiber Channel y Gigabit y Fast Ethernet.

La técnica de multiplexión CWDM consta de 18 longitudes de onda definidas en el intervalo 1270 a 1610nm con un espaciado de 20nm.

La multiplexión por división aproximada de longitud de onda (CWDM), una tecnología WDM, se caracteriza por un espaciado más amplio de canales que el de la multiplexión por división densa de longitud de onda (DWDM). Los sistemas CWDM son más rentables para las aplicaciones de redes metropolitanas.

El plan de longitudes de onda descrito en la nueva Recomendación ITU-T G. 694. 2 tiene un espaciado de canales de 20nm para dar cabida a láser de gran anchura espectral y/o derivas técnicas considerables. Este espaciado amplio de canales se basa en consideraciones económicas relacionadas con el costo de los láser y filtros, que varían según dicho espaciado. Para dar cabida a numerosos canales en cada fibra, el plan de longitudes de onda acordado abarca la mayoría de las bandas de menos de 1300nm a más de 1600nm del espectro de fibras ópticas monomodo, recientemente aprobadas.

Los sistemas CWDM admiten distancias de transmisión de hasta 50 km. Entre esas distancias, la tecnología CWDM puede admitir diversas topologías: anillos con distribuidor, punto a punto y redes ópticas pasivas. Además, se adapta correctamente a las aplicaciones de redes metropolitanas (por ejemplo, anillos locales CWDM que conectan oficinas centrales con los principales anillos expresos metropolitanos (DWDM) y a las aplicaciones relativas al acceso, como los anillos de acceso y las redes ópticas pasivas.

Los sistemas CWDM pueden utilizarse como una plataforma integrada para numerosos clientes, servicios y protocolos destinados a clientes comerciales. Los canales en CWDM pueden tener diferentes velocidades binarias. Esta técnica se adapta más fácilmente a las variaciones de la demanda de tráfico, ya que con ella se pueden añadir canales en los sistemas y liberarlos de éstos.

CWDM puede ser una alternativa de bajo costo a los sistemas DWDM para transporte óptico en cortas distancias (menos de 50 km) desde las instalaciones de las empresas al backbone metropolitano de los proveedores de servicio.

WDM es una tecnología que multiplexa datos de diferentes fuentes y diferentes tasas de bits y diferentes protocolos (tales como Fiber Channel, Ethernet y ATM) en una única fibra óptica.

Cada canal de datos, o señal, es transportada en su propia longitud de onda. Una longitud de onda es comúnmente referida como una λ . Utilizando tecnología WDM, pueden multiplexarse desde cuatro a más de 80

longitudes de onda separadas en un único haz de luz transmitido en una única fibra óptica.

En el lado receptor, cada canal es entonces demultiplexado nuevamente a su estado original. Este procedimiento es el mismo estén éstos basados en tecnología CWDM o DWDM.

OBJETIVOS

General:

- Plantear una mejora por medio del estudio de la tecnología CWDM para su utilización en las comunicaciones involucradas con los servicios y aplicaciones de las empresas.

Específicos:

- 1 Desarrollar el conocimiento de la tecnología CWDM de banda ancha para hacer más eficiente los servicios y aplicaciones de una empresa.
- 2 Reducir costos de implementación de los nuevos sistemas que proveen banda ancha y que permiten la integración de protocolos ya implementados.
- 3 Promover la competitividad de la empresa por medio de CWDM dándole la característica de una entidad de vanguardia en la tecnología.
- 4 Propiciar el desarrollo económico de la empresa, mediante la mejora de los servicios que esta provee.
- 5 Aumentar la eficiencia de los procesos de operación actuales.

INTRODUCCIÓN

La demanda de capacidad en el transporte de datos en el entorno metropolitano ha evolucionado día a día, debido a la introducción de servicios y aplicaciones que implican gran consumo de ancho de banda. Esta necesidad de ancho de banda ha suscitado el desarrollo de tecnologías que satisfagan dicha necesidad que además de proveer transparencia inherente a la tecnología, se adapte muy bien al entorno, caracterizado por la integración de diversos clientes, servicios y protocolos.

Sin embargo, muchos sistemas no cumplieron en su momento las previsiones, debido principalmente a que implicaban costos demasiado altos relacionados a la complejidad de la fabricación de dichos sistemas. No obstante, la madurez de algunas tecnologías como la familia WDM ha permitido conseguir sistemas específicamente adaptados al entorno metropolitano, ofreciendo altos anchos de banda a un coste relativamente bajo.

La familia WDM tiene su origen en la posibilidad de acoplar diferentes fuentes de luz, cada una a una longitud de onda o frecuencia diferente sobre una misma fibra óptica. Ya sea monomodo o multimodo ofreciendo de esta manera la disponibilidad de amplios anchos de banda para transmisión de datos. Dentro de la familia WDM se presentan otras tecnologías que toman como base WDM pero con la diferencia que se redujeron costos de fabricación de dispositivos de red, tal es el caso de CWDM.

CWDM se presenta como una alternativa económicamente competitiva dentro de la familia WDM, debido a que toma los beneficios del menor coste de

los componentes ópticos y se adapta perfectamente a las necesidades de las redes empresariales y metropolitanas de corta distancia.

Esta tecnología se presenta como una alternativa simple en cuanto se refiere a diseño de red, implementación y operación. Permite el desembolso de capital que sigue la trayectoria de la generación

1. ESTÁNDAR CWDM

Durante los últimos años del siglo pasado, se gastaron desenfrenadamente billones de euros en el despliegue y ampliación de redes de telecomunicación que nunca verán un retorno del capital invertido. Sin embargo, las operadoras ya no pueden construir redes sobredimensionadas en cuanto a capacidad de transporte, pues la crisis económica actual exige que la capacidad de la red crezca en función del flujo de beneficios obtenidos a partir de ella. Es decir, la red debe ser rentable desde el primer momento y el retorno de las inversiones debe tener lugar en un corto espacio de tiempo. Esto es tanto más cierto para el equipamiento utilizado en el entorno metropolitano, pues las redes de larga distancia pueden ser rápidamente amortizadas por el largo número de clientes soportados, mientras que las metropolitanas, requieren sistemas de menor coste y menor capacidad para satisfacer los requerimientos del mercado.

El entorno metropolitano actual necesita, por consiguiente, sistemas de transporte físicamente pequeño, de bajo consumo, sencillos de utilizar y de bajo coste, que proporcionen suficiente capacidad para la demanda actual y estén preparados para la futura. El vertiginoso ritmo de desarrollo tecnológico se ha visto frenado en gran medida y esto ha supuesto un mayor sentido común en las inversiones financieras. Es preferible utilizar sistemas de bajo coste que retornarán la inversión realizada pronto y que deberán ser sustituidos en 10 años, que sistemas que proporcionarán la capacidad demanda durante los próximos 10 años o más, pero que tomarán la mayor parte de este tiempo para retornar su inversión.

Por otro lado, la demanda de capacidad de transporte en el entorno metropolitano es cada vez mayor, debido a la introducción de servicios y aplicaciones con gran consumo de ancho de banda (Internet de banda ancha, vídeo bajo demanda, redes de almacenamiento, etc.), a partir de tecnologías en la red de acceso como: ADSL, HFC, LMDS, PLC, GbE, GPRS, etc. Esta necesidad de ancho de banda en la red metropolitana suscitó hace unos años un gran interés en los sistemas DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), pues además la transparencia inherente a esta tecnología se adapta muy bien a este entorno, caracterizado por la necesidad de integrar una gran diversidad de clientes, servicios y protocolos. Sin embargo, estos sistemas no cumplieron en ningún momento las previsiones, debido principalmente a que tenían un coste muy alto y no permitían un rápido retorno de las inversiones realizadas en su adquisición y despliegue.

Este panorama propició la búsqueda de tecnologías adaptadas al entorno metropolitano que consiguiesen ofrecer altos anchos de banda a un coste relativamente bajo. El resultado fue la aparición, hace alrededor de un año, de los primeros sistemas comerciales basados en la tecnología CWDM (*Coarse WDM*).

Los sistemas CWDM son considerados habitualmente como una alternativa de bajo coste a los ampliamente utilizados sistemas DWDM. La tecnología CWDM se beneficia del menor coste de los componentes ópticos asociados a una tecnología menos compleja, que aunque limitada en cuanto a capacidad y distancia, se adapta perfectamente a las necesidades de las redes empresariales y metropolitanas de corta distancia.

1.1. Recomendación ITU – G 694. 2

Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexión por división de longitud de onda: Plan de multiplexión por división aproximada de longitud de onda.

En esta recomendación se presenta el plan de longitudes de onda para las aplicaciones de multiplexión por división aproximada de longitud de onda (CWDM). Este plan de longitudes de onda soporta un espaciado de canales de 20nm. En esta versión de la recomendación se ha modificado el plan de longitud de onda en 1nm para adaptarlo a las prácticas habituales en el ámbito industrial, manteniendo al mismo tiempo las desviaciones simétricas de longitud de onda central nominal.

1.1.1. Alcance ITU – G 694. 2

Esta recomendación tiene por objeto definir un plan de longitudes de onda para soportar aplicaciones de multiplexión por división aproximada de longitud de onda (CWDM, *coarse wavelength division multiplexing*). Este plan hace posible la transmisión simultánea de varias longitudes de onda con una separación suficiente para permitir la utilización de fuentes sin dispositivos de refrigeración.

1.1.2. Referencias ITU – G 694. 2

1.1.2.1. Referencias normativas ITU – G 694. 2

Las siguientes recomendaciones del ITU-T y otras referencias contienen disposiciones que, mediante su referencia en este texto, constituyen disposiciones de la presente recomendación. Al efectuar esta publicación, estaban en vigor las ediciones indicadas. Todas las Recomendaciones y otras referencias son objeto de revisiones, por lo que se preconiza que los usuarios de esta recomendación investiguen la posibilidad de aplicar las ediciones más recientes de las recomendaciones y otras referencias citadas a continuación. Se publica periódicamente una lista de las Recomendaciones ITU-T actualmente vigentes. En esta recomendación, la referencia a un documento, en tanto que autónomo, no le otorga el rango de una recomendación.

[1] Recomendación ITU-T G. 671 (2002), características de transmisión de los componentes y subsistemas ópticos.

1.1.2.2. Referencias informativas ITU – G 694. 2

Las siguientes recomendaciones del ITU-T contienen otras informaciones pertinentes.

[2] Recomendación ITU-T G. 983. 3 (2001), Sistema de acceso óptico de banda ancha con capacidad de servicio incrementada mediante atribución de longitud de onda.

[3] Recomendación ITU-T J. 185 (2002), Equipo de transmisión para la transferencia de señales de televisión multicanal en redes de acceso óptico mediante conversión de modulación de frecuencia.

[4] Recomendación ITU-T J. 186 (2002), Equipo de transmisión para señales de televisión multicanal en redes de acceso óptico mediante multiplexión de subportadora.

1.1.3. Definiciones ITU – G 694. 2

1.1.3.1. Términos definidos en esta recomendación ITU – G 694. 2

En esta recomendación se define el término siguiente.

1.1.3.1.1. Plan de longitudes de onda ITU – G 694. 2

Conjunto de referencia de longitudes de onda ópticas en el vacío que sirve para indicar las longitudes de onda centrales nominales permitidas que pueden utilizarse en la definición de las aplicaciones.

1.1.3.2. Términos definidos en otras recomendaciones ITU – G 694. 2

En esta recomendación se utilizan los siguientes términos definidos en la Rec. ITU-T G. 671:

- Multiplexión por división aproximada de longitud de onda (CWDM, coarse wavelength division multiplexing).
- Multiplexión por división de longitud de onda densa (DWDM, dense wavelength division multiplexing).

1.1.4. Abreviaturas y siglas ITU – G 694. 2

En esta recomendación se utilizan las siguientes siglas.

CWDM Multiplexión por división aproximada de longitud de onda (coarse wavelength division multiplexing)

DWDM Multiplexión por división de longitud de onda densa (dense wavelength división multiplexing)

WDM Multiplexión por división de longitud de onda (wavelength division multiplexing)

1.1.5. WDM aproximada y sus aplicaciones ITU – G 694. 2

La multiplexión por división aproximada de longitud de onda (CWDM), una tecnología del tipo WDM, se caracteriza por un espacio más ancho entre

canales que en la tecnología WDM densa (DWDM, dense wavelength division multiplexing), tal como se define en la Rec. ITU-T G. 671. Los sistemas CWDM permiten aplicaciones rentables, gracias a una combinación de láser sin dispositivos de refrigeración, tolerancias de selección de longitudes de onda láser menos exigentes, y filtros pasabanda amplios.

Los sistemas CWDM se pueden utilizar en las redes de transporte metropolitanas y como plataforma integrada para una diversidad de clientes, servicios y protocolos.

En el apéndice I, se presenta una explicación de las razones por las que se escoge el espaciamiento de longitud de onda central y los factores que determinan la variación de dicha longitud de onda.

1.1.6. Longitudes de onda centrales nominales para sistemas con WDM aproximada ITU – G 694. 2

Se utilizan las longitudes de onda centrales nominales para sistemas con WDM aproximada como referencia para definir, en cada uno de los canales, el límite de longitud de onda superior y el límite de longitud de onda inferior, que son los que definen los límites de longitud de onda del transmisor bajo cualquier condición y, al mismo tiempo, los límites de longitud de onda que han de cumplir las especificaciones de multiplexores y demultiplexores ópticos.

El límite de longitud de onda superior es la longitud de onda central del canal más la desviación de longitud de onda central indicada en la Recomendación que define la aplicación.

El límite de longitud de onda inferior es la longitud de onda central del canal menos la desviación de longitud de onda central indicada en la Recomendación que define la aplicación.

En el cuadro siguiente se indica el plan de longitudes de onda CWDM en la gama que abarca de 1271nm a 1611nm. Se debe utilizar un valor "c" (velocidad de la luz en el vacío) para la conversión entre longitud de onda y frecuencia igual a $2,99792458 \times 10^8$ m/s.

Tabla I G. 694. 2 – Longitudes de onda centrales nominales.

Longitudes de ondas centrales nominales (nm) para un espaciamiento de 20 nm
1271
1291
1311
1331
1351
1371
1391
1411
1431
1451
1471
1491
1511
1531
1551
1571
1591
1611
NOTA – Los puntos extremos de este cuadro se presentan a título informativo solamente.

1.1.7. Recomendación ITU – G 695

Interfaces ópticas para aplicaciones de multiplexión por división aproximada en longitud de onda

Esta recomendación proporciona valores de parámetros ópticos para interfaces de capa física de aplicaciones de multiplexión por división aproximada en longitud de onda (CWDM) con hasta 16 canales y hasta 2.5Gbit/s. Las aplicaciones se definen empleando dos métodos diferentes, en uno de los cuales se utilizan parámetros de interfaz multicanal y en el otro, parámetros de interfaz monocanal. Se especifican aplicaciones, tanto unidireccionales como bidireccionales.

1.1.8. Alcance ITU – G 695

La presente Recomendación se aplica a interfaces ópticas de sistemas de línea óptica con multiplexión por división aproximada en longitud de onda CWDM, coarse wavelength division multiplexing) para aplicaciones de red en las que se utilizan fibras ópticas monomodo. Esta recomendación define y proporciona valores de parámetros de interfaz óptica de aplicaciones físicas de sistemas punto a punto y en anillo CWDM. Su objetivo principal es facilitar la existencia de interfaces compatibles transversalmente (de múltiples fabricantes).

Las aplicaciones se definen empleando dos métodos diferentes, en uno de los cuales se utilizan parámetros de interfaz multicanal y en el otro, parámetros de interfaz monocanal. Se especifican aplicaciones tanto unidireccionales como bidireccionales.

En la presente recomendación se describen sistemas de línea óptica que tienen las características siguientes:

- Número máximo de canales: hasta 16.
- Velocidad binaria del canal de la señal: hasta 2,5Gbit/s NRZ (sin retorno a cero).

El plan de longitudes de onda CWDM se da en [ITU-T G. 694. 2].

Las especificaciones están organizadas de acuerdo con los códigos de las aplicaciones.

En el futuro, se podrán incluir aplicaciones que permitan la compatibilidad transversal plena en puntos de interfaz, tanto multicanal como monocanal.

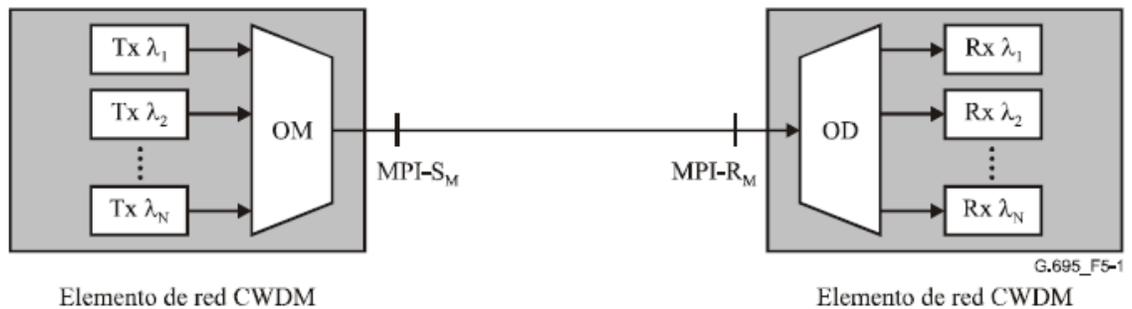
1.1.9. Transmisión unidireccional y bidireccional ITU – G 695

1.1.9.1. Transmisión unidireccional ITU – G 695

La figura siguiente muestra un conjunto de puntos de referencia de conexión multicanal (MPI-SM y MPI-RM) solamente, para la utilización del

enfoque "caja negra" lineal. El elemento de red CWDM incluye aquí un OM y transmisores, o un OD y receptores.

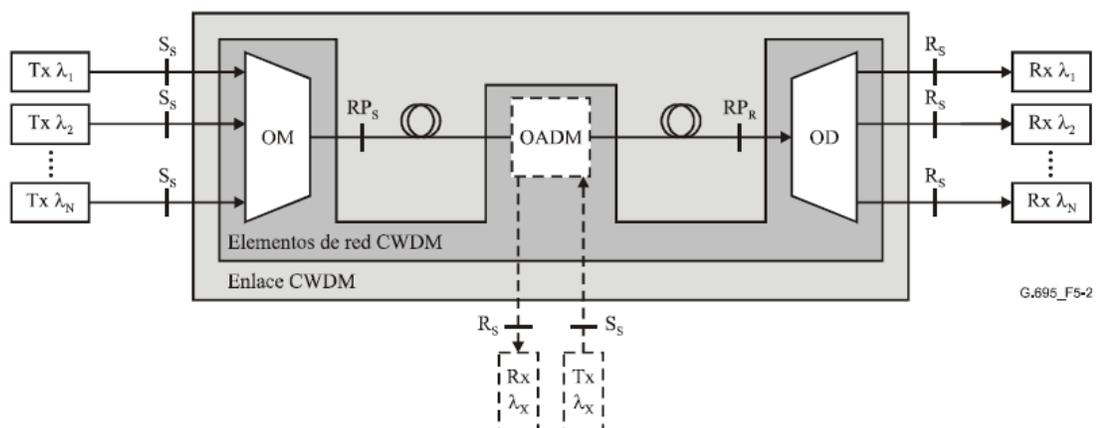
Figura 1 Enfoque de caja negra.



La figura siguiente muestra un conjunto de puntos de referencia, del enfoque "enlace negro" lineal, para conexión monocanal (SS y RS) entre transmisores (Tx, transmitters) y receptores (Rx, receivers).

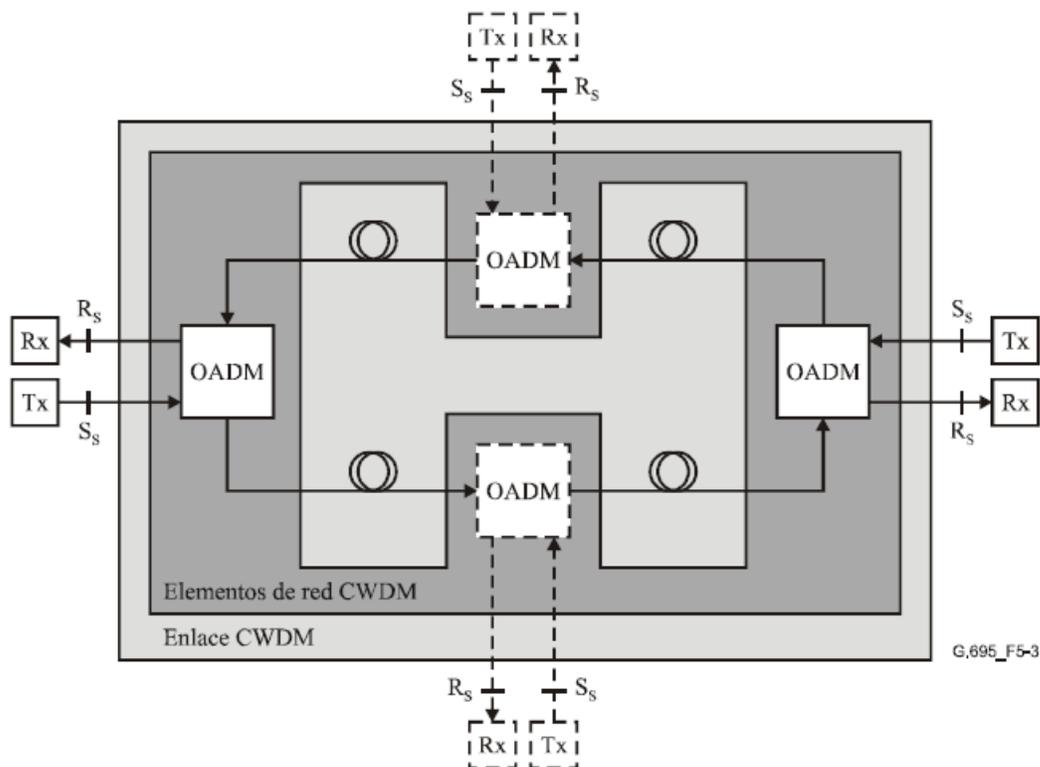
Los elementos de red CWDM incluyen aquí un OM y un OD, que se utilizan como un par con el elemento oponente, y pueden también incluir uno o más OADM.

Figura 2 Enfoque "enlace negro" lineal



En la figura siguiente se muestra un conjunto correspondiente de puntos de referencia para el enfoque “enlace negro” en anillo, para una conexión monocanal (SS y RS) entre transmisores (Tx) y receptores (Rx). En este caso los elementos de red CWDM incluyen dos o más OADM conectados en anillo.

Figura 3 Enfoque “enlace negro” en anillo



Estos modelos de referencia no incluyen ningún amplificador óptico en el sistema CWDM. Sin embargo, en el futuro, se podrán introducir aplicaciones que incluyan amplificadores ópticos.

Los puntos de referencia de las figuras 1, 2 y 3 se definen como sigue:

SS es un punto de referencia monocanal en la entrada afluyente del elemento de red CWDM;

- RS es un punto de referencia monocanal en la salida afluyente del elemento de red CWDM;
- MPI-SM es un punto de referencia multicanal en la salida compuesta del elemento de red CWDM;
- MPI-RM es un punto de referencia multicanal en la entrada compuesta del elemento de red CWDM;
- RPS es un punto de referencia de enlace en la salida compuesta del elemento de red CWDM;
- RPR es un punto de referencia de enlace en la entrada compuesta del elemento de red CWDM.

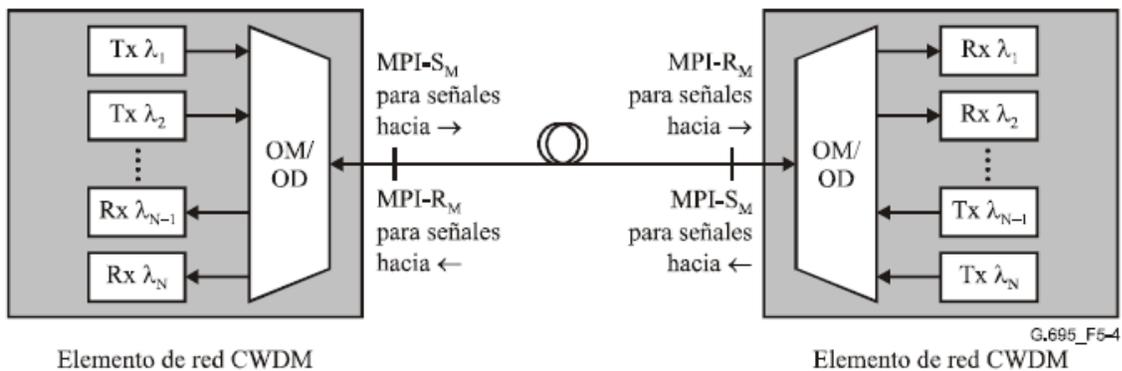
Los puntos de referencia monocanal SS y RS corresponden aquí a sistemas del enfoque "enlace negro" (lineal o en anillo), donde cada trayecto desde SS a su correspondiente RS debe cumplir los valores de parámetro de los códigos de aplicación. Los puntos de referencia multicanal MPI-SM y MPI-RM corresponden a sistemas del enfoque "caja negra". Los puntos de referencia de enlace RPS y RPR corresponden solamente a sistemas del enfoque "enlace negro".

Se señala que MPI-SM y MPI-RM se definen para proporcionar especificaciones normativas de las interfaces ópticas. Por otro lado, RPS y RPR se definen solamente con objeto de proporcionar información del enlace por fibra y no para proporcionar las características de la señal en esos puntos.

1.1.9.2. Transmisión bidireccional ITU – G 695

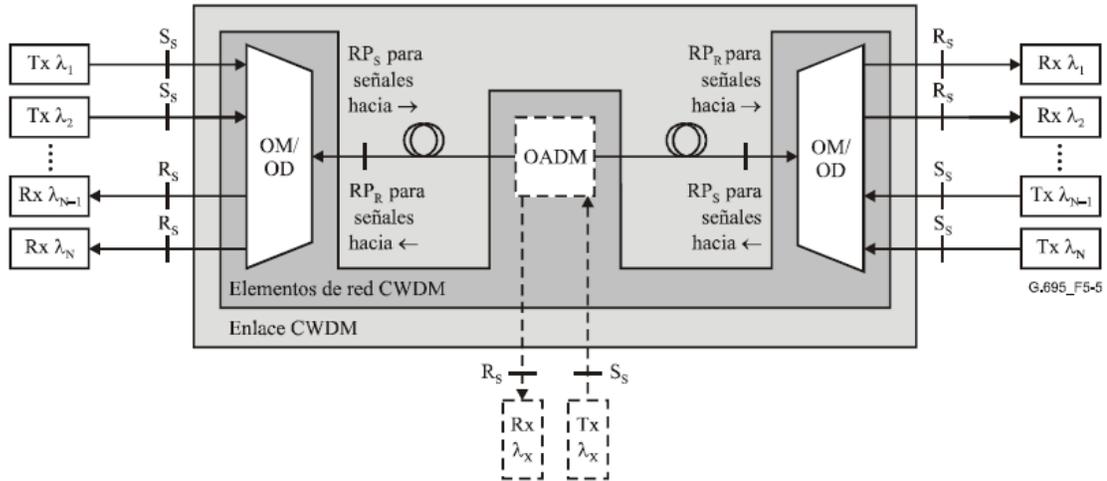
La figura siguiente muestra un conjunto de puntos de referencia de conexión multicanal (MPI-SM y MPI-RM) solamente, para la utilización del enfoque "caja negra" en aplicaciones bidireccionales monofibra. El elemento de red CWDM incluye aquí un OM/OD, transmisores y receptores.

Figura 4 Enfoque "caja negra" para aplicaciones bidireccionales.



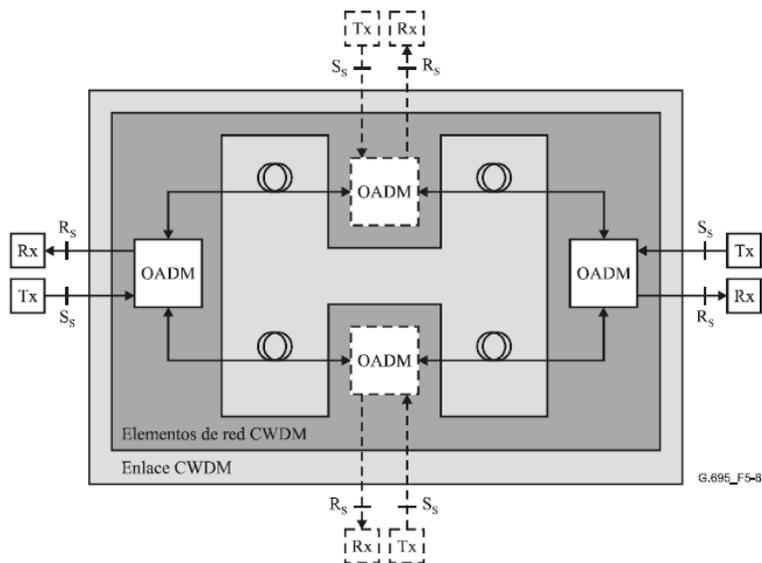
La figura siguiente muestra un conjunto de puntos de referencia, del enfoque "enlace negro" lineal bidireccional monofibra, para conexión monocanal (SS y RS) entre transmisores (Tx) y receptores (Rx). Los elementos de red CWDM incluyen aquí un OM/OD, que se utiliza como un par con el elemento oponente, y pueden también incluir uno o más OADM.

Figura 5 Enfoque “enlace negro” lineal para aplicaciones bidireccionales.



En la figura siguiente se muestra un conjunto correspondiente de puntos de referencia, del enfoque “enlace negro” en anillo bidireccional monofibra, para conexión monocanal (SS y RS) entre transmisores (Tx) y receptores (Rx). Los elementos de red CWDM incluyen aquí dos o más OADM conectados en un anillo.

Figura 6 Enfoque “enlace negro” en anillo para aplicaciones bidireccionales



1.1.10. Topologías ITU – G 695

La versión 2004 de G695 solamente direcciona links punto a punto CWDM como se muestra en la figura, es decir topologías ópticas con OADM o redes ópticas. La segunda versión de G695, debido a su publicación en el 2005, extendió el concepto del enlace negro a para proveer cadenas lineares CWDM con OADMS y anillos CWDM con OADMs. La extensión del estándar será cumplida especificación de cross-talk interferometrico para las señales del canal CWDM demultiplexado. El crosstalk interferometrico es una medida de que tanto de la potencia de la restante de la señal un canal CWDM imperfectamente añadido interfiere con una señal dejada en el mismo canal CWDM. Actualmente se cree que un valor de 45dB es suficiente para tomar en cuenta el crosstalk interferometrico debido a que la penalidad de potencia óptica es menor a los 0. 25 dB es despreciable en ingeniería de enlace negro. Todos los demás parámetros del enlace negro, como recibir y transmitir niveles de potencia, tolerancia de dispersión y demás, permanecerán de la misma manera como en la primera versión de G. 695, para asegurar compatibilidad con los equipos que se desarrollaron con la primera versión de G. 695. Consideraciones de ingeniería para cadenas lineales de CWDM y anillos que también serán discutidos en futuras versiones del estándar de modo que los ingenieros estén al tanto de las posibles dificultades involucradas en diseño de redes con estas nuevas topologías.

Figura 7 Enlaces de fibra bidireccionales.

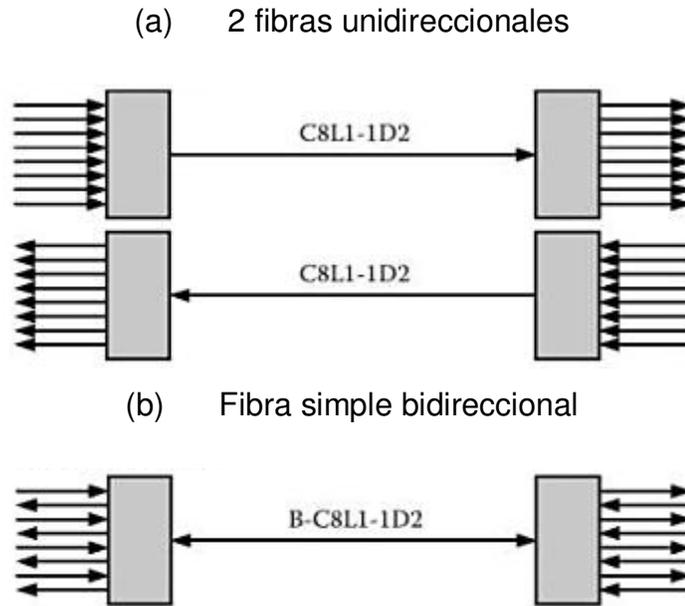


Figura 8 Enlace negro CWDM con add-drop lineal, OM/OD, multiplexor óptico/demultiplexor óptico.

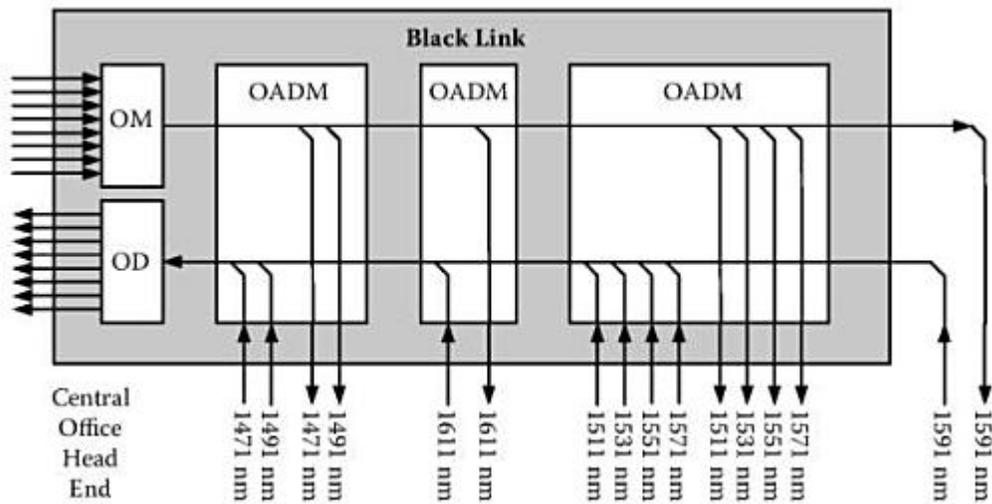


Figura 9 Anillo de enlace negro CWDM (con distribuidor).

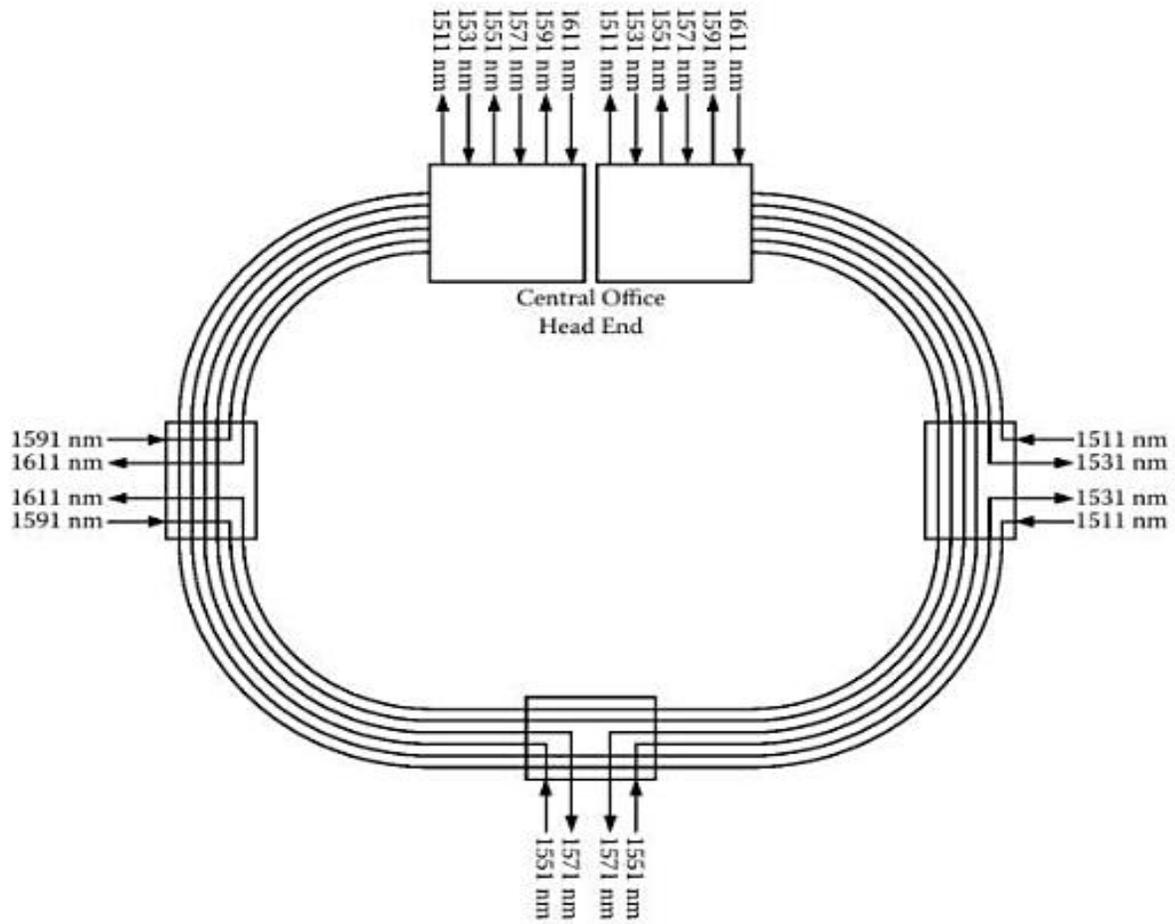
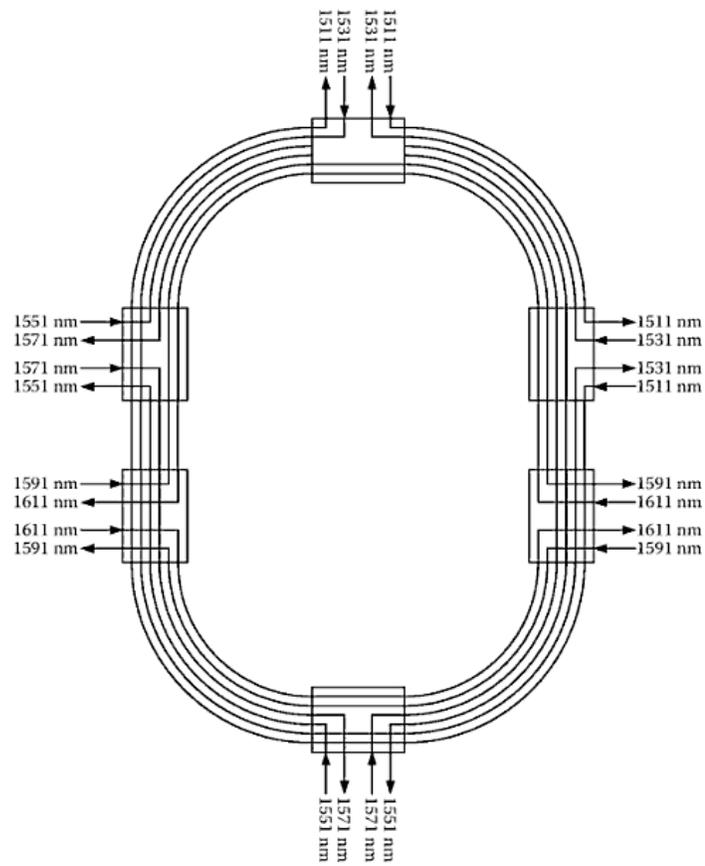


Figura 10 Anillo de enlace negro CWDM (sin distribuidor).



1.1.11. Consumo de potencia ITU – G 695

Consumos de potencia son generalmente considerados los puntos de partida de cualquier link óptico o diseño de red. Los consumos de potencia utilizados durante el desarrollo de cada código de aplicación fueron basados en planes de láser CWDM disponibles de 1. 25 y 2. 5Gb/s, receptores, transceptores SFF y SFP, multiplexores y demultiplexores CWDM.

Las siguientes características fueron aceptadas como representativas de componentes planeados y por lo tanto, son una base apropiada para la estandarización.

- Potencia de salida de Láser: 0 a +5dBm, para permitir el uso de láser no refrigerado directamente modulado.
- Inserción de pérdida por multiplexor CWDM de 8 canales: 1 a 3. 5dB para permitir una variedad de diseños de multiplexores y mejoras futuras en potenciales en el diseño de filtros y fabricación de tecnologías.
- Inserción de pérdida por multiplexor CWDM de 8 canales: 1 a 4. 0 dB, nuevamente para permitir variedad de diseños de multiplexores y avances en filtros.
- 2. 5 Gb/s P-intrínseco-N (PIN) potencia de entrada receptora. -18 a 0 dBm, para proveer del rango típico de sensibilidad y valores de sobrecarga apreciables en receptores PIN de bajo costo.
- Receptores de entrada de potencia a base de Fotodiodos avalancha de 2. 5 Gb/s (APD): -28 a -9dBm.
- Receptores de entrada de potencia APD de 1. 5 Gb/s

1.1.12. Distancia ITU – G 695

La distancia de transmisión que se logra por cada código de transmisión depende de la atenuación máxima de la conexión especificada por el código de aplicación y la atenuación esperada de la fibra a cada longitud de onda.

En el caso de aplicaciones de enlace negro, la inserción de pérdida del multiplexor y demultiplexor óptico a cada longitud de onda también determina el rango a alcanzar. Las aplicaciones de caja negra incluyen el multiplexor y demultiplexor óptico dentro de la caja y así la atenuación entre la salida de la caja negra (no el láser) y la salida de otra caja negra (No el receptor óptico) es menor que el de las aplicaciones de enlace negro en las cuales se mide la atenuación entre el láser y el receptor óptico. De cualquier manera, si cualquier láser, multiplexor, fibra, demultiplexor y receptores fueron usados en cualquier implementación de caja negra o en un despliegue de enlace negro aunque la atenuación permitida del enlace por la caja negra pueda ser por ejemplo, 7.5dB, más que para una caja negra.

En algunos despliegues, por ejemplo, aqueos con la menor pérdida promedio por fibra, el alcance puede ser dispersión limitada en vez de atenuación limitada y puede ser significativamente excedida la distancia de objetivo establecida en G695. La inserción de pérdida por multiplexores y demultiplexores ópticos que son usados en aplicaciones de enlace negro y por lo tanto no es posible para G. 695 establecer un objetivo de distancia para enlace negro. En vez, G. 695 provee de un apéndice que muestra el alcance que se puede esperar por la inserción de varios valores de pérdida a causa de pares multiplexor/demultiplexor.

Para ayudar a esto, ingenieros de sistemas y diseñadores de red, G. 695 tiene un apéndice que muestra los valores de coeficientes máximos y mínimos que se pueden asumir a longitudes de onda que fueron utilizadas mientras que se especificaban valores de parámetros para cada código de aplicación en G. 695. Valores de coeficientes de atenuación separados fueron usados para fibras “secas” y “mojadas” como se muestra en las figuras 11 y 12.

Figura 11 Coeficientes de atenuación que se asume para fibras con bajo pico de agua

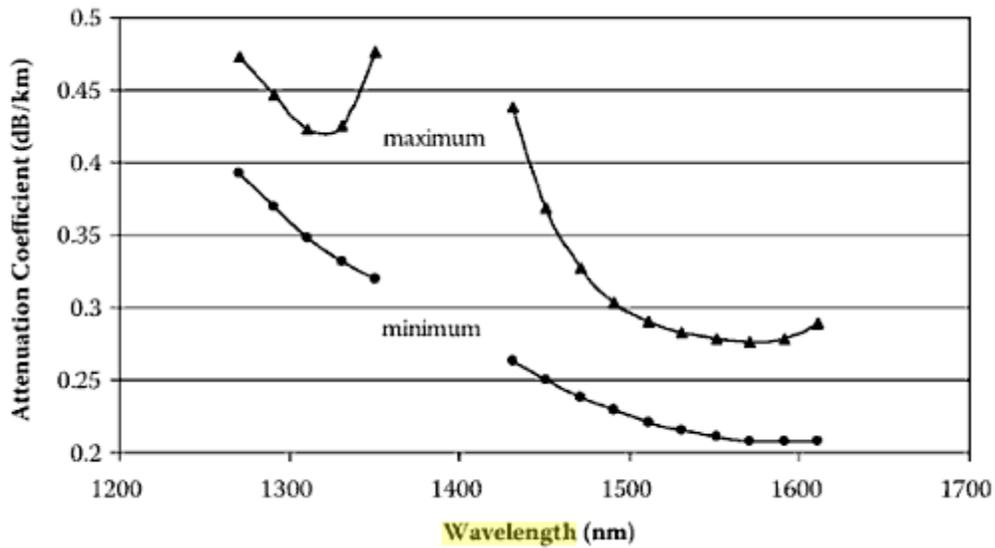
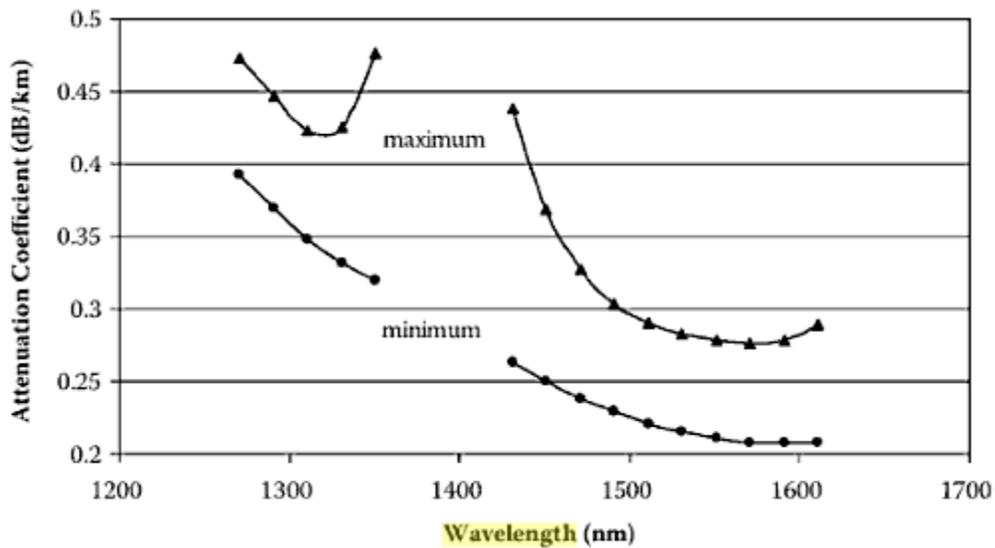


Figura 12 Coeficientes de atenuación que se asumen para fibras con bajo a cero pico de agua.



Nótese que la fibra incluso contiene pequeñas trazas de iones OH^- (por ejemplo agua) y presenta una gran atenuación cerca de los 1385nm. Este tipo de fibra es comúnmente conocida como fibra mojada. La mayoría de fibras ópticas antiguas, típicamente, fibras instaladas antes del 2000, tendrán este “pico de agua” en sus perfiles de atenuación, y por lo tanto no soportarán espacios de transmisión mayores a las longitudes de onda de G 694. 2. Fibra óptica que es fabricada específicamente para tener un bajo o completamente ausente pico de agua, es usualmente llamada fibra “seca”. La mayoría de fabricantes produce ahora fibra seca con muy bajo o cero pico de agua.

1.2. Recomendación ITU –T G 671

Esta recomendación trata de los aspectos relativos a la transmisión de todos los tipos de componentes ópticos utilizados en redes de largo alcance y en redes de acceso. Incluye una amplia gama de componentes de fibra óptica así como las características de los componentes ópticos en toda la gama de condiciones de funcionamiento pero no especifica las condiciones de servicio operativas, los aspectos relativos a la instalación, ni otros aspectos de los componentes que no afectan al trayecto de transmisión óptico. También hace referencia a las definiciones y métodos de prueba pertinentes de la CEI cuando son aplicables.

1.2.1. Alcance ITU –T G 671

Esta recomendación tiene por objeto identificar los parámetros relativos a la transmisión para cada uno los componentes indicados más adelante y definir los valores de los parámetros que pueden especificarse para las aplicaciones más importantes del sistema. Cuando es necesario, se utilizan las definiciones de la CEI. Se prevé que los sistemas aplicables se traten en las siguientes Recomendaciones ITU-T:

- Redes de largo alcance: Redes que utilizan equipos con interfaces conformes a la Rec. ITU-T G. 957 y Recomendaciones sobre interfaces ópticas para sistemas monocanal y multicanal con amplificadores ópticos, incluidas las Recs. ITU-T G. 691, G. 692 y G. 959. 1.
- Redes de acceso: Redes que utilizan equipos conformes a la Rec. ITU-T G. 982 y la recomendación sobre redes de acceso para el soporte de servicios a velocidades superiores a la velocidad binaria primaria de la RDSI (cuando se publiquen).

La presente recomendación trata de los componentes ópticos utilizados en las redes ópticas descritas en las citadas recomendaciones. Cuando ha sido posible, se han definido valores de parámetros comunes a todas las aplicaciones, pero a veces ha sido necesario establecer valores específicos para cada uno de los grupos de aplicaciones.

Esta recomendación describe las características de transmisión en las diversas condiciones de funcionamiento de los siguientes componentes ópticos:

- Subsistema multiplexor óptico de incorporación/extracción (OADM, *optical add drop multiplexer*);
- Componente de derivación asimétrico;
- Atenuador óptico;
- Componente de derivación óptico (no selectivo en longitud de onda);
- Conector óptico;
- Ecualizador dinámico de canal (DCE, *dynamic channel equalizer*);
- Filtro óptico;
- Aislador óptico;
- Compensador de dispersión pasivo;
- Empalme óptico;
- Conmutador óptico;
- Terminación óptica;
- Filtro sintonizable;
- Multiplexor (MUX)/demultiplexor (DMUX) de longitud de onda óptica
 - Dispositivo de WDM aproximada
 - Dispositivo de WDM densa
 - Dispositivo de WDM amplia.

Esta Recomendación no abarca:

- Los aspectos de instalación, condiciones de servicio y características ambientales y mecánicas que no afectan al trayecto de transmisión óptico de los diversos componentes ópticos.
- Los detalles específicos de los métodos de prueba. Según un acuerdo con el TC 86 de la CEI, las directrices que deben seguirse para la

medición de la mayoría de los parámetros definidos en la cláusula figuran en las series 61300-3 de la CEI sobre métodos de prueba de transmisión y geométricos. Los cuadros en la cláusula indican los métodos de prueba recomendados, reúnen los parámetros de prueba en grupos homogéneos e indican para cada grupo el número o números de las especificaciones básicas pertinentes de la CEI.

1.2.2. Referencias ITU –T G 671

Las siguientes recomendaciones del ITU-T y otras referencias contienen disposiciones que, mediante su referencia en este texto, constituyen disposiciones de la presente recomendación. Al efectuar esta publicación, estaban en vigor las ediciones indicadas. Todas las recomendaciones y otras referencias son objeto de revisiones por lo que se preconiza que los usuarios de esta recomendación investiguen la posibilidad de aplicar las ediciones más recientes de las recomendaciones y otras referencias citadas a continuación. Se publica periódicamente una lista de las recomendaciones ITU-T actualmente vigentes. En esta Recomendación, la referencia a un documento, en tanto que autónomo, no le otorga el rango de una recomendación.

[1] Recomendación ITU-T G. 650. 1 (2004), *definiciones y métodos de prueba de los atributos lineales y determinísticos de fibras y cables monomodo.*

[2] Recomendación ITU-T G. 650. 2 (2005), *definiciones y métodos de prueba de los atributos conexos de las características estadísticas y no lineales de fibras y cables monomodo.*

[3] Recomendación ITU-T G. 652 (2003), *características de las fibras y cables ópticos monomodo.*

- [4] Recomendación ITU-T G. 653 (2003), *características de los cables y fibras ópticos monomodo con dispersión desplazada.*
- [5] Recomendación ITU-T G. 654 (2004), *características de los cables de fibra óptica monomodo con corte desplazado.*
- [6] Recomendación ITU-T G. 655 (2003), *características de fibras y cables ópticos monomodo con dispersión desplazada no nula.*
- [7] Recomendación ITU-T G. 661 (1998), *definición y métodos de prueba de los parámetros genéricos pertinentes de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos.*
- [8] Recomendación ITU-T G. 662 (1998), *características genéricas de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos.*
- [9] Recomendación ITU-T G. 691 (2003), *interfaces ópticas para los sistemas monocanal STM-64 y otros sistemas de la jerarquía digital síncrona con amplificadores ópticos.*
- [10] Recomendación ITU-T G. 692 (1998), *interfaces ópticas para sistemas multicanales con amplificadores ópticos.*
- [11] Recomendación ITU-T G. 693 (2005), *interfaces ópticas para sistemas de conexión local.*
- [12] Recomendación ITU-T G. 694. 1 (2002), *planes espectrales para las aplicaciones de multiplexión por división de longitud de onda: Plan de frecuencias con multiplexión por división de longitud de onda densa.*
- [13] Recomendación ITU-T G. 694. 2 (2003), *planes espectrales para las aplicaciones de multiplexión por división de longitud de onda: Plan de multiplexión por división aproximada de longitud de onda.*
- [14] Recomendación ITU-T G. 957 (1999), *interfaces ópticas para equipos y sistemas relacionados con la jerarquía digital síncrona.*
- [15] Recomendación ITU-T G. 959. 1 (2003), *interfaces de capa física de red óptica de transporte.*

[16] Recomendación ITU-T G. 982 (1996), *redes de acceso óptico para el soporte de servicios que funcionan con velocidades binarias de hasta la velocidad primaria de la red digital de servicios integrados (RDSI) o velocidades binarias equivalentes.*

[17] CEI 61300-3 *series of transmission and geometrical parameters.*

[18] CEI 61300-3-2 (1999-06), *fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-2: Examinations and measurements – Polarization dependence of attenuation in a single-mode fibre optic device.*

[19] CEI 61300-3-4 (2001-01), *fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-4: Examinations and measurements – Attenuation.*

[20] CEI 61300-3-6 (2005-01), *fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-6: Examinations and measurements – Return loss.*

[21] CEI 61300-3-7 (2004-02), *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-7: Examinations and measurements – Wavelength dependence of attenuation and return loss.*

[22] CEI 61300-3-12 (1997-02), *fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-12: Examinations and measurements – Polarization dependence of attenuation of a single-mode fibre optic component: Matrix calculation method.*

[23] CEI 61300-3-19 (1997-03), *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-19: Examinations and measurements – Polarization dependence of return loss of a single-mode fibre optic component.*

1.2.3. Términos y definiciones ITU –T G 671

La mayor parte de las definiciones de parámetros funcionales especificados en esta recomendación para cada uno de los componentes antes mencionados figuran en la correspondiente especificación genérica de la CEI y se recapitulan en esta cláusula:

CEI 60869-1 (1999), *generic specification for fibre optic attenuators.*

CEI 60875-1 (2000), *generic specification for fibre optic branching devices.*

CEI 60876-1 (2001), *generic specification for fibre optic switches.*

CEI 61202-1 (2000), *generic specification for fibre optic isolators.*

CEI 61931-1 (1998), *fibre optic terminology.*

Cuando se utilizan definiciones de la CEI, así se indican. En esta cláusula también aparecen definiciones de parámetros adicionales que están en estudio o no han sido definidos en las publicaciones de la CEI.

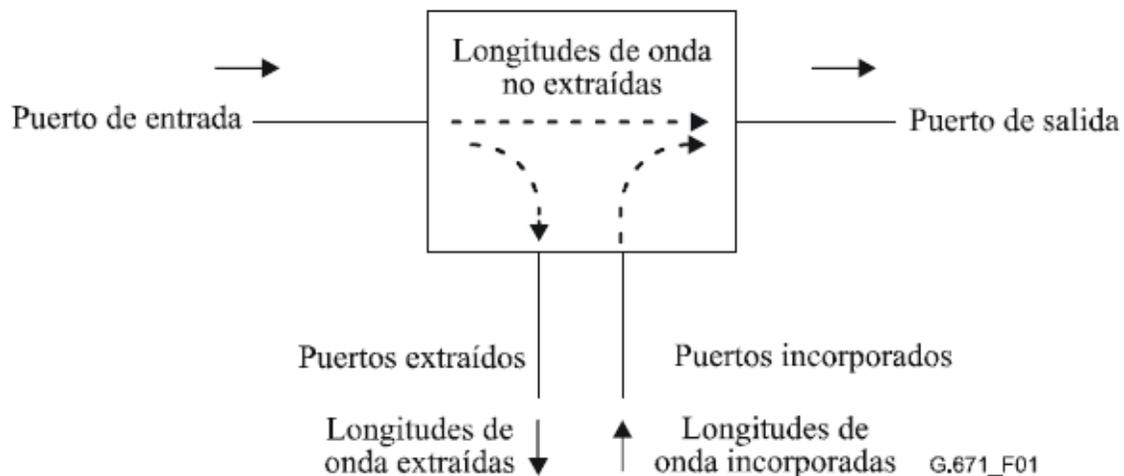
1.2.3.1. Definiciones de componentes ITU –T G 671

1.2.3.1.1. Subsistema multiplexor óptico de incorporación / extracción (oadm *optical add/drop multiplexer subsystem*)

Dispositivo de derivación selectivo en longitud de onda (empleado en los sistemas WDM) que dispone de una función de "extracción" que transfiere una o varias señales ópticas desde un puerto de entrada hasta un puerto de salida o

varios puertos de extracción, en función de la longitud de onda de la señal; dispone asimismo de una función de "incorporación" que transfiere las señales ópticas presentes en los puertos de incorporación hacia el puerto de salida, como muestra la figura 13.

Figura 13 G. 671 Subsistema de multiplexor óptico de incorporación/extracción (OADM)



1.2.3.1.2. Componente de derivación asimétrico

Componente pasivo (no selectivo en longitud de onda) con tres o más puertos que comparte la potencia óptica entre sus puertos de una forma predeterminada, sin ninguna amplificación, conmutación u otra modulación activa. (1. 1/CEI 60875-1). También se utiliza acoplador de derivación como sinónimo para un dispositivo de derivación asimétrico.

La mayor parte de la potencia óptica se transfiere normalmente al puerto principal del acoplador de derivación mientras que una pequeña fracción (1% a 20%) se transfiere al puerto de derivación. La relación entre la potencia óptica en el puerto principal y la del puerto de derivación en porcentaje se denomina factor de acoplamiento F .

Los dispositivos de derivación ópticos se pueden dividir en las categorías de simétricos y asimétricos. Un componente de derivación asimétrico es un dispositivo cuya matriz de transferencia presenta asimetría diagonal, es decir, en el que para todo i y o , t_{io} y to_i son nominalmente distintos (1. 3. 19 / CEI 60875 - 1).

1.2.3.1.3. Atenuador óptico

Componente pasivo que produce una atenuación de señal controlada en una línea de transmisión de fibra óptica (1. 3. 1/CEI 60869-1).

1.2.3.1.4. Componente de derivación óptico (no selectivo en longitud de onda)

Componente pasivo (no selectivo en longitud de onda) con tres o más puertos que comparte la potencia óptica entre sus puertos de una forma predeterminada, sin ninguna amplificación, conmutación u otra modulación activa (1. 1/CEI 60875-1). El término acoplador (separador- combinador) se utiliza como sinónimo para un dispositivo de derivación.

El término también se utiliza para definir una estructura de transferencia de potencia óptica entre dos fibras o entre un dispositivo activo y una fibra (1. 3. 2/CEI 60875-1).

Los dispositivos de derivación ópticos se pueden dividir en las categorías de simétricos y asimétricos. Un componente de derivación simétrico es un dispositivo cuya matriz de transferencia presenta simetría diagonal, es decir, en el que para todo i y o , tio y toi son nominalmente iguales (1. 3. 18/CEI 60875-1).

1.2.3.1.5. Conector óptico

Componente que normalmente se asocia a un cable o equipo ópticos para proporcionar conexiones/desconexiones ópticas frecuentes entre fibras o cables ópticos (6. 01/CEI 61931-1).

1.2.3.1.6. Ecuador dinámico de canal (DCE, *dynamic channel equalizer*)

Dispositivo que es capaz de transformar, mediante control automático interno o externo, una señal de entrada multicanal con potencias promediadas que varían con el tiempo en una señal de salida en la que las potencias del canal en funcionamiento son nominalmente iguales o se han fijado a un nivel requerido de preénfasis.

NOTA – Este dispositivo también puede proporcionar la supresión de uno o más de los canales de entrada.

1.2.3.1.7. Filtro óptico

Componente pasivo utilizado para modificar la radiación óptica que lo atraviesa, para lo cual, generalmente, modifica la distribución espectral (6. 35/CEI 61931-1). Alternativa: en particular, los filtros ópticos se utilizan generalmente para rechazar o absorber radiación óptica en unas gamas concretas de longitudes de onda mientras se transmite radiación óptica en otras gamas.

NOTA – Un filtro óptico sintonizable puede compensar la variación de la longitud de onda de la señal en su gama de longitudes de onda de funcionamiento. Un filtro óptico no sintonizable presenta un valor fijo en toda la gama de longitudes de onda de funcionamiento.

1.2.3.1.8. Aislador óptico

Dispositivo óptico no recíproco destinado a suprimir las reflexiones en el sentido de retorno a lo largo de una línea de transmisión de fibra óptica, mientras que la pérdida de inserción es mínima en el sentido de ida (1. 3. 1/CEI 61202-1).

1.2.3.1.9. Compensador de dispersión (cromática) pasivo

Componente pasivo utilizado para compensar la dispersión cromática de un trayecto óptico.

1.2.3.1.10. Empalme óptico

Unión permanente o semipermanente de dos fibras ópticas con la finalidad de acoplar potencia óptica entre ellas (6. 08/CEI 61931-1).

Empalme por fusión: empalme en el que los extremos de las fibras se unen de manera permanente mediante fusión (6. 09/CEI 61931-1).

Empalme mecánico: empalme en el que los extremos de las fibras se unen de manera permanente o no permanente (separable) por un medio distinto de la fusión (6. 10/CEI 61931-1).

1.2.3.1.11. Conmutador óptico

Componente pasivo con uno o más puertos que transmite, redirige o bloquea selectivamente potencia óptica en una línea de transmisión de fibra óptica (1. 3. 1/CEI 60876-1).

1.2.3.1.12. Terminación óptica

Componente utilizado para terminar una fibra (con conectores o sin ellos) a fin de suprimir las reflexiones.

1.2.3.1.13. Filtro sintonizable

Véase 1. 2. 3. 1. 7

1.2.3.1.14. Multiplexor/demultiplexor de longitud de onda óptico (MUX)/(DMUX)

Dispositivo WDM: Dispositivo de derivación selectivo en longitud de onda (utilizado en sistemas de transmisión WDM) en el que se pueden transferir señales ópticas entre dos puertos predeterminados, en función de la longitud de onda de la señal (6. 51/CEI 61931-1).

Tanto los multiplexores (MUX) de longitud de onda como los demultiplexores (DMUX) de longitud de onda se denominan normalmente dispositivos WDM" puesto que a menudo el mismo dispositivo se puede utilizar para multiplexar y demultiplexar canales.

MUX de longitud de onda: Dispositivo de derivación con dos o más puertos de entrada y un puerto de salida en el que la luz en cada puerto de entrada está restringida a una gama de longitudes de onda preseleccionada y la salida es la combinación de la luz proveniente de los puertos de entrada (6. 52/CEI 61931-1).

DMUX de longitud de onda: Dispositivo que realiza la operación inversa a un multiplexor de longitud de onda, en el que la entrada es una señal óptica que incluye dos o más gamas de longitudes de onda y la salida de cada puerto es una gama diferente preseleccionada de longitud de onda (6. 53/CEI 61931-1).

1.2.3.1.14.1. Dispositivo WDM aproximado (CWDM)

Un tipo de dispositivo WDM que tiene una separación de longitud de onda por canal inferior a 50nm pero superior a 1000GHz (unos 8nm para 1550nm y 5. 7nm para 1310nm). Dispositivos de este tipo pueden cubrir varias bandas espectrales.

1.2.3.1.14.2. Dispositivo WDM denso (DWDM)

Un tipo de dispositivo WDM que tiene una separación por canal inferior o igual a 1000GHz. Los dispositivos de este tipo pueden cubrir una o más bandas espectrales.

1.2.3.1.14.3. Dispositivo WDM amplio (WWDM)

Un tipo de dispositivo WDM que tiene una separación de longitud de onda por canal superior a o igual a 50nm. Este tipo de dispositivo separa normalmente un canal en una ventana de transmisión convencional (por ejemplo, 1310nm) a partir de otra (por ejemplo, 1550nm).

1.2.3.1.15. Compensador de dispersión (cromática) pasivo de un canal óptico

Componente pasivo que sirve para compensar la dispersión cromática de un trayecto óptico cuyos, parámetros han de cumplirse únicamente dentro de la gama de frecuencias de un canal óptico.

1.2.3.1.16. Compensador de dispersión (cromática) sintonizable

Componente que sirve para compensar la dispersión cromática de un trayecto óptico en el que la magnitud de la compensación de dispersión puede ajustarse dentro de una determinada gama.

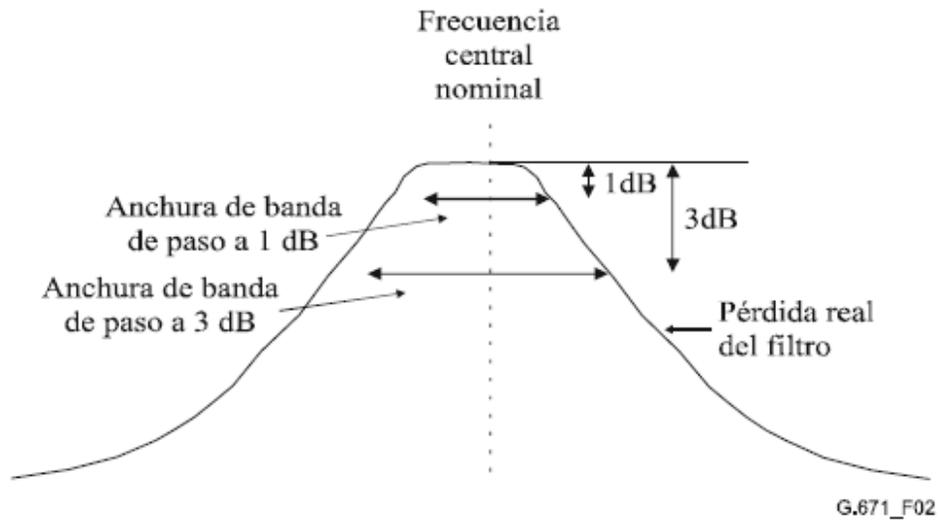
1.2.3.2. Definiciones de parámetros funcionales

NOTA – No todas las definiciones que aparecen en esta cláusula son aplicables a todos los dispositivos. La pertinencia de una determinada definición a un tipo específico de dispositivo se indica en la cláusula.

1.2.3.2.1. Anchura de banda de paso a 1 dB y a 3 dB

La anchura de banda de paso entre los puntos de atenuación de 1 dB, D_1 , de un filtro óptico se define como la gama de frecuencias dentro de la cual la pérdida del filtro debe ser inferior a 1 dB con respecto a la pérdida mínima dentro de esa gama. La anchura de la banda de paso de 1 dB es simétrica con respecto a la frecuencia central nominal f_c del filtro, es decir, para todas las frecuencias comprendidas entre $f_c - D_1/2$ y $f_c + D_1/2$, la pérdida debe estar dentro de 1 dB con respecto a la pérdida mínima. Véase la figura siguiente. La anchura de banda de paso entre los puntos de atenuación de 3 dB, D_3 , de un filtro óptico se define como la gama de frecuencias dentro de la cual la pérdida del filtro debe ser inferior a 3 dB con respecto a la pérdida mínima dentro de esa gama. La anchura de la banda de paso de 3 dB es simétrica con respecto a la frecuencia central nominal f_c del filtro, es decir, para todas las frecuencias comprendidas entre $f_c - D_3/2$ y $f_c + D_3/2$, la pérdida debe estar dentro de 3 dB con respecto a la pérdida mínima. Véase la figura 14.

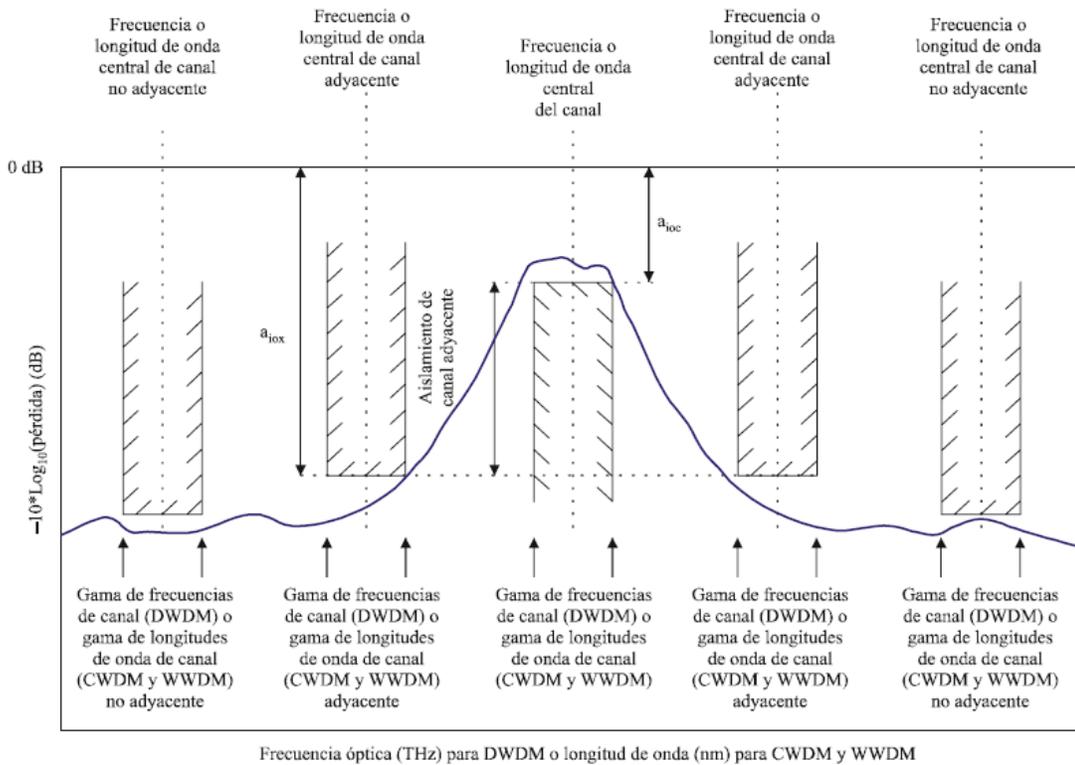
Figura 14 G. 671 Representación de las anchuras de banda de paso a 1 dB y 3 dB



1.2.3.2.2. Aislamiento de canal adyacente

El aislamiento de canal adyacente (de un dispositivo WDM) se define como el aislamiento unidireccional (extremo lejano) de dicho dispositivo, con la limitación de que x , número de longitud de onda del aislamiento, se restringe a los canales inmediatamente adyacentes al número de longitud de onda (del canal) asociado con el puerto o . Esto se muestra en la figura siguiente.

Figura 15 G. 671 – Ilustración del aislamiento de canal adyacente para un dispositivo WDM.



1.2.3.2.3. Gama de atenuaciones (sólo para atenuadores variables)

La gama de atenuaciones (de un atenuador variable) es la diferencia (en dB) entre los valores fijados de pérdida nominales máximo y mínimo.

1.2.3.2.4. Pérdida en el sentido inverso (aislamiento para un aislador de fibra óptica)

Medida de la disminución de la potencia óptica (en dB) provocada por la inserción de un aislador en su sentido de retorno. El puerto de inyección de la potencia es el puerto de salida y el puerto de recepción de la potencia es el puerto de entrada del aislador. Viene dada por la fórmula:

$$BL = -10 \log \left(\frac{P_{ob}}{P_{ib}} \right)$$

donde:

P_{ob} es la potencia óptica medida en el puerto de entrada del aislador cuando se inyecta la potencia P_{ib} en el puerto operativo. En condiciones de funcionamiento, P_{ib} es la potencia óptica reflejada en los dispositivos del circuito óptico del extremo lejano en sentido inverso y que llega al puerto de salida del aislador que se mide (1. 3. 10/CEI 61202-1).

1.2.3.2.5. Atenuación diafónica (de extremo cercano) bidireccional (para un dispositivo WDM)

En un dispositivo WDM-MUX/DMUX bidireccional, la atenuación diafónica (de extremo cercano) bidireccional se define por la fórmula:

$$BCA = a_{mox}$$

donde:

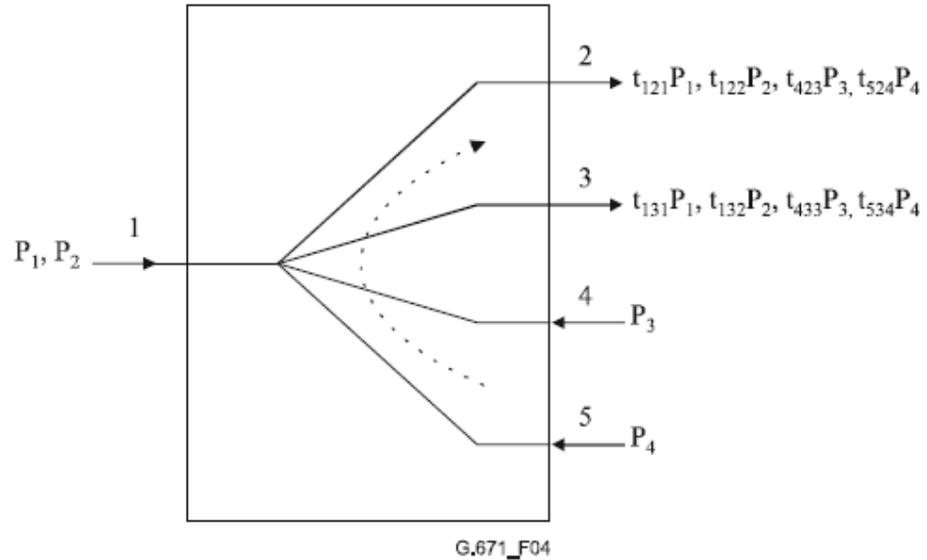
a_{mox} es un elemento de la matriz de transferencia logarítmica, donde m es el número del puerto de entrada del MUX, o es el número del puerto de salida del DMUX y x es el número de longitud de onda asociado con el puerto m .

1.2.3.2.6. Aislamiento (de extremo cercano) bidireccional (para un dispositivo WDM)

Puesto que los dispositivos WDM-MUX/DMUX bidireccionales tienen canales de entrada y canales de salida en cada uno de sus dos lados, la luz de entrada para un sentido de transmisión puede aparecer en el puerto de salida en el sentido opuesto.

En el ejemplo de un sistema bidireccional de cuatro longitudes de onda presentado a continuación, las longitudes de onda 1 y 2 se desplazan de izquierda a derecha y las longitudes de onda 3 y 4 de derecha a izquierda.

Figura 16 G. 671 – Ejemplo de aislamiento (de extremo cercano) bidireccional.



El aislamiento (de extremo cercano) bidireccional se define por tanto por la fórmula:

$$I_B = a_{mox} - a_{doc}$$

a_{mox} y a_{doc} son elementos de la matriz de transferencia logarítmica donde d es el número del puerto de entrada DMUX, o es el número del puerto de salida DMUX, c es el número de longitud de onda (del canal) asociado con el puerto o , m es el número del puerto MUX de entrada y x es el número de longitud de onda asociado con el puerto m .

En el ejemplo antes presentado, el aislamiento bidireccional del puerto 2 a la longitud de onda 3 es $a_{423} - a_{121}$.

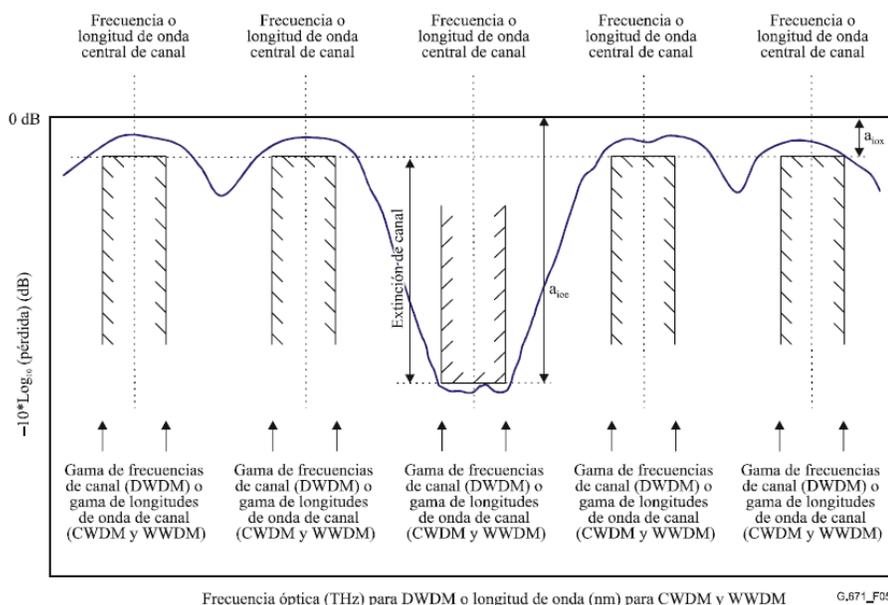
1.2.3.2.7. Extinción de canal

En la gama de longitudes de onda de funcionamiento, la diferencia (en dB) entre la pérdida de inserción máxima de los canales (no bloqueados) no extinguidos y la pérdida de inserción mínima de los canales (bloqueados) extinguidos. Viene dada por la fórmula:

$$CE = a_{ioe} - a_{iox}$$

Los valores a_{ioe} y a_{iox} son los elementos de la matriz de transferencia logarítmica siendo i el número de puerto de entrada, o el número de puerto de salida, e el número de longitud de onda (del canal) del canal extinguido y x el número de longitud de onda del canal no extinguido con la mayor pérdida. Esto se ilustra en la figura siguiente.

Figura 17 G. 671 Ejemplo de extinción de canal de un dispositivo WDM



NOTA – A veces se emplea una definición de extinción de canal diferente de la anterior, a saber, la diferencia entre la pérdida de inserción máxima del canal cuando no está extinguido (no bloqueado) y la pérdida de inserción mínima para el mismo canal cuando está extinguido (bloqueado).

Si bien el valor de la extinción del canal obtenido mediante este método puede ser mayor, en ciertas circunstancias la diafonía interferométrica predicha por esta extinción del canal puede no corresponder al caso más desfavorable.

1.2.3.2.8. Gama de frecuencias de canal

La gama de frecuencias en la que un dispositivo DWDM debe funcionar con una calidad de funcionamiento especificada. Para una determinada frecuencia central de canal nominal, f_{nomi} , esta gama de frecuencias varía entre $f_{imin} = (f_{nomi} - \Delta f_{máx})$ y $f_{imáx} = (f_{nomi} + \Delta f_{máx})$, donde $\Delta f_{máx}$ es la desviación máxima de la frecuencia central de canal. La frecuencia nominal central de canal y la desviación máxima de la frecuencia central de canal se definen en la Rec. ITU-T G. 692.

1.2.3.2.9. Pérdida de inserción del canal (dispositivos WDM)

Disminución de la potencia óptica entre el puerto de entrada y el puerto de salida de un dispositivo WDM, expresada en decibelios (dB). Se define por la siguiente fórmula:

$$IL = -10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

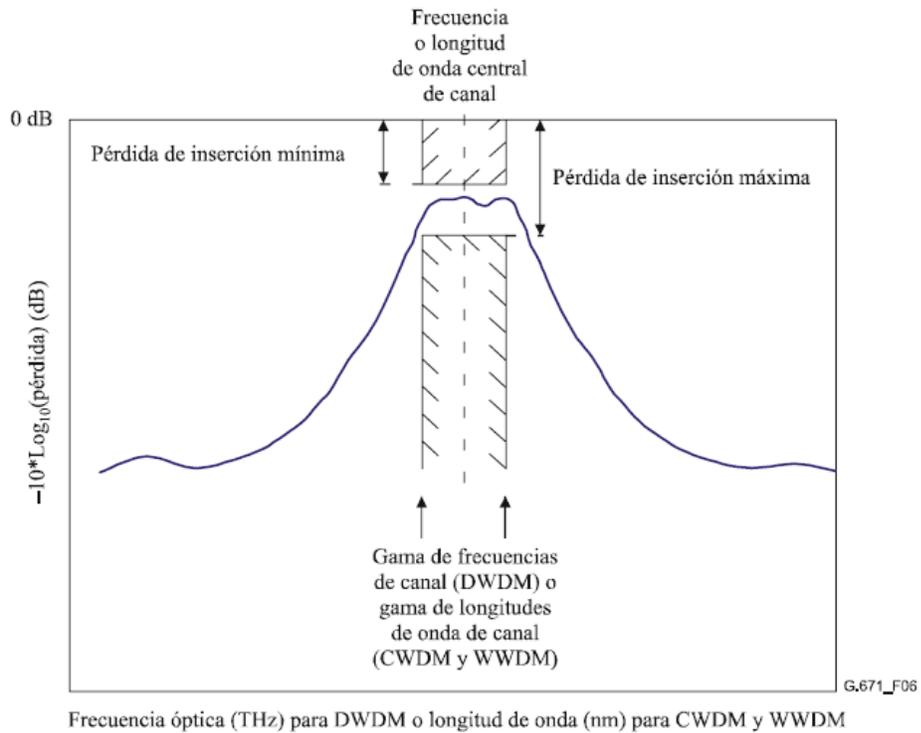
donde:

P_{in} es la potencia óptica inyectada en el puerto de entrada y P_{out} es la potencia óptica recibida del puerto de salida.

NOTA – Para un dispositivo WDM es un elemento a_{iow} de la matriz de transferencia logarítmica $n \times n \times k$, donde i es el número del puerto de entrada, o es el número del puerto de salida y w es el número de longitud de onda asociado con el puerto i u o , n es el número total de puertos de entrada + puertos de salida y k es el número total de longitudes onda de la matriz de transferencia logarítmica.

Para dispositivos WWDM se especificará como un valor máximo y un valor mínimo en cada gama de longitudes de onda de funcionamiento. Para dispositivos DWDM y CWDM se especificará como un valor máximo y un valor mínimo en la gama de frecuencias del canal (o de longitudes de onda) como se muestra en la figura siguiente.

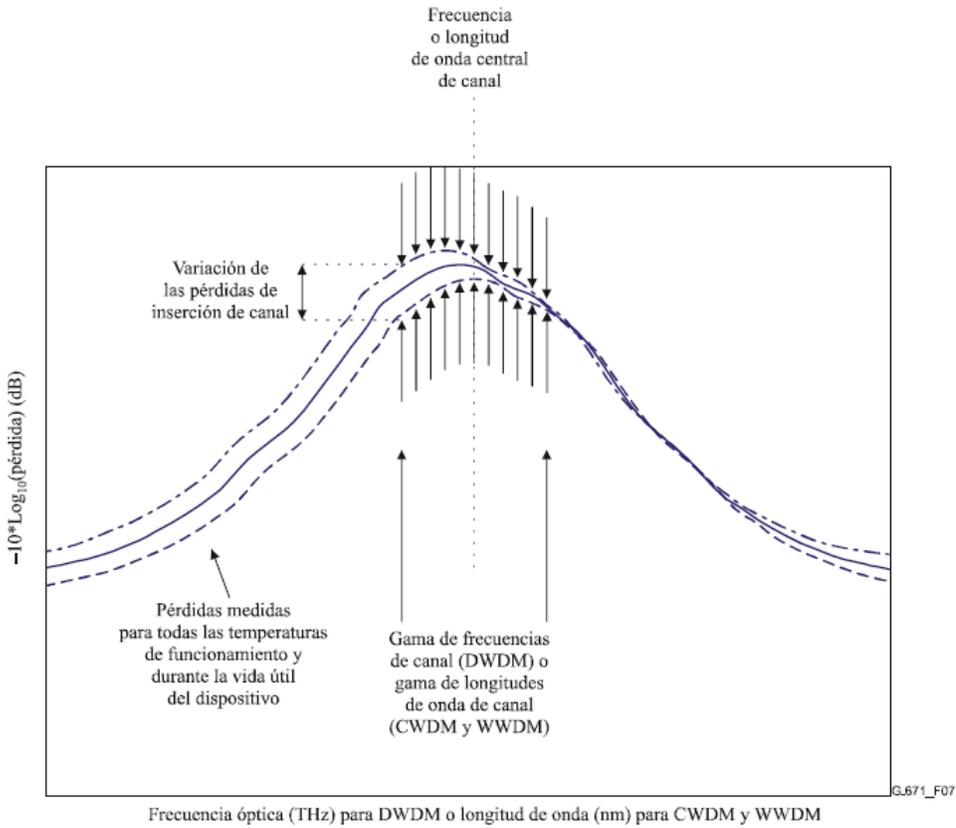
Figura 18 G. 671 – Ilustración de las pérdidas de inserción máxima y mínima de un dispositivo WDM.



1.2.3.2.10. Desviación de la pérdida de inserción de canal (dispositivos WDM)

Variación máxima de la pérdida de inserción en cualquier frecuencia dentro de la gama de frecuencias de canal (dispositivos DWDM) o de la gama de longitudes de onda de canal (dispositivos CWDM y WWDM), como se muestra en la figura siguiente.

Figura 19 G. 671 – Ilustración de la variación de las pérdidas de inserción de canal para un dispositivo WDM.



1.2.3.2.11. No uniformidad de canal

Diferencia (en dB) entre la potencia del canal con mayor potencia (en dBm) y la del canal con menor potencia (en dBm). Se aplica a una señal multicanal en la gama de longitudes de onda de funcionamiento.

1.2.3.2.12. Tiempo de respuesta de canal

Periodo de tiempo que necesita un dispositivo para cambiar el estado deseado de un canal desde un nivel de potencia inicial especificado a un nivel de potencia final especificado, cuando se cumple la tolerancia de no uniformidad de canal de salida resultante, medido a partir del instante en que se activa o se desactiva la potencia.

1.2.3.2.13. Separación de canal

Diferencia entre frecuencias o longitudes de ondas centrales de canales adyacentes en un dispositivo WDM. Las separaciones de canal DWDM se basan en el plan de la Rec. ITU-T G. 694. 1. Las separaciones de canal CWDM se basan en el plan de la Rec. ITU-T G. 694. 2.

1.2.3.2.14. Gama de longitudes de onda de canal

Gama de longitudes de onda en la que un dispositivo CWDM o WWDM debe funcionar con una determinada calidad de funcionamiento. Para una determinada longitud de onda central nominal de canal, λ_{nomi} , esta gama de longitudes de onda está comprendida entre $\lambda_{imin} = (\lambda_{nomi} - \Delta\lambda_{máx})$ y $\lambda_{imáx} = (\lambda_{nomi} + \Delta\lambda_{máx})$, donde $\Delta\lambda_{máx}$ es la máxima desviación de la longitud de onda central de canal.

1.2.3.2.15. Directividad

Para un componente de derivación óptico o un conmutador óptico, valor asr de la matriz de transferencia logarítmica, donde s y r son los números de puerto de dos puertos nominalmente aislados (1. 3. 11/CEI 60875-1).

1.2.3.2.16. Incremento de atenuación (sólo para atenuadores variables)

Este término sólo es aplicable a atenuadores variables. Es la diferencia entre la atenuación del componente en una determinada posición de ajuste y la atenuación mínima (1. 3. 6/CEI 60869-1).

1.2.3.2.17. Pérdida de inserción (dispositivos no WDM)

Disminución de la potencia óptica entre el puerto de entrada y el puerto de salida de un componente pasivo, expresada en decibelios. Se define por la siguiente fórmula:

$$IL = -10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

donde:

P_{in} es la potencia óptica inyectada en el puerto de entrada y P_{out} es la potencia óptica recibida del puerto de salida.

NOTA 1 – Para un componente de derivación óptico, es un elemento a_{io} (donde i es el número del puerto de entrada y o es el número del puerto de salida) de la matriz de transferencia logarítmica (1. 3. 7/CEI 60875-1,).

NOTA 2 – Para un conmutador óptico, es un elemento a_{io} (donde i es el número del puerto de entrada y o es el número del puerto de salida) de la matriz de transferencia logarítmica. Depende del estado del conmutador (1. 3. 9/CEI 60876-1).

NOTA 3 – Para un filtro óptico se especificará como un valor máximo y un valor mínimo en cada gama de longitudes de onda de funcionamiento.

1.2.3.2.18. Tolerancia de pérdida de inserción (sólo para atenuadores ópticos)

Diferencia entre la pérdida nominal y la real de un atenuador.

1.2.3.2.19. Aislamiento de un conmutador óptico

El aislamiento de un conmutador óptico es el valor mínimo de la relación entre el coeficiente de transferencia del conmutador en su estado en funcionamiento y el coeficiente de transferencia en su estado desconectado, en la gama de longitudes de onda de funcionamiento. Se define como:

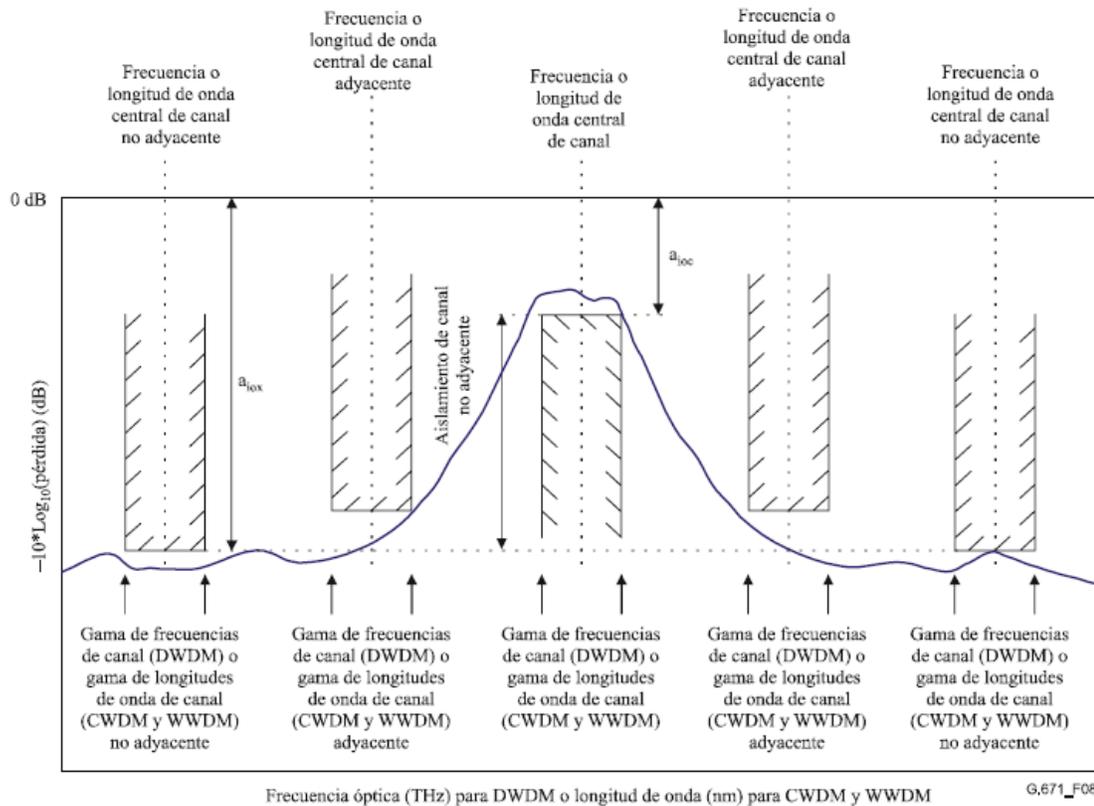
$$IOS = 10 \log \left(\frac{t_{io}}{t^o_{io}} \right)$$

Donde t_{io} es el coeficiente de transferencia entre el puerto i y el puerto o con el trayecto io activo y t^o_{io} es el coeficiente de transferencia entre el puerto i y el puerto o con el trayecto io desconectado.

1.2.3.2.20. Aislamiento de canal no adyacente

El aislamiento de canal no adyacente (de un dispositivo WDM) se define como el aislamiento (de extremo lejano) unidireccional de dicho dispositivo con la limitación de que x , número de longitud de onda de aislamiento, se restringe a cada uno de los canales **no** inmediatamente adyacentes al número de longitud de onda (canal) asociado con el puerto o . Esto se muestra en la figura siguiente.

Figura 20 G. 671 – Ilustración del aislamiento de canal no adyacente para un dispositivo WDM



1.2.3.2.21. Gama de longitudes de onda de funcionamiento

Gama de longitudes de onda especificada de λ_{min} a $\lambda_{máx}$ alrededor de una gama nominal de longitudes de onda de funcionamiento λ_i , dentro de la cual un componente pasivo debe funcionar con una calidad de funcionamiento especificada (1. 3. 21/CEI 60875-1).

NOTA 1 – Para un componente de derivación óptico con más de una longitud de onda de funcionamiento, las correspondientes gamas de longitudes de onda de funcionamiento no son necesariamente iguales (1. 3. 21/CEI 60875-1).

NOTA 2 – Los componentes, incluidos atenuadores, terminadores, conectores y empalmes, pueden funcionar con una calidad especificada o con una calidad aceptable incluso fuera de la gama de longitudes de onda especificada.

1.2.3.2.22. Atenuación fuera de banda

Atenuación mínima (en dB) de los canales que se encuentran fuera de la gama de longitudes de onda de funcionamiento.

1.2.3.2.23. Pérdida dependiente de la polarización (PDL, *polarization dependent loss*)

Máxima variación de la pérdida de inserción debida a un cambio de estado de la polarización (SOP) entre todos los estados de la polarización.

1.2.3.2.24. Reflectancia dependiente de la polarización

Máxima variación de la reflectancia debida a un cambio de estado de la polarización entre todos los estados de la polarización.

1.2.3.2.25. Dispersión en el modo de polarización (PMD, *polarization mode dispersion*)

La dispersión en el modo de polarización (PMD) se describe normalmente en términos de retardo de grupo diferencial (DGD), que es la diferencia en tiempo entre los estados principales de polarización (SOP) de una señal óptica en una longitud de onda y en un instante determinados.

El objetivo de las especificaciones de PMD en esta recomendación es permitir la definición de un único parámetro para cada componente que pueda ser sustituido en la ecuación siguiente que calcula el DGD máximo de un enlace (que incluye uno o más de los componentes en cuestión) que se puedan superar con una determinada probabilidad.

$$DGD_{\text{máxlink}} = \left[DGD_{\text{máxF}}^2 + S^2 \sum_i PMD_{Ci}^2 \right]^{1/2}$$

donde:

$DGD_{\text{máxlink}}$: DGD máximo del enlace (ps)

$DGD_{\text{máxF}}$: DGD máximo concatenado del cable de fibra óptica (ps)

S: Factor de ajuste de Maxwell (véase el cuadro 1)

PMD_{Ci} : Valor de la PMD del componente i-ésimo (ps)

Esta ecuación supone que se aproximan los valores estadísticos del valor instantáneo de DGD mediante una distribución de Maxwell, controlando la probabilidad de que el valor instantáneo de DGD supere $DGD_{máxlink}$ mediante el valor del factor de ajuste de Maxwell tomado del cuadro siguiente.

Tabla II G. 671 Valores y probabilidades de S.

Relación entre los valores máximo y medio (S)	Probabilidad de superar el máximo	Relación entre los valores máximo y medio (S)	Probabilidad de superar el máximo
3	$4,2 \times 10^{-5}$	4	$7,4 \times 10^{-9}$
3,2	$9,2 \times 10^{-6}$	4,2	$9,6 \times 10^{-10}$
3,4	$1,8 \times 10^{-6}$	4,4	$1,1 \times 10^{-10}$
3,6	$3,2 \times 10^{-7}$	4,6	$1,2 \times 10^{-11}$
3,8	$5,1 \times 10^{-8}$		

En esta recomendación el valor PMD de un componente óptico se define como el DGD máximo en la gama de longitudes de onda de funcionamiento a menos que se pueda demostrar que las características del componente son tales que la definición alternativa de PMD utilizada no alcanza el valor de $DGD_{máxlink}$ predicho por la ecuación anterior, estando subestimado para cualquier longitud de onda de funcionamiento.

Cuando se pueda establecer que, para un determinado componente, la distribución de DGD en el tiempo es aproximadamente la de Maxwell, entonces el valor de PMD se puede definir como el valor del DGD promediado en el tiempo en la longitud de onda más desfavorable. Si también se puede demostrar que la distribución del DGD con la longitud de onda es la de Maxwell con un valor medio aproximadamente igual que el de la distribución de DGD con el tiempo, entonces el valor de PMD se puede definir como el valor del

DGD promediado en la longitud de onda. Esta condición debería ser verdadera para componentes basados en fibra tales como fibras con compensación de dispersión.

De forma alternativa, para componentes en los que el DGD puede variar con la longitud de onda, pero no apreciablemente en el tiempo y cuando la distribución del DGD en función de la longitud de onda sea tal que la distribución de Maxwell no subestima el valor máximo de DGD para probabilidades inferiores a $4,2 \times 10^{-5}$, el PMD también se puede definir como el valor del DGD promediado en la longitud de onda. Esto, sin embargo, también requiere que exista una correlación despreciable entre el DGD de un dispositivo y el de otro en la misma longitud de onda.

Algunos componentes ópticos están constituidos por múltiples trayectos ópticos. Por ejemplo, MUX/DMUX WDM y amplificadores híbridos en banda C/L o compensadores. Cuando se especifican estos componentes multitrayecto mediante un único valor, entonces el PMD de cada trayecto óptico por separado debe obtenerse por separado y el PMD resultante del componente se definirá como el máximo de dichos valores.

1.2.3.2.26. Reflectancia

Relación entre la potencia reflejada P_r y la potencia incidente P_i en un puerto dado de un componente pasivo, para determinadas condiciones de composición espectral, polarización y distribución geométrica. Generalmente se expresa en decibelios mediante la siguiente fórmula:

$$R = 10 \log \left(\frac{P_r}{P_i} \right)$$

NOTA 1 –

- Para un componente óptico de derivación, es un elemento aii (donde i es el número de puerto de entrada), de la matriz de transferencia logarítmica (1. 3. 8/CEI 60875-1).
- Para un dispositivo WDM, es un elemento $aiiw$ (donde i es el número de puerto de entrada, w es el número de longitud de onda), de una matriz de transferencia logarítmica. Para dispositivos WWDM, se especificará como un valor máximo en cada gama de longitudes de onda de funcionamiento. Para dispositivos CWDM, se especificará como un valor máximo dentro de la gama de longitudes de onda de canal. Para dispositivos DWDM, se especificará como un valor máximo en la gama de frecuencias de canal.
- Para un conmutador óptico, es un elemento aii (donde i es el número de puerto de entrada), de la matriz de transferencia logarítmica. Depende del estado del conmutador (1. 3. 10/CEI 60876-1).
- Para un filtro óptico, se especificará en cada gama de longitudes de onda de funcionamiento.

NOTA 2 – Para mayor claridad, los valores de reflectancia para dispositivos ópticos no incluyen las contribuciones a la reflectancia de los conectores o de puertos ópticos sin terminación. Las contribuciones a la reflectancia provenientes de los conectores se considerarán por separado.

NOTA 3 – En general, en el UIT-T, los componentes se especifican en términos de su reflectancia (un valor negativo en dB) mientras que los sistemas se especifican utilizando el término pérdida de retorno (un valor positivo en dB).

En algunos documentos de la CEI, los componentes (que pueden tener múltiples interfaces) se especifican normalmente en términos de pérdida de retorno.

1.2.3.2.27. Repetibilidad de un conmutador óptico

Queda en estudio.

1.2.3.2.28. Reproducibilidad de la fijación de la banda de paso

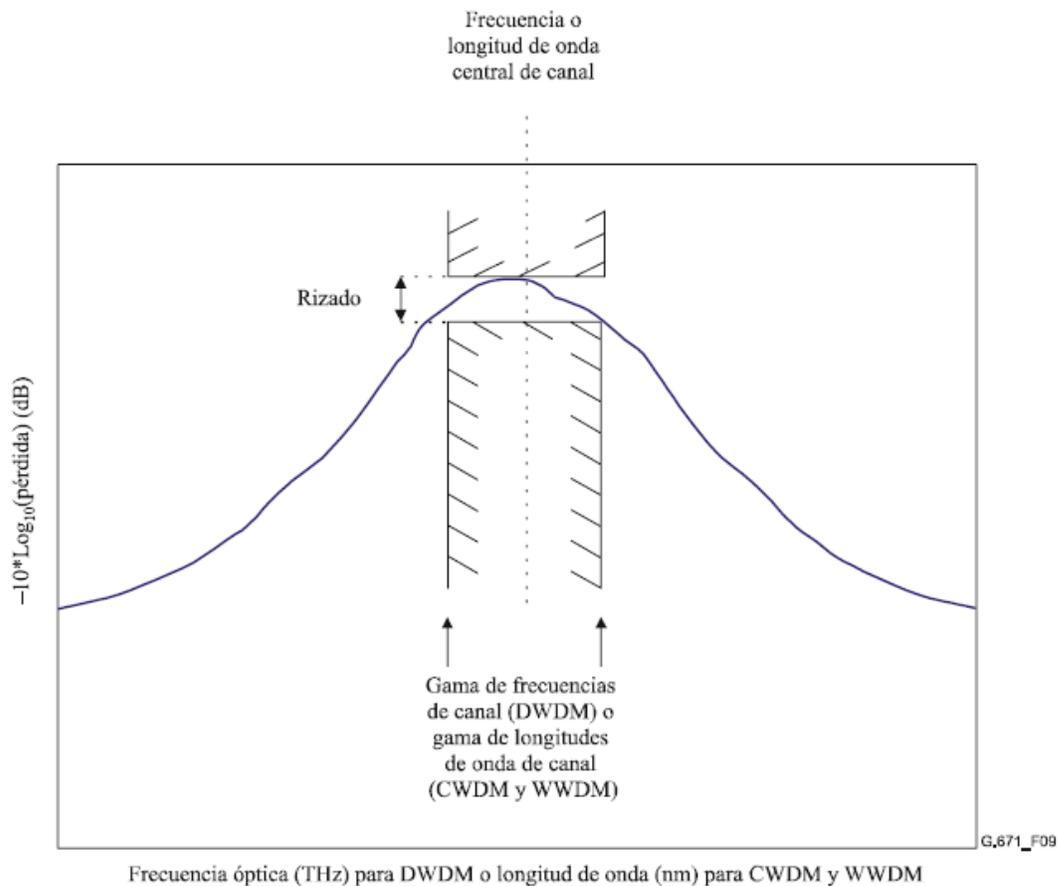
Varianza de la diferencia entre la frecuencia central solicitada y el centro del filtro sintonizable paso banda a 3 dB cuando se repite muchas veces el montaje.

1.2.3.2.29. Rizado

Para dispositivos WDM y filtros sintonizables, diferencia pico a pico de la pérdida de inserción en la gama de frecuencias (o de longitudes de onda) de canal. Son necesarios más estudios sobre posibles especificaciones adicionales para la utilización y aplicación de este parámetro en disposiciones en cascada de múltiples dispositivos.

Esto se muestra en la figura siguiente.

Figura 21 G. 671 – Ilustración del rizado para un dispositivo WDM.



1.2.3.2.30. Tiempo de conmutación

Tiempo necesario para que el conmutador active o desactive el trayecto *io* a partir de un determinado estado inicial, medido a partir del instante en que se activa o desactiva (1. 3. 19/CEI 60876-1).

1.2.3.2.31. Tiempo de sintonía (establecimiento)

El tiempo de sintonía (establecimiento) de un filtro sintonizable se define como la duración entre el inicio de la sintonía de frecuencia y el instante en que la pérdida del filtro sintonizable converge hacia (valor en estudio) dB de su valor final en la frecuencia central solicitada del filtro \pm la mitad de la anchura de la banda de paso a 3 dB.

NOTA – Se ha propuesto 0,1 dB.

1.2.3.2.32. Atenuación diafónica (de extremo lejano) unidireccional (para un dispositivo WDM)

Esta definición es aplicable a un dispositivo WDM capaz de tratar una radiación de k longitudes de onda ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$) procedente de un puerto de entrada, separándola en k puertos de salida, cada uno de los cuales, nominalmente, proporciona radiación únicamente a una longitud de onda específica. La atenuación diafónica (de extremo lejano) unidireccional es una medida de la parte de la potencia óptica en cada longitud de onda que sale del puerto a longitudes de onda diferentes de la longitud de onda nominal, con respecto a la potencia a la longitud de onda nominal. Viene dada por la fórmula:

$$UCA = a_{iox}$$

a_{iox} es un elemento de la matriz de transferencia logarítmica, donde i es el número del puerto de entrada, o es el número del puerto de salida, y x es el número de longitud de onda de aislamiento, siendo x cualquier número de longitud de onda diferente de la longitud de onda (del canal) asociado con el puerto o . En cada puerto de salida o hay $k - 1$ longitudes de onda de aislamiento λ_x .

1.2.3.2.33. Aislamiento (de extremo lejano) unidireccional (para un dispositivo WDM)

Esta definición es aplicable a un dispositivo WDM capaz de tratar una radiación de k longitudes de onda ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$) procedente de un puerto de entrada, separándola en k puertos de salida, cada uno de los cuales, nominalmente, proporciona radiación únicamente a una longitud de onda específica. El aislamiento (de extremo lejano) unidireccional es una medida de la parte de la potencia óptica en cada longitud de onda que sale del puerto a longitudes de onda diferentes de la longitud de onda nominal, con respecto a la potencia a la longitud de onda nominal. Viene dada por la fórmula:

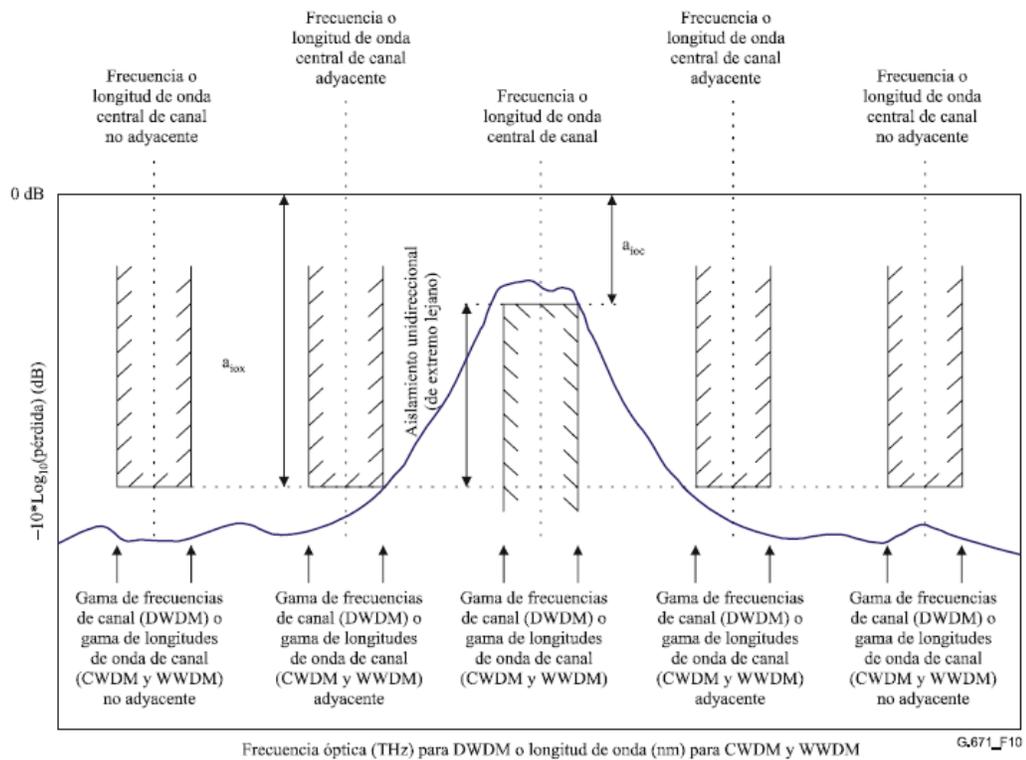
$$I_U = a_{iox} - a_{ioc}$$

siendo a_{iox} y a_{ioc} elementos de la matriz de transferencia logarítmica, donde i es el número del puerto de entrada, o es el número del puerto de salida, c es el número de longitud de onda (del canal) asociado con el puerto o , y x es el número de longitud de onda de aislamiento, donde x es cualquier número de longitud de onda diferente de c .

En cada puerto de salida o hay una longitud de onda de canal λ_c y $k - 1$ longitudes de onda de aislamiento λ_x . Esto se ilustra en la figura siguiente.

NOTA – En esta Recomendación se utiliza λ_c para designar longitud de onda de canal y no la longitud de onda de corte de la fibra.

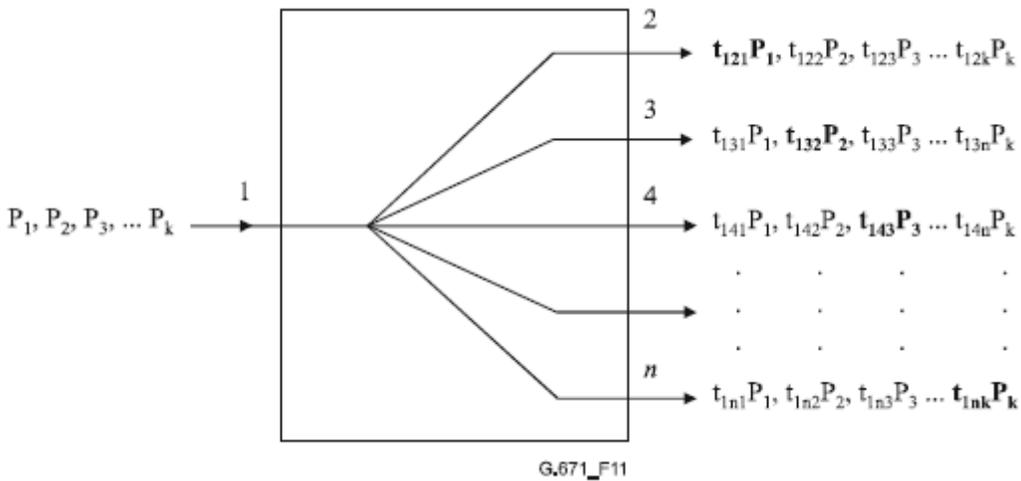
Figura 22 G. 671 – Ilustración de aislamiento unidireccional (de extremo lejano) de un dispositivo WDM.



La figura siguiente ilustra un ejemplo basado en la utilización de la matriz de transferencia, si en un dispositivo demultiplexor WDM se inyectaran las potencias $P_1, P_2, P_3, \dots, P_k$ a las longitudes de onda 1, 2, 3, ... k respectivamente, las señales que se obtendrían en el puerto x serían:

$$t_{1x_1}P_1, t_{1x_2}P_2, t_{1x_3}P_3, \dots, t_{1x_k}P_k$$

Figura 23 G. 671 Ejemplo de dispositivo demultiplexor WDM por tanto, el aislamiento del puerto 2 a la longitud de onda 3 sería $a_{123} - a_{121}$.



1.2.3.2.34. Uniformidad

La matriz de transferencia logarítmica de un componente puede incluir un conjunto especificado de coeficientes que son nominalmente finitos e iguales. En este caso la gama de estos coeficientes a_{io} , expresada en decibelios, se denomina uniformidad del componente (1. 3. 16/CEI 60875-1).

1.2.3.2.35. Gama de ajuste de la compensación de dispersión (para el compensador de dispersión sintonizable)

La diferencia entre la dispersión máxima y mínima (en ps/nm) que puede lograrse mediante un compensador de dispersión sintonizable en toda la gama de frecuencias de canal.

1.2.3.2.36. Rizado de retardo de grupo

Se define como la variación máxima de cresta a cresta del retardo de grupo a través del dispositivo óptico dentro de la gama de frecuencias de canal (dispositivos DWDM) o de la gama de longitudes de onda de canal (dispositivos CWDM y WWDM).

En un grupo de ondas de frecuencias ligeramente diferentes, el retardo de grupo es el tiempo necesario para que cualquier punto definido en la envolvente (es decir, la envolvente determinada por la suma resultante del grupo de ondas) atraviese el dispositivo. La relación entre el rizado del retardo de grupo y la penalización óptica que éste causa depende de factores tales como la velocidad de variación del retardo de grupo con respecto a la frecuencia óptica (longitud de onda), la velocidad binaria de la señal, el formato de modulación, etc.

Esto significa que el valor de este parámetro se debe determinar a partir de la aplicación en la recomendación del sistema de transmisión correspondiente.

1.2.3.2.37. Gama de atenuación dinámica del canal(sólo para el ecualizador dinámico del canal)

Para el ecualizador dinámico del canal, esta gama se define como la diferencia (en dB) entre la pérdida de inserción y el valor más grande de atenuación del canal para la que se cumplen las demás especificaciones de parámetros.

1.2.3.2.38. Resolución de atenuación del canal (sólo para el ecualizador dinámico del canal)

Se define como la diferencia máxima entre las pérdidas de inserción dentro de la gama de frecuencias (o longitudes de onda) de canal de dos configuraciones de atenuación adyacentes cualesquiera dentro de la gama de atenuación dinámica del ecualizador dinámico del canal (en dB).

2. FIBRAS ÓPTICAS QUE SOPORTAN CWDM

Mucho del esfuerzo de desarrollo de fibra óptica de monomodo durante los 90s fue enfocado en optimizar el rendimiento de las fibra en sistemas de transmisión de larga distancia que tenían capacidad de OC-192 (10Gb/s) y utilizaban DWDM and tecnologías de fibra dopada de erbio. Sistemas DWDM terrestres de larga distancia inicialmente operaban dentro de la banda espectral de 35nm de ancho conocida como la banda C (1530 a 1565nm) y la regeneración eléctrica era típicamente requerida en intervalos de 1000km o menos. Tecnologías WDM actualmente han tenido avances para soportar anchos de banda ópticos más amplios a lo largo de las bandas S-, C- y L- aumentando las ratas de señal a 40Gb/s o mas y transmisiones de ultra larga distancia, si necesidad de regeneración mayores a 1500Km.

El problema de diseño de fibra para sistemas banda ancha, alta rata de transmisión y larga distancia, es una optimización de los intercambios de las propiedades de la fibra con las metas de mitigar (i) los efectos no lineales de atenuación por fibra, (ii) tener soporte para la habilidad de compensación de dispersión de banda ancha, y (iii) tener soporte para ganancia Ramman distribuida de bajo ruido y banda ancha. Es claro, la optimización también requería que las fibras resultantes se pudieran fabricar a costos razonables y que la fibra pudiera ser unida, cableada e instalada en ambientes de telecomunicaciones con atenuación baja y estable. La actual generación de fibras de dispersión media (MDFs), tales como la marca TrueWare REACH representan el más alto nivel de desempeño en diseños de fibra de larga distancia.

A medida que el cuello de botella de la capacidad de la red de telecomunicaciones cambiaba de las redes de larga distancia a las redes de acceso y redes metro, el enfoque en las inversiones de red se mudó a los sistemas de acceso y sistemas metro. De igual manera, el enfoque en el desarrollo de fibra cambió de soportar la última y más alta capacidad de sistemas DWDM a sistemas CWDM, los cuales son eficientes en materia de costos y para tráfico de redes de acceso y redes metro. Esto propició la aceptación de fibras de espectro completo que proveen baja pérdida sobre un rango amplio por medio de la eliminación del pico de absorción OH- a 1385nm y la sensibilidad de pérdida de fibra debida a la exposición de hidrógeno molecular.

2.1. Propiedades de la fibra y efectos sobre el rendimiento de sistemas CWDM

2.1.1. Atenuación por fibra

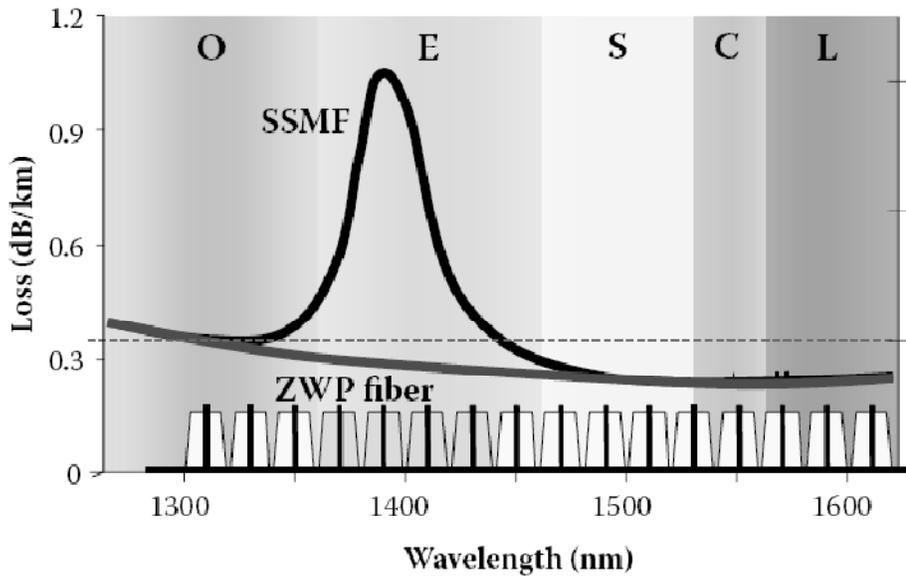
Tecnología de amplificación óptica no es utilizada generalmente con sistemas CWDM, debido a la necesidad de amplificación sobre la banda ancha de longitud de onda de 1310nm a 1610nm. Sin tecnología disponible de amplificación de banda ancha y bajo costo y limitaciones de potencia impuestas por los láseres directamente modulados de bajo costo (DMLs), la extensión del presupuesto puede ser limitado a menos de 30dB, la extensión de pérdida limitará la extensión de distancia entre 40 a 50 Km.

Debido a que para tasas de transmisión de hasta 2. 5Gb/s los presupuestos de potencia de canales de alta pérdida determinan el alcance de un sistema CWDM, la figura espectral de atenuación por fibra tiene un rol determinante en diseño de sistemas CWDM.

Una curva de atenuación de espectro típica de 1000 a 1700nm de una fibra óptica moderna de base germanio-silicato sobre un diámetro bobino de 150 mm de diámetro se muestra en la figura 24. La forma espectral es dominada por la dependencia de λ^{-4} de la dispersión de Rayleigh. En la vecindad de 1550nm, la pérdida alcanza los valores más bajos y cerca de 0. 185dB/km. A 1310nm, la curva de pérdida tiene un mínimo local de aproximadamente 0. 325dB/km.

A longitudes de onda mayores que 1550nm, el nivel de pérdida aumenta, debido a efectos de empaque, tales como la pérdida asociada por macro dobleces con los dobleces de 150mm de diámetro por enrollamiento. Puede existir atenuación adicional a largas longitudes de onda resultantes de "colas de pequeñas longitudes de onda" de absorción infrarroja, tales como contaminación por OH^- .

Figura 24 Comparación de atenuación espectral de una fibra ZWP (Cero pico de agua ITU-TG. 652D) con fibra monomodo de pico de agua estándar (SSMF, ITU-T G. 652). La ITU propuso que los canales CWDM fuesen trasladados, mientras que aquellos marcados en gris indican canales obtenidos gracias a la fibra ZWP.



A 1385nm, elementos de absorción molecular relacionados a la contaminación de OH se manifiestan en el ya conocido pico de agua. La pérdida por 1385nm puede ser disminuida más adelante por exposición a temperatura ambiente de la fibra al H₂. El hidrógeno molecular se difunde a través los espacios intersticiales dentro de la matriz de vidrio, reaccionando a sitios de vidrio químicamente reactivos para formar especies absorbentes, tales como SiOH, resultando en un crecimiento del pico de agua con el paso del tiempo. Como será discutido más adelante en este capítulo, el crecimiento del pico de agua es permanente incluso a bajos niveles de exposición de H₂ a temperatura de sala y puede crecer hasta 1dB/km o más donde ciertos procesos atómicos relacionados a defectos están presentes en la estructura del vidrio.

Procesos en las técnicas de procesamiento del vidrio durante los 1990s han llevado a reducir la contaminación OH y la magnitud del pico de absorción. La figura anterior también ilustra los efectos de estos avances en el procesamiento. La curva de atenuación etiquetada como SSMF (Fibra monomodo estándar por sus siglas en inglés) muestra el incremento de pérdida por encima del nivel de dispersión de Rayleigh en la región cercana a 1385nm la cual es típica de la SSMF. La curva etiquetada ZWP (cero pico de agua) muestra la atenuación de una fibra moderna con contaminación de OH reducida y el pico de agua efectivamente removido.

Además, la figura 24 muestra un traslape de las longitudes de onda de las señales CWDM sobre la curva de atenuación espectral. La propuesta de la ITU-T para sistemas CWDM incluye el posicionamiento de 18 canales sobre un grid espaciado 20nm que extiende el rango de las longitudes de onda desde 1270nm a 1610nm. Las fibras ZWP tienen baja atenuación sobre el rango espectral desde 1360nm a 1440nm el cual compone la banda E, permitiendo transmisión eficiente sobre los cuatro canales CWDM ubicados dentro de la banda E. De esta manera, las fibras modernas de espectro completo hacen posible la transmisión sobre los 16 canales CWDM de baja pérdida ubicados sobre el rango de longitudes de onda comprendidos entre 1310 a 1640nm.

2.1.2. Pérdidas por dobleces inducidos

Pérdidas por fibra óptica pueden verse afectadas también por la presencia de dobleces axiales o deformación. Dobleces que resultan en deflexiones del eje de la fibra que son comparados ampliamente con el diámetro del núcleo de la fibra, por ejemplo, loops o los dobleces resultantes por enrollamiento, son

llamados macrodoblez. Mientras más pequeño el radio de la macrodoblez, mas alta es la atenuación resultante. Adicionalmente, deformaciones del eje a pequeña escala (pequeñas relativamente al diámetro del núcleo de la fibra), por ejemplo, causados por presionar la fibra contra una superficie áspera dentro de un cable, resulta en atenuación a través de efectos de modo de acople y se le conoce como microdoblez. En donde las macrodoblez son caracterizadas por el radio de su curvatura, por ejemplo, 10 mm de radio, el eje de la deformación de las microdoblez es típicamente estocástico por naturaleza y por lo tanto se caracteriza por la densidad espectral de potencia de una deformación de eje. Ambas, la magnitud y forma de la densidad espectral de potencia de las deformaciones por microdoblez afectan la magnitud y la forma de pérdida por microdoblez.

2.1.2.1. Pérdida por macrodoblez

La siguiente es una explicación heurística del fenómeno de pérdida por macrodoblez basada en el modelo de perfil de pérdida por doblez propuesto por Heiblum. Un modo de una fibra óptica es un modo límite, es decir, tiene un campo radial desvaneciente en la cubierta del núcleo, donde propagación longitudinal constante, β , es mayor que la constante de propagación de la onda plana de la cubierta del núcleo, $n_{\text{clad}} \cdot k$ donde k es la constante de propagación en el espacio libre y n_{clad} es el índice de refracción del material de la cubierta del núcleo. En otras palabras, la inecuación

$$\beta > n_{\text{clad}} \cdot k$$

debe mantenerse. Dividiendo ambos lados de la ecuación anterior dentro de k , se tiene

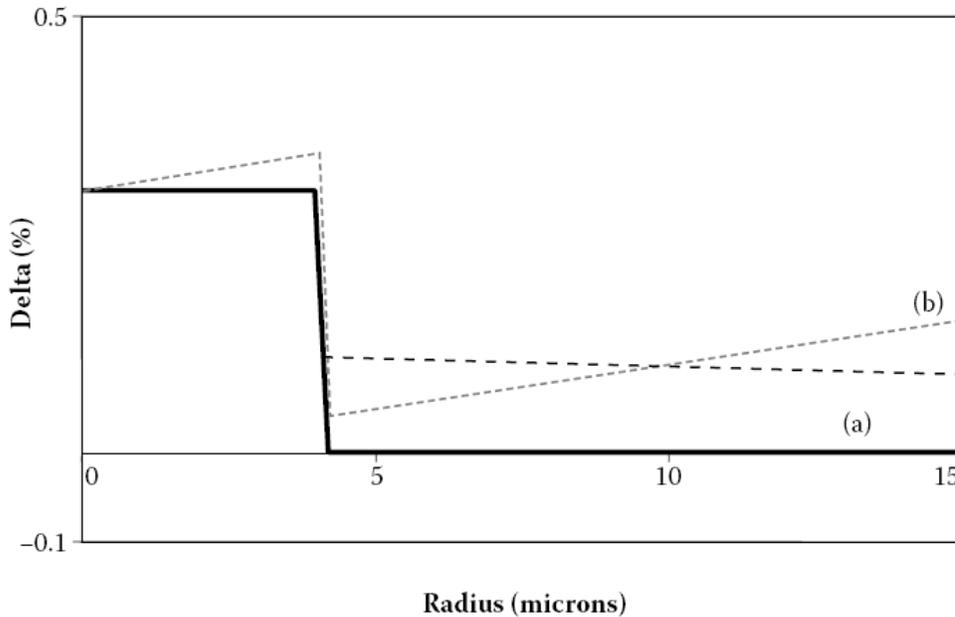
$$\beta/k > n_{\text{clad}}$$

El radio β/k índice fundamental de modo efectivo, el cual debe ser mayor que el índice de la cubierta del núcleo para que el campo en la cubierta decaiga radialmente. Si el índice efectivo del modo es menor que el índice de la cubierta, entonces la solución del campo radial en los cambios de la cubierta se vuelven oscilatorios, resultando propagación radial de energía.

Ahora considérese un salto de índice de una fibra óptica con perfil de índice mostrado en la curva de la figura siguiente que está siendo doblado a una constante de radio de curvatura. El índice efectivo del modo fundamental es mostrado como la línea punteada.

Heiblum demostró, por medio de una transformada de un sistema coordinado utilizando un mapa conforme, que una fibra doblada con índice de perfil mostrado como en la figura siguiente, curva (a), tiene un comportamiento similar al de la fibra directa con índice de perfil completo mostrado en la figura a continuación, curva (b). La pendiente del perfil lleno es inversamente proporcional al radio de la curvatura.

Figura 25 Índice de refracción de (a) una fibra con salto de índice de doblez con radio de curvatura constante y (b) el equivalente a una fibra directa con índice de perfil completo. La línea punteada es el índice efectivo del modo fundamental.



Para la fibra directa con el índice de perfil lleno a radio mayor q R_c , el índice efectivo es menor que el índice de la cubierta. Por lo tanto, el campo se vuelve oscilatorio en la dirección radial y energía es llevada desde el eje de la fibra, resultando en exceso de pérdida como fugas de energía radiales lejos del eje. La razón de pérdida de energía depende de la fracción del modo de potencia que está en las afueras de la radiación caustica a un radio R_c . La fórmula de pérdida deducida por Marcuse para una rata de pérdida de energía por unidad de longitud de fibra es:

$$2\alpha = \frac{4}{\sqrt{\pi^3}} \frac{1}{\sqrt{\gamma R^3}} \frac{|I_1|^2}{I_2} \left| H_{\beta R} \left(\frac{2\pi n_{\text{clad}}}{\lambda} (R + a) \right) \right|^{-2},$$

donde a es el radio del núcleo, R es el radio de la doblez,

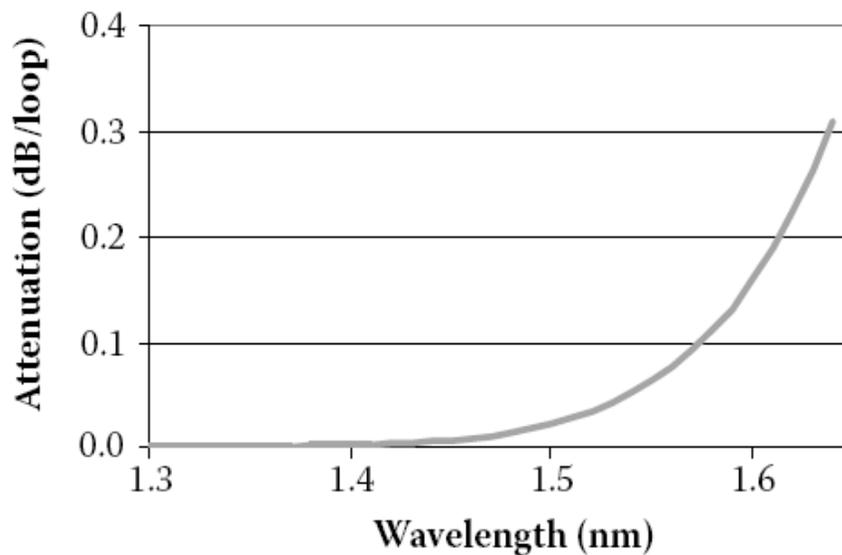
$$I_1 = \int_0^\infty E(z) dz, \quad I_2 = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\infty |E|^2 r dr,$$

$$\gamma = \sqrt{\beta^2 - n_{\text{clad}}^2 k^2}.$$

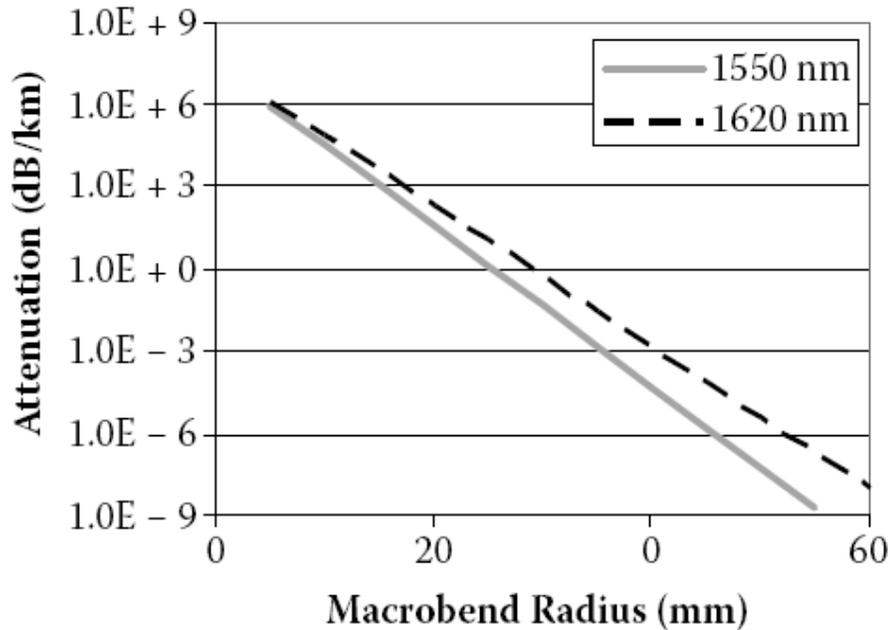
La figura 26 (arriba) muestra la pérdida por macrodoblez predicha sobre la banda de una fibra SSMF típica para un radio de 16 – mm. Dicha pérdida aumenta rápidamente con la longitud de onda. La figura 2. 3 (abajo) muestra la fuerte dependencia de la las pérdidas por macrodoblez de una SSMF típica a medida que el radio de doblez se hace variar.

Figura 26 Pérdida por macrodoblez predicha para una SSMF lo largo de un espectro de canal CWDM

Atenuación a 1550 nm predicha para un diámetro de macrodoblez de 32mm



Atenuación por macrodoblez predicha



2.1.2.2. Pérdidas por microdoblez

Microdoblez son pequeñas deflexiones del eje de la fibra tales como las que serían ocasionadas por presionar una fibra contra una superficie áspera. La teoría del modo acoplado puede ser aplicada al problema de transmisión a través de deflexión de eje simple para deducir una expresión de la pérdida de potencia. Para una fibra monomodo, el problema se torna en expresar el modo fundamental de la fibra sin deflexión (a la entrada de la microdoblez) en términos de la expansión de los modos de la fibra con deflexiones (a la salida de la microdoblez), como es ilustrado en la figura siguiente. El conjunto de modos guiados y modos de radiación de la fibra hacen un conjunto de funciones completo y ortogonal para la expansión.

Los coeficientes de la expansión dan la fuerza de acople entre los modos. El coeficiente fundamental de modo de acople determina la pérdida por microdoblez, debido a q se puede asumir que la energía acoplada en los modos de fuga, radiación o cubierta se pierden. Para un largo de fibra con microdoblez de amplitud aleatoria distribuidos aleatoriamente a lo largo del eje de la fibra, tal como cuando la fibra es presionada contra una superficies áspera, las microdoblez se pueden modelar como una colección de deflexiones individuales cuyas características son descritas por la densidad espectral de potencia de las deflexiones del eje como una función de la posición axial. Marcuse dedujo una poderosa aproximación de pérdida por microdoblez para fibras con salto de índice por medio de un conjunto de modos linealmente polarizados y modos de cubierta como funciones base para expansión de campo y asumiendo que el tamaño de las deflexiones aleatorias del eje son descritas con media cero y una función de distribución Gaussiana. La pérdida por microdoblez de longitud normalizada es:

$$2\alpha = \sqrt{\pi} \sigma^2 L_c \left(\frac{2nka\Delta}{b\omega} \right)^2 \sum_s \exp \left\{ - \left[(\beta_g - \beta_{1s}) \frac{L_c}{2} \right]^2 \right\} \frac{J_1^2(j_{1s}(a/b))}{J_0^2(j_{1s})} \exp \left(-2 \frac{a^2}{b^2} \right),$$

donde L_c es la longitud de correlación de las microdoblez, σ es la raíz media cuadrada (RMS) de la amplitud de las microdoblez, a es el radio del núcleo, b el radio de la cubierta, Δ es el delta del núcleo, ω es el modo de campo del radio, $(\beta_g - \beta_{1s})$ es la diferencia entre el modo fundamental y las constantes de propagación del modo del núcleo, $J_v(x)$ es la función de Bessel de primer orden v , y j_{vs} son las raíces de las funciones de Bessel ($J_v(j_{vs}) = 0$). Debido a que las funciones base en el análisis de modo acoplado usado para deducir la ecuación anterior son el conjunto discreto de los modos del núcleo, la fórmula de pérdida contiene una sumatoria respecto de los modos de la cubierta de orden radial S ,

la cual es computacionalmente simple de implementar. La figura 28 muestra el espectro de pérdida predicho para una SSMF con varios microdobleses de largos de correlación. Para microdobleses de largos de correlación menores que $100\mu\text{m}$, el exceso de pérdida es relativamente amplio y varía lentamente con la longitud de onda. Para la misma magnitud RMS (σ) de microdoble, pero con el tamaño de correlación mayor que $350\mu\text{m}$, el exceso de pérdida es considerablemente menor en magnitud y aumenta rápidamente con la longitud de onda.

Figura 27 Modelo del núcleo de una fibra en la vecindad de una microdoblez. Potencia acarreada en el modo fundamental antes que la microdoblez se acople al modo fundamental y a modos de alta pérdida debido a microdoblez.

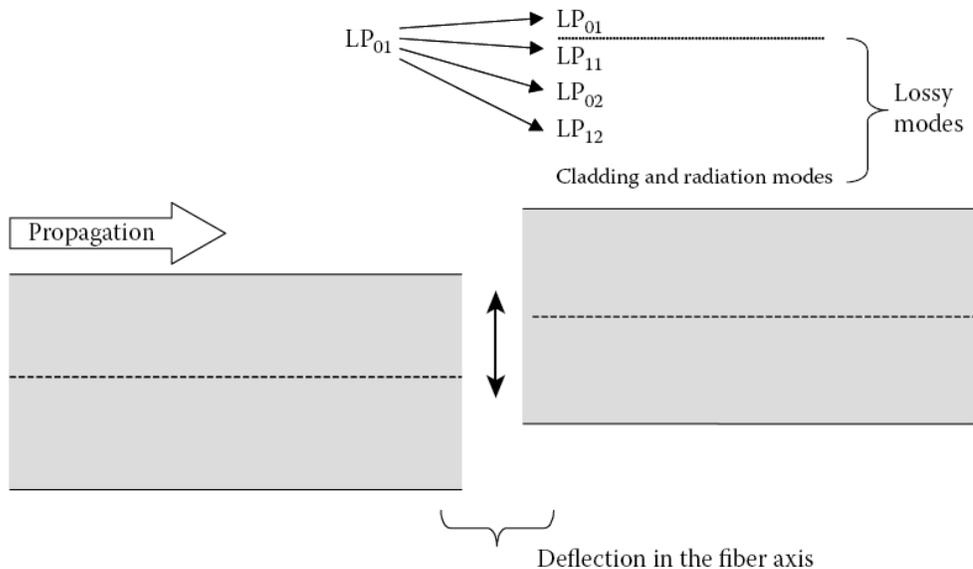
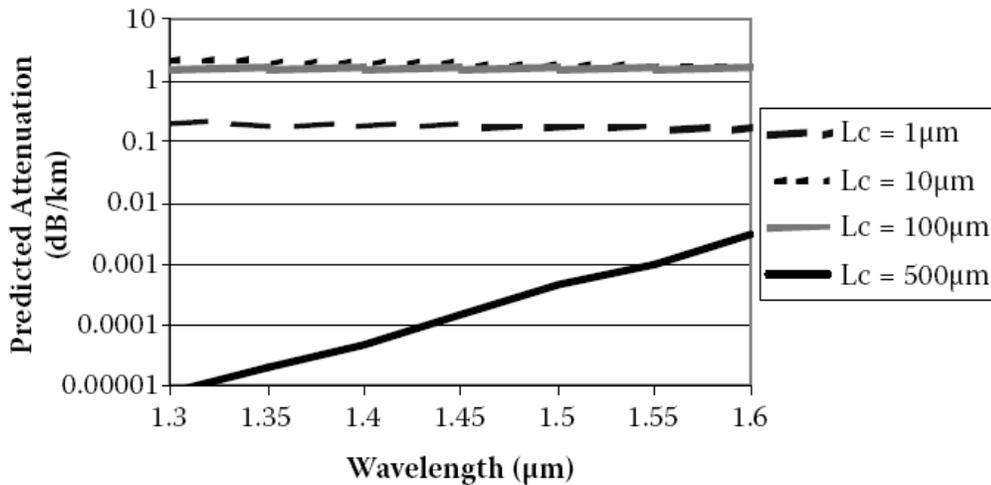


Figura 28 Pérdida por microdoblez predicha como una función de la longitud de onda de acuerdo con el modelo de Marcuse. Las cuatro curvas muestran el cambio en la dependencia de la longitud de onda y el cambio de la magnitud de la atenuación cuando la correlación, L_c , del espectro de potencia de la microdoblez aumenta desde 1 a $500\mu\text{m}$.



Atenuación por macrodoblez predicha

2.1.3. Fibra monomodo estándar (SSMF) (ITU – G. 652)

La fibra monomodo mas ampliamente disponible utilizada en sistemas de telecomunicaciones esta especificada en las recomendación ITU-T G. 652 como se mencionó en el capítulo uno y se le refiere generalmente como SSMF (Por sus siglas en inglés Standard Single Mode Fiber). Esta recomendación es bastante amplia y fibras de diferentes diseños, fabricadas por medio de las principales técnicas de fabricación [Deposición de vapor por fuera (OVD), deposición axial de vapor (VAD), deposición de vapor modificada químicamente (MCVD), y deposición de vapor por plasma químico (PCVD)], entran todas dentro de esta especificación.

La mayoría de SSMF comerciales entra dentro de un rango angosto de índices radiales de perfiles de refracción y se le conoce como fibras de cubierta encajada, debido a que el índice de refracción de la región de la cubierta con baja pérdida adyacente al núcleo encaja con la región en las afueras de la cubierta, resultando en un índice de cubierta aproximadamente constante a lo largo de la región entera de la cubierta. Estas fibras tienen típicamente formas de núcleo de salto de índice, es decir, índice constante de refracción dentro de la región del núcleo con cambio abrupto en el índice de refracción en los límites de la cubierta del núcleo. La tabla II muestra una lista de las propiedades nominales de transmisión de fibras típicas de cubierta encajada.

2.1.3.1. Fibras con bajo pico de agua y cero pico de agua

Como será descrito más adelante, la tecnología de fabricación de fibra óptica ha sido desarrollada para reducir los niveles de contaminación de OH⁻ al punto que el pico de absorción centrado en aproximadamente 1385nm, conocido como el pico de agua, puede ser dramáticamente reducido (fibra LWP) o virtualmente eliminado (fibra ZWP), como se muestra en la figura 24. Los beneficios de las mejoras en la tecnología de fabricación y la reducción de la atenuación asociada se reflejan en la pérdida de los requerimientos contenidos en la especificación de la fibra ITU-T G. 652D. La tabla siguiente compara los requerimientos de pérdida de las varias clasificaciones de fibra cubiertas en la recomendación ITU-T G. 652a-D.

Tabla III Propiedades de cubierta típica encajada y cubierta comprimida, fibra que cumple con la recomendación G. 652B.

Fiber Property	Typical Value for Matched Cladding Fiber	Typical Value for Depressed Cladding Fiber
Mode field diameter at 1310 nm (μm)	9.2	8.8
Nominal zero dispersion wavelength (nm)	1312	1308
Dispersion at 1550 nm (ps/[nm km])	17	17
Cable cut-off wavelength (nm)	<1260	<1260
Relative microbending loss at 1550 nm	1.8	1
Macrobending loss for 32-mm radius bend (1 turn)	<0.1 at 1625 nm	<0.05 at 1625 nm
Polarization mode dispersion (ps/km ^{0.5})	<0.15	<0.15
Macrobending loss for 16-mm radius bend	<0.05 at 1550 nm	<0.05 at 1625 nm

Tabla IV Requerimientos de pérdida de fibra cableada de la recomendación ITU-T G652.

	G.652 A	G.652 B	G.652C/ D	G.652 D	Commercially Available ZWP Fiber
1310-nm attenuation (dB/km)	0.5	0.4	0.4	0.4	<0.34
1385-nm attenuation (dB/km)	n/a	n/a	*	*	<0.31
1550-nm attenuation (dB/km)	0.4	0.35	0.3	0.3	<0.21
1625-nm attenuation (dB/km)	n/a	0.4	n/a	n/a	<0.24

*The sampled attenuation average at 1385 nm shall be less than or equal to the maximum value specified for the range, 1310 to 1625 nm, after hydrogen aging according to IEC 60793-2-50 regarding the B1.3 fiber category.

2.1.3.2. Diseños de fibra de baja pérdida por doblez

Con el enfoque actual de la inversión de telecomunicaciones en las porciones de redes de acceso y metro, existe un interés renovado por los carriers en las fibras con baja sensibilidad a la pérdida por doblez. Los factores primarios que llevan al interés en estas fibras son generalmente relacionados al deseo de extender la fibra en la red a lo largo de las premisas del consumidor y sobre el único requerimiento que este nuevo ambiente de operación lleve la fibra hasta el hogar (FTTH Transmisión por fibra hasta el hogar por sus siglas en inglés). Es deseable que para cables de distribución y de última milla usados en las redes de acceso sean lo más pequeños y más baratos como sea posible. Esto significa generalmente que el cable proveerá menor protección a las fuerzas externas que resultan en macro y microdobles.

Los usuarios finales también desean o requieren que el hardware instalado a sus premisas sea lo discreto y pequeño en tamaño, resultando en fibras que se enrutan en arreglos de diámetros pequeños dentro del hardware. Adicionalmente a esto, para disminuir costos de instalación del cable asociado al hardware, los artesanos con menor entrenamiento y menores habilidades pueden llevar a cabo la instalación.

Por lo tanto, los carriers desean que la fibra sea funcional en caso que un bajo cuidado se ejercite sobre ella durante la instalación de la misma incrementando así los dobles resultantes. Además de los factores descritos previamente, se encuentra el factor que el espectro completo de sistemas CWDM utiliza longitudes de onda al lado largo de longitud de onda de la banda L donde es particularmente un reto diseñar fibras con baja sensibilidad de micro y macrodobles (Ver figura 25). La tabla siguiente resume las propiedades de

las fibras con baja pérdida por dobleces que en la actualidad se encuentran comercialmente disponibles.

Tabla V Desempeño de pérdida por macrodobleces (en dB) de una SSMF (Diámetros de 60, 50 y 15mm para 100 vueltas y 30 32mm para una vuelta).

	Commercial Matched Clad Spec. (MFD = 9.2)	Typical Depressed Clad G.652 (MFD = 8.8)	G.652D Fiber with Enhanced Bending	Non G.652 Compliant Fiber w/MFD = 8.6	Non G.652 Compliant Fiber w/MFD = 6.3
60 mm diameter at 1625 nm	<0.05	<0.05	<0.05	—	—
50 mm diameter at 1550 nm	<0.05	<0.05	<0.05 at 1625	<0.005	—
30 mm diameter at 1550 nm	<0.05	<0.05	—	<0.005	—
32 mm diameter at 1625 nm	—	—	<0.1	—	—
15 mm diameter at 1625 nm	—	—	—	—	<0.5

Note: MFD = mode field diameter (μm)

2.1.4. Fibra de dispersión desplazada no nula NZDSF

Esta fibra fue desarrollada primordialmente para aplicaciones donde los amplificadores de fibra dopados con erbio (EDFA) y tecnologías DWDM fueron implementadas, tales como sistemas de transmisión de larga distancia. Las especificaciones ITU-T G. 655 y la ITU-T G. 656 fueron desarrolladas para cubrir un amplio rango de NZDSF que eran comercialmente disponibles.

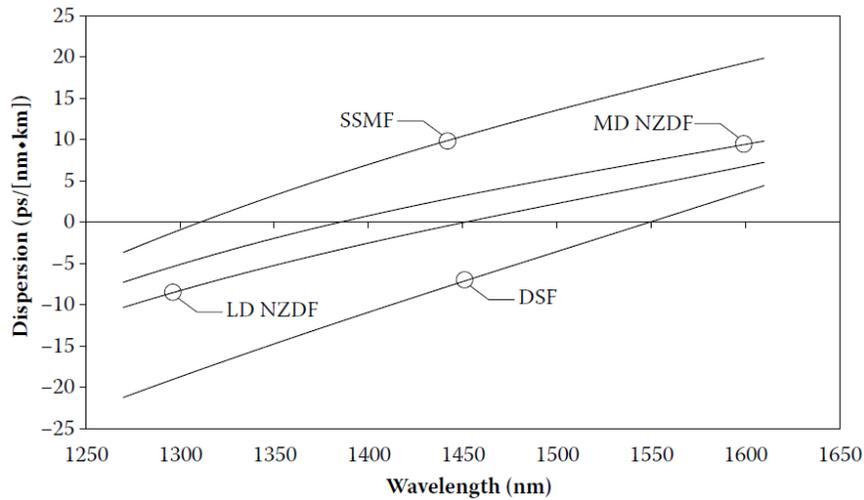
A una longitud de onda de 1550nm, la magnitud de dispersión de NZDSF esta típicamente dentro del rango de 4 a 8 ps/(nm- km), comparado con los aproximadamente 17ps/(nm km) para una SSMF.

Por lo tanto, el sistema de 10-Gb/s alcanza antes de que compensación por dispersión sea necesaria puede ser 2 a 4 veces mayor para transmisiones sobre una NZDSF comparado con SSMF. La extensión de alcance limitada de dispersión de NZDSF, comparado con las SSMF, es atractiva para aplicaciones en redes de anillos metropolitanos DWDM que en la circunferencia de los anillos pueden extenderse a unos cuantos cientos de kilómetros. Debido a que los sistemas CWDM lleguen a ser implementados en redes metropolitanas, es posible que sistemas CWDM operen sobre NZDSF tanto como sobre SSMF.

En la figura siguiente, la dispersión se muestra como una función de la longitud de onda para una fibra típica ITU-T G. 652 y una ITU-T G. 655 NZDSF. Para NZDSF, el perfil del índice de refracción es moldeado de modo que la magnitud de la dispersión total (la suma del material, guía de onda y dispersiones de perfil) en la banda C es (i) lo suficientemente grande para romper la interacción de fase acoplada en los canales DWDM necesarios para los decaimientos no lineales inter-canal, tales como FWM, pero (ii) menores que en una SSMF tales que el total de compensación por dispersión por fibra es reducida o la distancia de transmisión limitada por dispersión descompensada es aumentada.

Para canales poco espaciados de 10-Gb/s en sistemas DWDM, cerca de 2 ps/(nm km) son suficientes para suprimir FWM.

Figura 29 Dispersión versus longitud de onda para fibras de transmisión comunes. SSMF -- ITU-T G. 652; DSF – ITU-T G. 653; LD NZDSF -- ITU-T G. 655; y MD NZDSF -- ITU-T G. 656.



2.1.5. Fibra NZDSF para transporte óptico de banda ancha (ITU-T G. 656)

El reciente interés en tasas de transmisión de 40-Gb/s y amplificación por distribución de Raman han llevado al desarrollo de incluso otro grupo de NZDSF, referidas como MDF (Fibras de dispersión media por sus siglas en inglés). La recomendación ITU-T G. 656 fue desarrollada. Las MDF se planearon primordialmente para ser usadas en sistemas de transmisión de ultra larga distancia. Las MDF tienen típicamente longitud de onda con dispersión cero menor que las ITU-T G. 655 así que existe suficiente dispersión en la región de 1450nm donde láseres de bombeo Raman para la amplificación de la banda C están ubicados de orden tal que se minimice el ruido asociado con FWM por bombeo-bombeo o bombeo-señal.

Adicionalmente, desempeño óptimo a 40-Gb/s generalmente requiere mayores niveles de dispersión de transmisión por fibra para mitigar los efectos no lineales intracanal. Debido a que las MDF son más probables a ser implementadas en redes de ultra larga distancia de 40-Gb/s de capacidad, la probabilidad que transmisión CWDM se lleve a cabo por medio de estas fibras es bastante baja.

3. TRANSCIEVERS PARA CWDM

Con la necesidad de capacidad mayor para sistemas de comunicación óptica, la tecnología WDM fue desarrollada. WDM pone básicamente señales múltiples en una fibra simple, cada una representada por una diferente longitud de onda. Mientras que los sistemas anteriores utilizaban dos o tres longitudes de onda con separación relativamente amplia, se pueden caracterizar dichos sistemas el día de hoy como sistemas WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing), y ellos empleaban primordialmente acopladores de ventana dual FBT (Fused Biconic Taper). Estos dispositivos operaban típicamente en el rango de 810/870/1310nm o 1310/1550nm, con fuentes de luz tales como láseres (FP) Fabry Perot o diodos emisores de luz (LED) operando a esas longitudes de onda. Esos sistemas anteriores eventualmente evolucionaron en los que nosotros hoy en día conocemos como sistemas CWDM y DWDM. Mientras que DWDM es la tecnología opción para aplicaciones de larga y ultra larga distancia (ULH) a lo largo de médulas de red, en aplicaciones CWDM rápidamente lleno el vacío entre sistemas DWDM y WWDM, de manera aun barata y menos compleja que DWDM. Hoy en día CWDM se está volviendo más ampliamente aceptada como una arquitectura importante de transporte, donde hasta 18 longitudes de onda están disponibles para transmitir información sobre un enlace de fibra en redes metro o de acceso.

El enfoque en este capítulo será primordialmente en los láseres, transmisores y transcievers que forman los bloques de construcción de un sistema WDM. Como se muestra en la figura 30(a), un sistema de comunicación simple utiliza un láser de transmisión de información sobre cualquier longitud de onda λ la cual conoce el criterio que se puede detectar por

medio de un receptor apropiadamente diseñado y opera dentro de la región de espectral de baja pérdida de la fibra óptica, puenteando la distancia entre la unidad receptora y la transmisora. Usando el concepto WDM, se obtienen varios cambios con respecto de del enlace de comunicaciones de canal simple previamente mencionado. La figura 30(b) describe una versión extendida del enlace de comunicaciones simple donde se utilizan ahora 4 diferentes longitudes de onda λ_1 , λ_2 , λ_3 , y λ_4 para transmitir información sobre la fibra.

La multiplexion de diferentes longitudes de onda con un par multiplexor (MUX)/demultiplexor(DEMUX) en la figura 30(b) añade complejidad futura al sistema debido a que mayor cantidad de unidades transmisoras y receptoras se necesitan y se requieren para multiplexar de demultiplexar las cuatro longitudes de onda. La ventaja más grande de WDM es el aumento de capacidad obtenido sobre una fibra simple. El enlace en el inciso (b) de la figura siguiente tiene cuatro veces más capacidad que el enlace de referencia asumiendo que la misma rata de transmisión es utilizada para cada enlace. Teniendo suficiente número de puertos en los dispositivos multiplexores, también podremos obtener una mejora de capacidad para canales ya en servicio sin interrupción de tráfico.

Las longitudes de onda existentes no se ven afectadas cuando canales adicionales se añaden a nuevas longitudes de onda. Adicionalmente, los láseres a las diferentes longitudes de onda pueden operar a ratas de transmisión independientes, basándose en la capacidad de demanda tanto como en las propiedades físicas del enlace. Los caminos de mejora para un sistema CDWM y los requerimientos de láser de tal capacidad y sistemas de longitud de onda mejorada complementaran la información mencionada en la sección donde se discuten temas sobre transceivers CWDM.

WDM, o más específicamente, CWDM requiere de control sobre las longitudes de onda utilizadas en el enlace de transmisión. A diferencia de sistemas monocanal con amplia tolerancia a variación de longitud de onda de los láser, la presencia de canales en la vecindad dicta el rango de longitud de onda de cada uno de los láser. Excediendo los límites, puede ocurrir crosstalk hacia los otros canales o exceso de pérdida debido a la presencia de multiplexores selectivos de longitud de onda. El espaciamiento de longitud de onda entre canales en los primeros sistemas DWDM era típicamente 200Ghz, eventualmente reducido a 100 ó 50Ghz.

Espaciamiento aun más angosto se dificulto aun mas por las primeras apariciones de crosstalk lineal y no lineal debido al desempeño de componente y ancho de banda espectral de las fuentes de láser moduladas. Las longitudes de onda para CWDM son definidas acorde al grid de frecuencia/longitud de onda estandarizadas desarrollado por la ITU. Esto, referido comúnmente como el grid ITU, extendido desde 1270 a 1610nm para CWDM con espaciamiento de 20nm entre 18 canales CWDM. Más información sobre los canales CWDM se puede encontrar en el capitulo q.

En la siguiente tabla siguiente se resume la longitud de onda nominal así como el rango de longitud de onda de láser CWDM en condiciones operativas. Los límites máximos y mínimos tomados en cuenta en el paso de banda de multiplexores CWDM, el cambio de temperatura de láser CWDM sin refrigeración de 0. 1nm/°C, y el rango de temperatura de operación de 0 a 70°C. Los láser se deben mantener en el intervalo definido por λ_{max} y λ_{min} a cualquier temperatura. Incluso a temperatura constante, una variación en la longitud de onda operativa del láser es esperada, debido a tolerancias en los parámetros del dispositivo láser encontrados en producción.

Figura 30 Longitud de onda utilizada en un enlace de comunicaciones ópticas. (a) Transmisor de longitud de onda simple; (b) extensión a un transmisor sistema/color WDM.

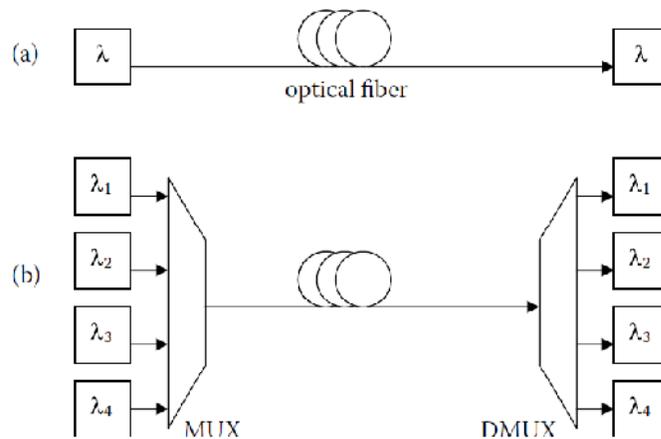


Tabla VI Definición del rango de longitud de onda CWDM permisible bajo condiciones de operación.

Defining the Permissible CWDM Wavelength Range under Operating Conditions

Channel	Center (nm)	Min (nm)	Max (nm)
1	1271	1264.5	1277.5
2	1291	1284.5	1297.5
3	1311	1304.5	1417.5
4	1331	1324.5	1337.5
5	1351	1344.5	1357.5
6	1371	1364.5	1377.5
7	1391	1384.5	1397.5
8	1411	1404.5	1417.5
9	1431	1424.5	1437.5
10	1451	1444.5	1457.5
11	1471	1464.5	1477.5
12	1491	1484.5	1497.5
13	1511	1504.5	1517.5
14	1531	1524.5	1537.5
15	1551	1544.5	1557.5
16	1571	1564.5	1577.5
17	1591	1584.5	1597.5
18	1611	1604.5	1617.5

Láser y receptores combinados como transreceptores son utilizados como soluciones modulares y compactas incorporando ambas funciones de transmisor y receptor en un solo dispositivo al cual nos referiremos de ahora en adelante como “transciever”. El transciever juega un papel crucial en sistemas de transmisión CWDM. El rendimiento de un sistema típico de 16 canales CWDM es principalmente determinado por las propiedades de los láser utilizados. En una sección posterior, hemos listado láseres típicos usados para aplicaciones metro que también consideramos como para CWDM.

Debido a que transmisión óptica de bajo costo es un factor clave detrás de CWDM, esta característica viene con restricciones de precio/desempeño. Típicamente, CWDM utiliza láser directamente modulado (DML), donde no se utiliza modulador externo. Para sistemas de larga distancia, señales directamente moduladas experimentan degradación cuando se propagan por el enlace debido a dispersión cromática causada por el ensanchamiento espectral, un efecto más pronunciado aun en láser modulado directamente.

El desempeño de los tipos de fuentes ópticas se compara más adelante; nuestro enfoque es ahora sobre láser de retroalimentación distribuida, los cuales son ampliamente utilizados para transmisión CWDM. También complementaremos más adelante la discusión de láser/fuente con un vistazo general a los detectores y sus características, yendo de los componentes simples a más altos niveles de integración.

3.1. Fuentes para CWDM

En esta sección se investigará las fuentes de láser para transmisores como uno de los bloques de construcción clave para esas unidades.

Revisando las propiedades de estos dispositivos se produce la comprensión del desempeño de transmisión así como sus limitaciones. Los transmisores utilizan ya sea diodos láser o LED como fuentes; donde los LED son regularmente reservados como fuentes para aplicaciones de corta distancia con un alcance de unos cuantos cientos de metros, láser hacen la mayoría de fuentes utilizadas en el medio y sistemas de largo alcance. Aun entre diferentes tipos de láser disponibles, existen diferencias significativas en desempeño y cuidado que debe tomarse en su selección, dependiendo de la aplicación particular en donde van a utilizarse.

En general, láser FP, láser emisores de superficie vertical (VCSEL) y láser DFB son los primordialmente utilizados en transmisores, con mayor desempeño láser Fiber Grating Láser (FGL) y láser modulados externamente a base de electro absorción (EA-EML) son utilizados frecuentemente. La tabla VII resume los tipos de láser. Los requerimientos para el uso de los láseres en aplicaciones CWDM se basan en el siguiente criterio.

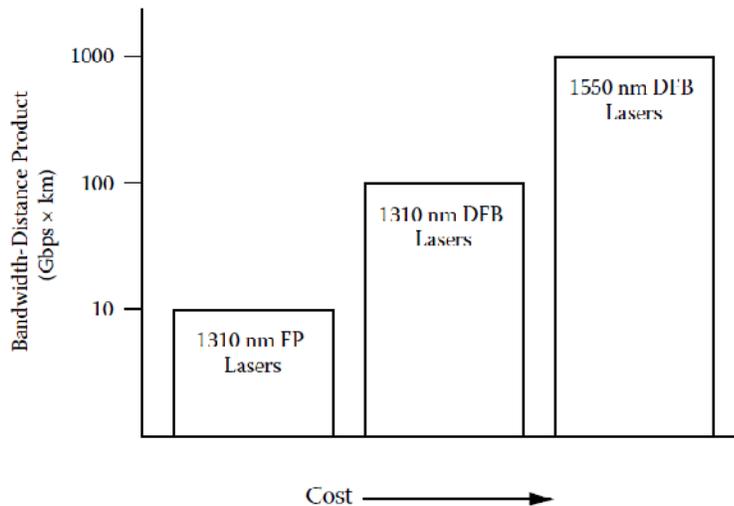
- Los requerimiento de desempeño par láser en CWDM metro y acceso son menos demandantes que aquellos para aplicaciones de larga distancia debido a distancias más cortas de transmisión y menor capacidad de transmisión de tráfico (menores ratas de transmisión y amplio espaciamiento de canal).

- Es requerimiento importante bajo costo con bajo consumo de potencia, huella pequeña, interoperabilidad, diseño simple siendo consideraciones secundarias.
- Láser sin refrigeración pueden reducir costos y ocupación de espacio en el futuro.
- Consecuencias y retos para láser de bajo costo; baja salida de potencia, alto pico de traspico debido a modulación directa, no estabilización de temperatura, integración de paquetes de transceiver necesaria, empaquetado simple con desempeño continuamente limitado de radio frecuencia, acople óptico sin aislador, y control no activo de desempeño de láser.

Tabla VII Vistazo general a las fuentes de luz.

Type	Relative Cost	Output Power (dBm)	Wavelength Range (nm)	Modulation	Application
LED	very low	<0	850	155 Mb/s	LAN
Fabry Perot	low	3	850, 1310	2.5 Gb/s	access
VCSEL	low	0	850, 1310, 1550	up to 10 Gb/s	access
DFB	medium	6	1270–1610	direct: 2.5–10 Gb/s	CWDM, metro
FGL	medium	3	1550	2.5 Gb/s	metro
EA-EML	high	0	1310, 1550–1590	2.5–40 Gb/s	metro regional

Figura 31 Comparación de desempeño y costo de láser FP y DBF.



3.1.1. Tipos de láser y sus propiedades

Existen diferentes medidas para asesorar el desempeño de los diferentes láser usados en la tabla anterior. El *producto distancia de rata de transmisión* toma en cuenta el desempeño de modulación del láser y, en adición, el desempeño de transmisión. En otras palabras, si un láser modulado a 1Gb/s permite transmisión sobre 100km de fibra, sin necesidad de compensar la dispersión cromática por fibra, tiene un producto distancia de rata de transmisión comparable al del DML directamente modulado de 10Gb/s con un máximo alcance de 10km. En la figura anterior, comparamos el producto distancia de rata de transmisión para dos de los tipos más comunes, los láser FP y DFB. Para aplicaciones de bajo costo, láser FP son la mejor opción. Estos tienen un mejor producto distancia de rata de transmisión debido a su amplia anchura espectral, la cual hace estos dispositivos muy sensibles a la dispersión por fibra. Por el otro lado, láser DFB a 1550nm se benefician de la disponibilidad de amplificadores de aumento de distancia de transmisión.

Nos enfocamos en las fuentes de láser de la tabla anterior y discutiremos sus propiedades a continuación. Los láser se presentan en orden del más bajo al más alto costo de dispositivo.

3.1.1.1. Láser Fabry Perot

Los láseres FP (Fabry Perot) se basan en material GaAs y son unos de los láseres más simples para sistemas de comunicación óptica. Dentro de la banda de ganancia, varios modos longitudinales experimentan condición de acción láser simultáneamente de modo que la anchura espectral resultante es típicamente de 2 ó 3nm. Comúnmente, un umbral de 10mA de corriente para la acción láser se esperan con 5 a 10mW de máxima salida de potencia. Para incrementar corrientes, el número de modos también aumenta, resultando en un espectro ensanchado. Debido a diseño simple, sin un aislador óptico a la salida, los láseres FP son menos sensibles a las reflexiones.

Láser sin estabilización de temperatura experimentan una deriva de longitud de onda con la temperatura. La longitud de onda centro cambia por 0.4nm en dirección a longitudes de onda más largas cuando la temperatura de operación aumenta 1°C. La aplicación de láser FP a CWDM es regularmente limitada debido a la amplia anchura de línea y por lo tanto alta sensibilidad a dispersión cromática, acoplada a dependencia de temperatura de longitud de onda. Prácticamente, las fuentes FP encuentran su camino a través de enlaces de longitud de onda simple en aplicaciones de corto alcance; el período exacto depende del ancho de banda del enlace. Para tolerancia de dispersión baja se confina la operación cerca del mínimo de dispersión de la fibra óptica, por ejemplo, 1310nm para fibras SSMF.

Por este motivo, los láseres pueden ser útiles para la interfaz de un cliente de un sistema CWDM o de cualquier otra forma de interconexión de datos de bajo costo.

Dispositivos futuros con menor manejo de voltaje y un umbral de efecto láser podrían permitir controles electrónicos simplificados y diseños a una anchura espectral reducida menor que 2nm podrían también superar la severa limitación de dispersión de los dispositivos actuales.

3.1.1.2. Láser emisor de superficie de cavidad vertical (VCSEL)

El láser emisor de superficie de cavidad vertical es un dispositivo de acción láser donde la luz emitida perpendicularmente a la estructura de capa. Manufactura de epítaxis de una etapa de los VCSEL permite ventajas de costo para estos dispositivos. En contraste con los FP, la corta cavidad soporta únicamente acción láser de modo simple. Los láseres tienen un bajo umbral menor a 1mA y están disponibles para modulación directa a tasas de bit desde 55Mb/s hasta 2.5Gb/s. Experimentos a 10Gb/s han sido llevados a cabo donde las señales han sido transmitidas sobre fibras SSMF a 1550nm utilizando un VCSEL basado en InP. Sin control de temperatura, el VCSEL se ha mostrado operativo hasta 90°C, haciéndolo apropiado como una fuente de bajo costo con una muy pequeña huella. A pesar del reciente progreso, los VCSEL en sistemas CWDM en espectro completo aun representan un reto debido a que los láser que están disponibles son cercanos a 850, 1310 y 1550nm. Los dispositivos no tienen color de longitud de onda con una amplia especificación de la misma.

Esto acoplado con una deriva de longitud de onda de $0.1 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ pueden llegar a hacer el traslape espectral con multiplexores de paso de banda CWDM un inconveniente.

Otro reto es la relativa baja potencia de un VCSEL, típicamente menor que 0dBm.

Aparte de los transcievers actuales de corto alcance para aplicaciones LAN/SAN/datacom a 850nm, los VCSEL ofrecen una opción de reemplazo para los láser FP existentes con costo comparable pero mejor desempeño. Pueden ser utilizados en donde potencia baja es aceptable. Futuros desarrollos pueden enfocarse en el inconveniente de potencia o sintonía para cubrir un ancho espectral más amplio, de esta manera adaptándolo cerca de los requerimientos necesarios para fuentes CWDM.

3.1.1.3. Láser de realimentación distribuida

Estos láseres son el caballo de trabajo en sistemas WDM, ambos dispositivos con refrigeración y sin refrigeración. Son utilizados para todas las aplicaciones desde metro hasta larga distancia. Este tipo de láser está basado en una estructura Pozo de Cuanto Múltiple a medida que la ganancia media con estructura de rejilla como un elemento selectivo de longitud de onda para filtrar con fineza un modo simple longitudinal al cual el dispositivo está emitiendo señal. Debido a una estructura más compleja, el láser DFB es más caro que un láser FP o un VCSEL. En el caso de desempeño, el láser es externamente modulado con un modulador separado, técnica altamente utilizada para aplicaciones ULH (ultra larga distancia).

En metro o sistemas CWDM donde la distancia es más corta, la técnica de modulación directa es empleada donde la señal de datos modula la potencia de óptica de salida vía la corriente de operación. La ventaja clara está en la simplicidad debido a que no se requiere modulador adicional a la salida del láser. Este aspecto es particularmente importante donde no hay amplificador disponible y el presupuesto de enlace es solamente determinado por la potencia óptica del láser y la sensibilidad del receptor.

Los láser DFB son comúnmente usados para longitudes de onda comprendidos en la banda C (1530 hasta 1565nm) y también cerca de 1310nm para sistemas Legacy. Su aplicación es constantemente extendida hasta la banda L y, en algunos casos, algunas otras longitudes de onda desde 1310 hasta 1610nm. Los datos característicos se resumen en la tabla siguiente. Los láser DFB son los láser opción para la mayoría de aplicaciones CWDM y también son utilizados en ejemplos presentados en capítulos más adelante.

Tabla VIII Datos de los dispositivos láser DFB.

Parameter	Typical Value
Wavelength	1300–1600 nm
Output power	up to 40 mW
Linewidth (CW)	<10 MHz
Threshold	10–20 mA
Sidemode suppression ratio	better than 30 dB
Temperature drift	0.1 nm/°C
Package	TO can, butterfly, mini-DIL
Modulation	2.5–10 Gb/s, 40 Gb/s possible
RF driving voltage	2–3 V
Dispersion tolerance	2000–3000 ps/nm at 2.5 Gb/s 150–200 ps/nm at 10 Gb/s
Coupling	connectorized or pigtailed, either with optical isolator

3.1.1.4. Láser de rejilla de fibra (Fiber Grating Láser)

El uso de láser DFB directamente modulado en sistemas CWDM está restringido por la baja tolerancia dispersión causada por chirrido de láser.

Otros tipos de láser directamente modulados pueden superar estas limitantes, tales como FBGL(Fiber Bragg Grating Láser).

Estos láser son construidos por medio de anti reflexión que cubre las facetas de fibra con terminación de cola de cerdo de un láser FP y formando una cavidad externa escribiendo una rejilla tipo Bragg en la terminación cola de cerdo del láser. Mientras que los láser FP tienen más amplio ancho de banda, debido a condición de acción láser para varios modos, la cavidad externa del FBGL actúa como elemento selectivo de longitud de onda.

A diferencia de los DFB, esta rejilla está separada del chip láser en cuestión. Los láseres demuestran su ventaja bajo modulación. El láser es directamente modulado por medio de la corriente de manejo donde la máxima rata de bit alcanzable es determinada por el tiempo de recorrido completo de la cavidad externa. Las propiedades importantes de estos dispositivos se resumen a continuación:

- La longitud de onda del láser es determinada por la rejilla de cavidad externa sola
- Ancho de línea menor que 1nm bajo modulación, bajo chirrido de láser
- Únicamente cambios de temperatura de 0.01nm/°C en operación si refrigeración

- Comercialmente disponibles hasta 2. 5Gb/s, muestras en laboratorios hasta 10Gb/s

Particularmente, la baja deriva de longitud de onda puede ser de ventaja para ser utilizada por estas fuentes para aplicaciones relacionadas a CWDM. Debido a que la deriva es pequeña en un orden o magnitud comparada para láser DFB, el espaciamiento de canales puede ser reducido acorde a esto. De cualquier manera, la operación de los FBGL sin control de temperatura es prevenida por medio de modo de salto durante operación.

3.1.1.5. Láser externamente modulados

Existen dos diferentes maneras para enviar datos sobre el carrier óptico. Los láser en discusión anteriormente son directamente modulados con la ventaja de su simplicidad, bajo costo, y potencialmente más alta salida de potencia.

De cualquier manera, muchos láseres tales como los DFB pueden también operar en modo de continuidad de onda y los datos serían codificados con un dispositivo aparte, un modulador externo ya sea basado en modulador de efecto de electro absorción o con modulador Mach Zehnder. Nos estamos enfocando en los DFB modulados por efecto de absorción donde un modulador y un láser DFB son integrados a un mismo dispositivo. Aunque hablando estrictamente que dos componentes son utilizados, aun los clasificamos aquí como uno solo, el EML (láser externamente modulado por sus siglas en inglés).

A diferencia del DML (láser modulado directamente), el EA-EML (láser modulado externamente con efecto de absorción) permite el control independiente del láser y modulación de datos. Como resultado, esta fuente generalmente logra mejor desempeño de transmisión que un DML a la misma tasa de bit. Por lo tanto el EA-EML puede ser considerado en algunos casos para mejorar sistemas de transmisión CWDM a longitudes de onda donde mejor desempeño de transmisión, es decir, alta tolerancia a dispersión por fibra es requerida. Este es generalmente el caso a longitudes de onda de las bandas C y L donde dispersión acumulada es mayor y también estos dispositivos son comercialmente disponibles.

A continuación se resume las propiedades de los EA-EML:

- Combinación de DFB seguida de un modulador EA
- Desempeño de transmisión principalmente determinado por un modulador EA
- Chirrido de láser controlado por el modulador de voltaje de polarización y por lo tanto puede ser ajustado para optimizar la transmisión.
- Mejor tolerancia a dispersión que los DML y por lo tanto mejor desempeño para un apremio de costo menor
- EML disponibles a 1310nm y para bandas C y L
- Datos de dispositivo: 10Gb/s con 10 a 80km de alcance sobre SSMF

Potencia de salida modulada a 0dBm, para potencia de salida incrementada ya sea por mayor potencia DFB o post amplificación SOA/LOA integrada

3.2. Detectores para CWDM

La función básica del receptor óptico es detectar luz y convertirla en señales eléctricas utilizables. Foto diodos P-intrínseco-N (PIN) y fotodiodos avalancha (APD) son los dos comúnmente utilizados en detectores ópticos de sistemas de comunicación óptica (Revisar tabla siguiente para comparación de propiedades de detectores).

Foto detectores pueden ser considerados fuentes de corriente que cuando modelan el comportamiento de los dispositivos, con foto detectores PIN teniendo una relación lineal entre el monto de luz de entrada y la corriente de salida. Este parámetro es definido como responsividad.

Los APD por el otro lado son ligeramente diferentes in que ellos tienen relación no lineal entre la entrada de luz y la corriente de salida.

La implicación es que los receptores APD tienen mayor sensibilidad que un receptor PIN in enlaces de telecomunicaciones de alta tasa de bit. Ambos tipos de receptores basados en detector pueden ser encontrados en transcievers ópticos. Se hará enfoque únicamente sobre los aspectos que son relevantes para sistemas CWDM.

Tabla IX Comparación entre los dos tipos principales de detectores.

Comparing the Two Principal Types of Detectors

	Sensitivity	Speed	Cost
PIN	+	++	\$
APD	++	+	\$\$

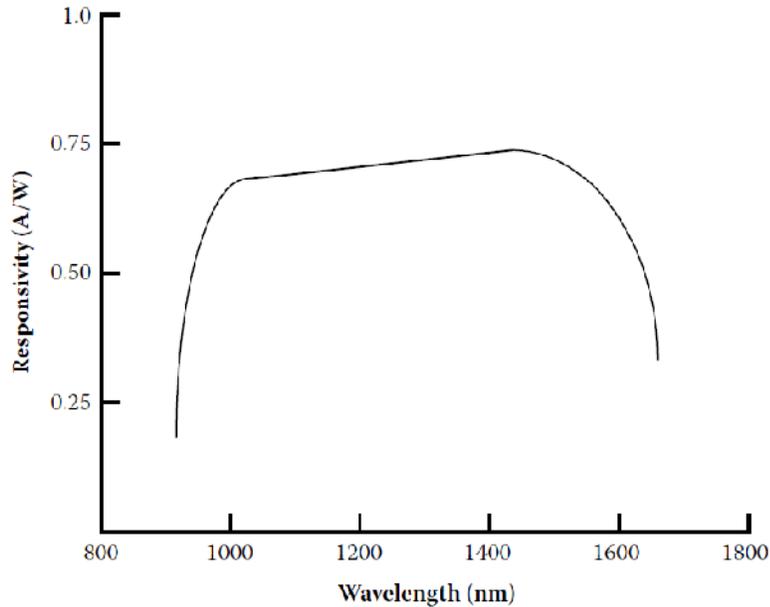
Note: + and ++ = better performance \$ and \$\$ = higher cost.

3.2.1. Diodos PIN

Un diodo PIN es un dispositivo semiconductor normalmente fabricado a través de un proceso de epitaxial de dos pasos MOVPE/MBE donde para operación, un campo eléctrico es aplicado a la estructura dopada pn con corriente de polarización inversa para actuar como capacitor. La luz incidente es absorbida y genera portadoras proporcionales a la intensidad.

Los dos parámetros importantes que caracterizan el desempeño de un diodo PIN son la responsividad y la capacitancia. La responsividad describe la eficiencia de conversión del diodo, es decir, la cantidad fotocurrente producido como una función de potencia óptica incidente. Este valor puede estar en el orden de 0.5 a 0.9 A/W, amperios por watt. La figura siguiente muestra responsividad típica a lo largo del ancho de banda de la fibra.

Figura 32 Responsividad de un diodo PIN fotodetector de InGaAs/InP.



Los fotodetectores InGaAs/InP que son más comúnmente utilizados en sistemas CWDM tienen una respuesta de ancho espectral de 900 a 1650nm. La habilidad de los receptores ópticos de tener desempeño similar sobre un amplio rango de longitudes de onda de entrada permite a los diseñadores de sistemas utilizar cualquier receptor con cualquier transmisor con longitudes de onda en la banda CWDM.

La capacitancia influye en la tasa de bit a la cual el diodo PIN es capaz de operar. Mientras más grande es el área activa, mayor es la capacitancia; con capacitancia grande se tiene una baja tasa de bit en operación.

Los diodos PIN han demostrado tasas de bit de hasta 100Gb/s, pero también están disponibles también a otras velocidades más bajas. Los diodos PIN son típicamente integrados con amplificadores de transimpedancia (TIA) y son utilizados en diseños de receptores compactos.

3.2.2. Diodo de foto avalancha APD

Los APD utilizan el efecto avalancha dentro de un campo eléctrico grande donde la luz incidente genera portadores libres, la cuales generan más portadores dentro del campo eléctrico, resultando por lo tanto en una mayor sensibilidad que la de los diodos PIN. Los APD son una opción ideal para CWDM no amplificado debido a su alta sensibilidad y por lo tanto el presupuesto de enlace aumentado.

La máxima rata de bit comercialmente disponible para APD es de 10Gb/s y, aunque menor que para diodos PIN, suficiente para todas las aplicaciones CWDM. Algunos inconvenientes en la práctica son la baja potencia de entrada óptica cercana a los 0dBm y la relativa alta corriente de polarización inversa de voltaje DC de aproximadamente 20 a 100V necesaria para operar el APD.

3.3. Transmisores y receptores

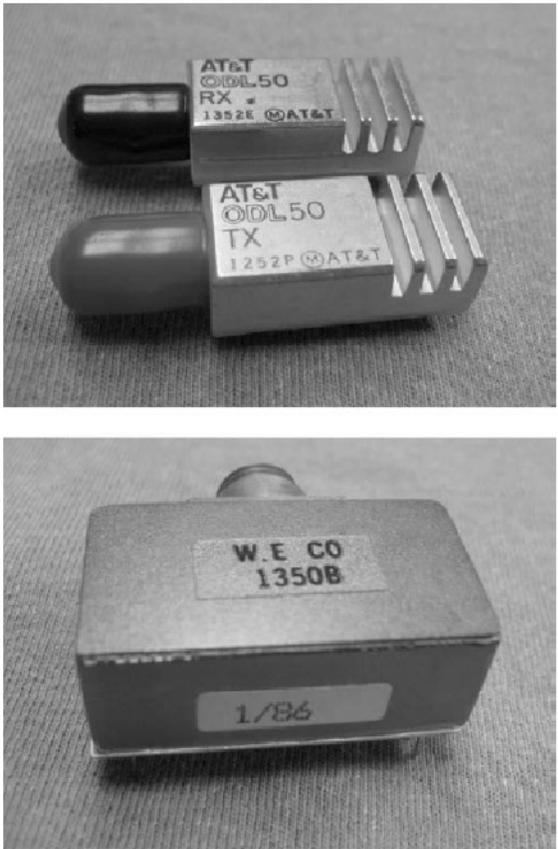
Se han presentado diferentes tipos de láser y detectores y también se ha discutido su desempeño relevante para aplicaciones CWDM. A continuación se hace referencia a aquellos dispositivos de mayor complejidad e integración y se hará enfoque en la aplicación de estos dispositivos en transmisores y receptores.

Se investiga el uso de transmisores y receptores en sistemas CWDM y se revisa su desempeño, particularmente los retos bajo su operación no refrigerada. Combinando un transmisor y un receptor dentro del mismo dispositivo llegamos a definir el concepto de transceiver.

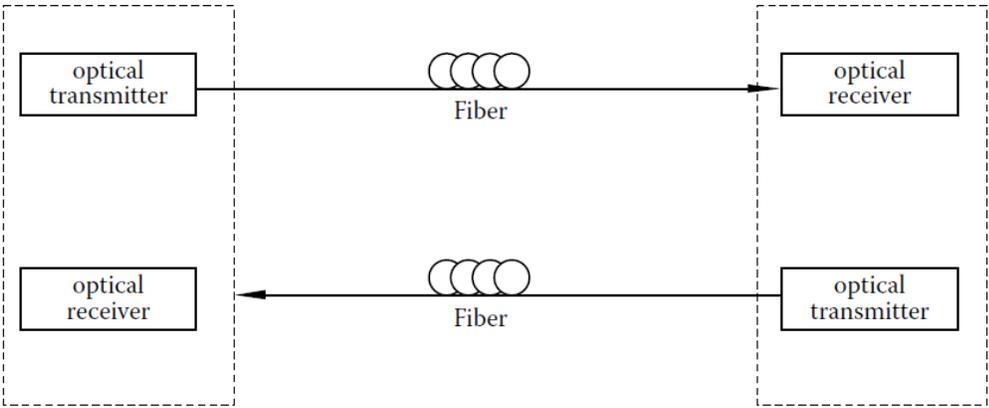
3.3.1. Evolución del transceiver óptico

El transceiver, una combinación de un transmisor y un receptor en un mismo dispositivo, es una de los bloques clave en sistemas de transmisión óptica. Históricamente, los transceivers ópticos aparecieron de una línea de tarjetas de sistemas donde las fuentes y detectores eran combinados con la electrónica apropiada para el envío de señales dentro de fibra en el caso de un transmisor, y detectar procesar señales después de transmisión sobre fibra en el caso del detector. Un ejemplo para los primeros transmisores y detectores es mostrado en la figura siguiente.

Figura 33 (a) Primeros transmisores y receptores. (b) Principio de un enlace bidireccional básico utilizando dos fibras separadas y pares transmisor receptor.



(a)



(b)

La presencia de un transmisor un receptor en pares facilita el diseño de enlaces de fibra bidireccionales. En su caso más sencillo, la transmisión bidireccional es lograda con dos fibras separadas; cada fibra lleva una señal en una dirección. En este caso, las dos direcciones son totalmente independientes y debido a la ausencia de crosstalk, la ubicación de longitud de onda para las dos direcciones puede ser llevada a cabo por separado. El concepto de transmisión bidireccional también funciona para una sola fibra.

Aquí, el crosstalk entre canales puede ser minimizado para operar el enlace bidireccional a diferentes longitudes de onda. El inciso (b) de la figura siguiente muestra un sistema básico de transmisión por fibra óptica basado en pares de transmisor y receptor.

El sistema en la figura anterior consiste de un transmisor, fibra óptica, y un receptor. Con el objetivo de lograr transmisión dúplex, se tiene que tener un transmisor y un receptor en cada extremo; por lo tanto habilitando la data para ser enviada entre ubicaciones. Las primeras implementaciones de transmisores y receptores fueron realizadas sobre placas de circuito. Estos dispositivos fueron construidos con componentes discretos y puestos sobre placas de circuitos junto con otra circuitería para procesar señales, proveer potencia, etc.

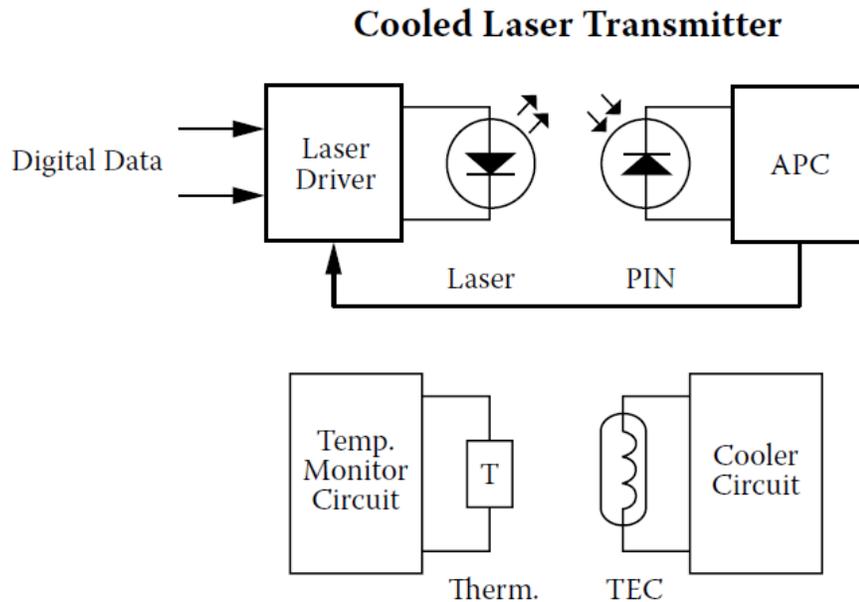
A medida que el volumen y velocidad de transmisión aumentaba, hubo un incentivo a integrar la funcionalidad de los transmisores y receptores sobre el mismo módulo. Los bloques básicos de construcción para un transmisor óptico son la fuente y el circuito manejador para modulación. El receptor digital consiste de un detector, amplificador y comparador.

3.3.2. Transmisores láser

El tipo de láser de transmisión digital más común consiste de circuitería de manejo para modular el láser, un monitor de fotodiodo y circuitería control de poder automático (APC), para proveer retroalimentación a la circuitería de manejo con el propósito de ajustar modulación y corriente de umbral. En transmisores DWDM, a diferencia de CWDM, la longitud de onda láser necesita ser precisamente controlada con el objeto de hacer más angosto el espaciamiento entre canales y también hacer mas angostas las bandas de paso de los filtros utilizados en multiplexores y demultiplexores de los enlaces de transmisión.

Es necesario el control de temperatura porque la longitud de onda del comúnmente utilizado láser DFB cambia con la temperatura aproximadamente a razón de $0.1 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, con el cambio yendo a las longitudes de onda más largas a medida que la temperatura aumenta y baja cuando esta disminuye. Por lo tanto, transmisores láser DWDM necesitan tener no solo la circuitería APC encontrada en diseños descompensados, sin también monitoreo de temperatura y capacidad de ajuste. Esto añade un control de loop separado del transmisor, como se ve en la figura siguiente.

Figura 34 Transmisor láser utilizando circuito de control de temperatura para estabilización de longitud de onda.



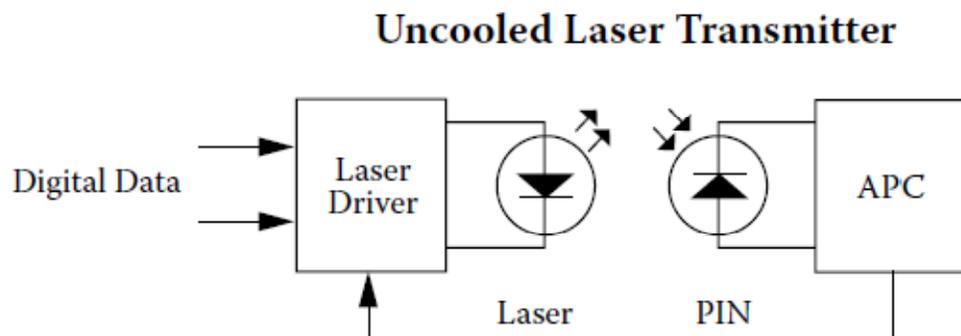
La temperatura es monitoreada y ajustada, típicamente utilizando un termistor en combinación con un enfriador Peltier (enfriador termoeléctrico TEC). La circuitería de compensación de temperatura tiene un valor inicial que es ajustado a modo que la longitud de onda reside en el centro del pasabanda óptico. A medida que el láser cambia, la temperatura fluctúa debido a condiciones de variación en el ambiente, el termistor detecta la temperatura cambiante con respecto del punto inicial y corriente es enviada al TEC que acorde a la polaridad actual puede ya sea calentar o enfriar el láser para alcanzar la longitud de onda deseada.

En algunos casos, donde las longitudes de onda requieren de control más estricto, fijadores de longitud de onda son añadidos.

3.3.3. Transmisores sin enfriamiento para CWDM

La principal diferencia entre sistemas DWDM y CWDM con respecto a la electro-óptica es el uso de láser DFB con enfriamiento como fuentes en sistemas DWDM. Y el uso de láser DFB sin enfriamiento como fuentes en sistemas. Como resultado, el transmisor CWDM es simplificado, como se muestra a continuación.

Figura 35 Transmisor sin control de temperatura comúnmente utilizado para CWDM.



DML sin enfriamiento son comúnmente utilizados en enlaces de transmisión CWDM. Las principales ventajas de estos dispositivos asociadas con operación sin enfriamientos son las siguientes:

- No se requiere integración de TEC ni enfriamiento
- Menos complejidad para controlar la electrónica
- Consumo de potencia reducido, solamente corriente de diodo láser requerida
- Huella más pequeña
- Menor costo de dispositivo

De la misma manera, existen los siguientes retos:

- Modulación directa de transmisores simples resulta en anchura de línea más amplia.
- Deriva de longitud de onda láser necesita ser acomodada
- Variación de potencia de salida inducida por temperatura necesita ser pequeña

3.3.3.1. Deriva de longitud de onda

La figura siguiente muestra la deriva de longitud de onda de un láser DFB sin enfriamiento de frecuencia simple dentro del paso de banda de un filtro multiplexor estándar de 13nm de ancho. Típicamente, la temperatura de operación puede variar desde 0° hasta 70°C, de esta manera resultando en una variación de longitud de onda de hasta 7nm. Por lo tanto, es crucial que los diseños de sistemas CWDM acomoden el cambio de longitud de onda sin ninguna pérdida en el desempeño. Como consecuencia, los filtros deben ser lo suficientemente amplios, con un paso de banda plano a lo largo de él.

Como se muestra en la tabla I del capítulo uno, las longitudes de onda centro de filtros CWDM especificadas por la IYU son posicionadas a 1511, 1531, 1551, 1571nm, etc. La razón por la cual los filtros son desplazados por 1nm es para acomodar el aumento de temperatura típica asociado a disipación de potencia de circuitos electrónicos, aproximadamente 10°C. Este es un número típico, la variación entre la temperatura ambiente externa y la temperatura ambiente dentro del encapsulado puede ser grande o pequeña,

dependiendo del diseño y condiciones de operación. La figura 36 resume la relación entre el centro del pasabanda y los lados del filtro.

Figura 36 Deriva de longitud de onda de un láser CWDM con enfriamiento dentro del pasabanda CWDM de 1550nm, la longitud de onda actual es una función de la temperatura.

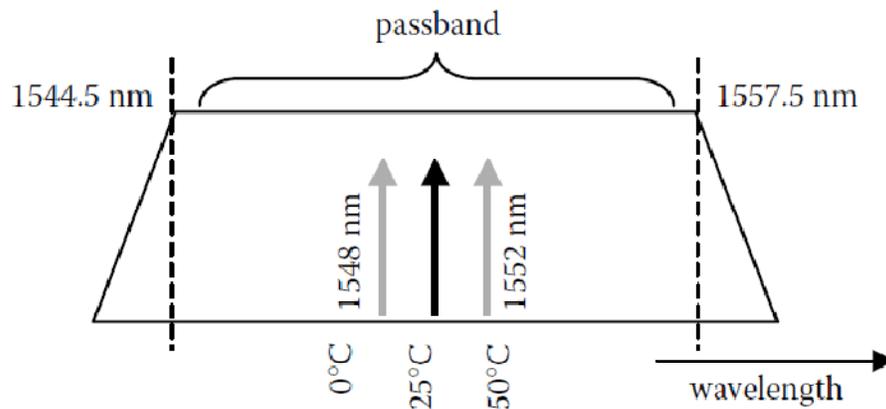
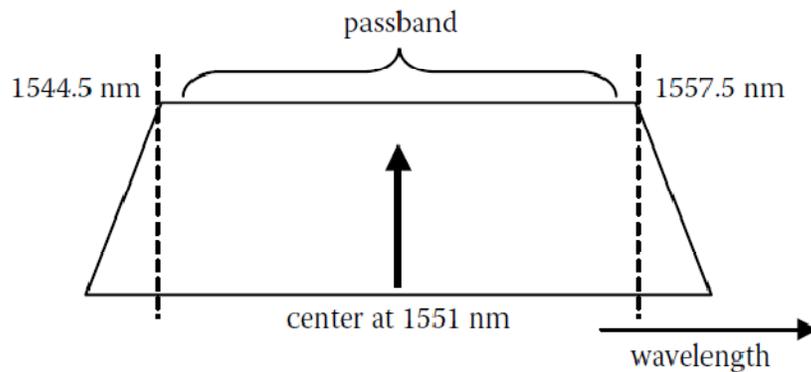
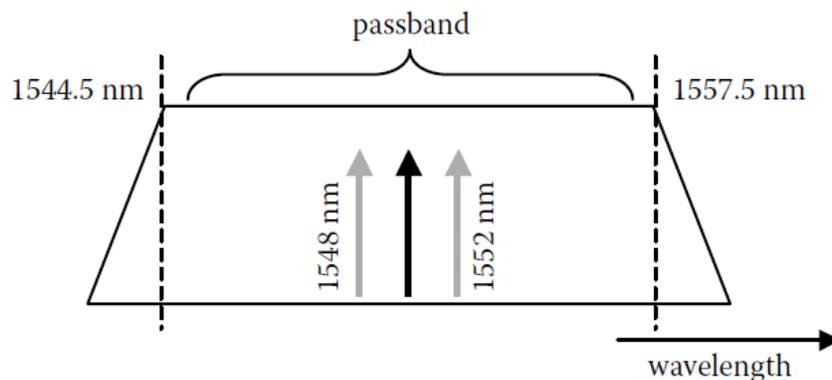


Figura 37 Definición de un centro de pasabanda CWDM para láser sin enfriamiento, mostrado para canal a 1550nm.



Las longitudes de onda nominales son medidas a 25°C. Las distribuciones de longitudes de onda alrededor del valor nominal del DFB son típicamente ± 2 o ± 3 nm, dependiendo del intercambio costo desempeño. La razón para esta distribución de longitud de onda es debida a variaciones de producción. Si fuésemos a buscar el valor máximo y mínimo de las longitudes de onda láser debido a variaciones de producción, la deriva dentro del pasabanda se vería como lo muestra la figura siguiente.

Figura 38 Distribución estática de longitudes de onda láser alrededor de 1550nm a temperatura de cuarto. Longitud de onda láser nominal a $T = 25^\circ\text{C}$; líneas grises: cantidad de la producción, ± 2 nm, también a $T = 25^\circ\text{C}$.



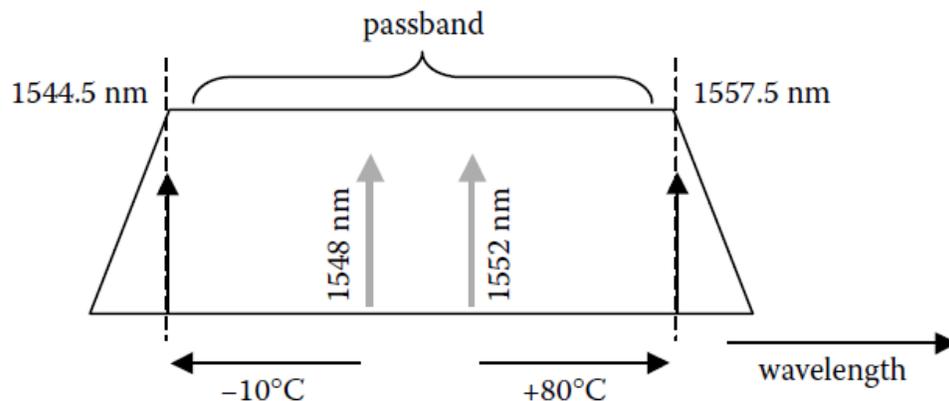
Para especificar correctamente el desempeño sobre la temperatura, se necesita tener en cuenta las variaciones de temperatura y variaciones de producción. El rango de temperatura puede ser especificado buscando la deriva máxima y mínima de longitud de onda permitida que mantiene a la longitud de onda en el pasabanda del filtro (Figura siguiente).

La suposición base es que las longitudes de onda son confinadas en el filtro del pasa banda. Las influencias combinadas de las distribuciones de longitudes de onda láser y desempeño térmico dan el rango de temperatura de

operación para el transmisor láser. Con un filtro pasabanda óptico de 13nm, este rango es desde -10 a 80°C. Con longitudes de onda láser más estrictamente controladas y/o filtros pasabanda más amplios, el rango de temperatura de operación puede ser aumentado.

Una especificación de láser a ± 1 nm alrededor de longitud de onda nominal daría un rango de temperatura de operación de -20 a +90°C. Adicionalmente, se puede ampliar el pasabanda desde 13 hasta 14nm y ganar un adicional de 10° de temperatura de operación.

Figura 39 Variaciones de temperatura y cantidad de producción con láser distribuidos alrededor del centro del pasabanda.



Con objeto de lograr temperatura de operación industrial de -40 a +85°C, calentamiento puede ser empleado como forma de subir la temperatura de operación del láser y así mantener la longitud de onda de operación en el filtro pasabanda.

3.3.3.2. Variación de potencia

La segunda mayor consecuencia de operación sin enfriamiento es la variación de la potencia de salida del láser. No solo hace que el umbral de efecto láser se mueva a altas corrientes con aumento de temperatura sino también la pendiente de eficiencia del láser disminuye. Para lograr la misma salida de potencia y desempeño de longitud de onda obtenido a temperatura de cuarto, la corriente de polarización y corriente de modulación necesitan ser mayores a altas temperaturas para compensar el cambio en la corriente de umbral y eficiencia de cuánto. A cierto nivel, esto se puede lograr con un simple control de corriente, donde la salida de potencia del láser es monitoreada con un fotodiodo y la corriente de manejo es ajustada acorde a lo anterior.

A medida que la corriente es aumentada, un calentamiento efectuado por si mismo ocurre donde la disipación de calor del láser aumenta posteriormente el exceso de temperatura y por lo tanto una corriente aun mayor es necesaria. Aun cuando un enfriador no activo sin asistencia de TEC es utilizado, un disipador de calor pasivo conectado al diodo láser puede dar ahora alguna mejora. Mientras la deriva de longitud de onda del láser pueda mover la señal de salida del pasabanda del filtro pasivo, la caída de potencia a altas temperaturas de operación deteriorará el presupuesto del enlace; debido al decremento de potencia transmitida.

Normalmente, ambos efectos ocurren simultáneamente. Cuando la temperatura aumenta, la potencia del láser disminuye y, al mismo tiempo, la deriva de longitud de onda en dirección de longitudes de onda largas, mostrando un cambio rojo. Un diseño CWDM apropiado necesita tomar en cuenta estos dos efectos.

3.3.4. Receptores ópticos

Los receptores ópticos base consisten de dos unidades: detección y amplificación. Los bloques básicos de funcionamiento de un receptor son mostrados en la figura 40 donde el fotodetector como el frente óptico convierte la luz entrante en señales eléctricas de datos. Dependiendo del tipo de detector, se pueden clasificar en dos tipos de receptores: ya sea receptores a base de diodos PIN o a base de APD.

Lo siguiente la parte de detección, la parte de amplificación del receptor es diseñada para restaurar los datos originales, constantemente junto a señal de reloj obtenida de los datos. Los receptores que se consideran usan detección directa y están operando con formato de modulación NRZ.

Las ventajas de la integración del receptor desde un punto de vista técnico son más prevalentes en la integración del fotodetector con TIA, PIN-TIA o APD-TIA. Receptores empleando el detector/amplificador integrado tiene mejor sensibilidad debido a que presentan mejora de inmunidad al ruido y menor impedancia de conexión entre dos dispositivos. En sistemas digitales, el siguiente paso en la evolución sería un receptor completamente integrado con el detector y TIA combinados con tecnología de digitalización, que proveerían los niveles lógicos de señal. A esta construcción constantemente se le refiere como un receptor tipo 2R, donde la señal óptica es convertida a corriente por medio del fotodetector y entonces a voltaje con el TIA.

Las señales eléctricas pueden entonces ser amplificadas o puestas directamente en un circuito comparador, donde son cuantizadas en niveles lógicos "1" ó "0".

En algunos casos, la integración va un paso adelante y también la señal recibida R veces por recuperación del reloj, esto es llamado un receptor 3R. Con la tendencia de corriente en dirección de estandarización de protocolos de transporte óptico, el receptor óptico puede ser diseñado para cumplir con los requerimientos específicos.

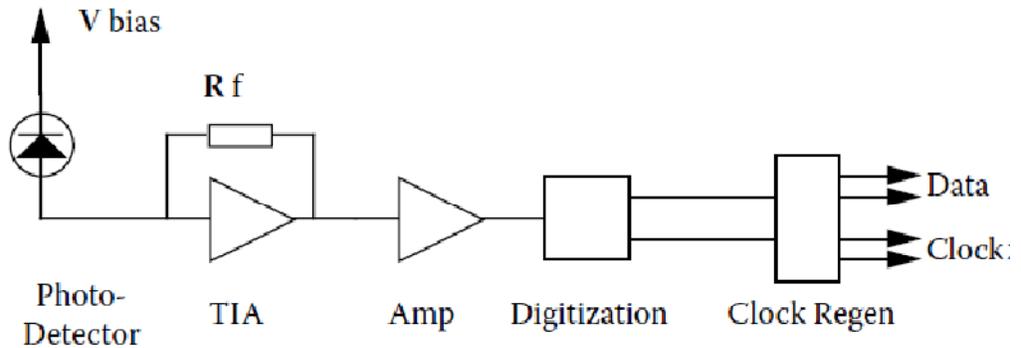
Con las limitantes de tamaños grandes y altos costos, la flexibilidad de tener elementos separados no era necesaria. Esta era la principal razón en el desarrollo del acuerdo multifuente (MSA) para transceivers ópticos que se discuten más adelante.

Debido a que el desempeño del receptor es altamente dependiente del frente óptico, a continuación se hace mención de receptores basados en dos fotodetectores comunes.

Circuitos receptores APD

- Permiten presupuesto de enlace aumentado y por lo tanto habilitan transmisión no amplificada con fibra larga y presupuesto con componente de baja pérdida siendo entonces ideal para CWDM.
- Ideal para detección de longitudes de onda donde no se dispone de amplificadores ópticos o cuando los costos de la línea de transmisión deben ser bajos.
- Sensibilidad mejor que los receptores de -30dBm para 2.5 Gb/s, -24dBm para 10Gb/s.

Figura 40 Bloques de construcción de un receptor típico utilizado en transcievers.



Circuitos receptores PIN

- El receptor PIN para detección a la mayoría de tasas de bit, incluyendo las menores a 10Gb/s; no obstante, los mayormente comunes son los de operación de 1.25 a 2.5Gb/s para CWDM.
- Los receptores mayormente utilizados por bajo costo donde menor sensibilidad que los APD pueden ser tolerados, por ejemplo. -16dBm a 10Gb/s, -22dBm a 2.5Gb/s.
- Receptores compactos con amplificadores eléctricos de bajo ruido, amplificador integrado frecuentemente integrado.

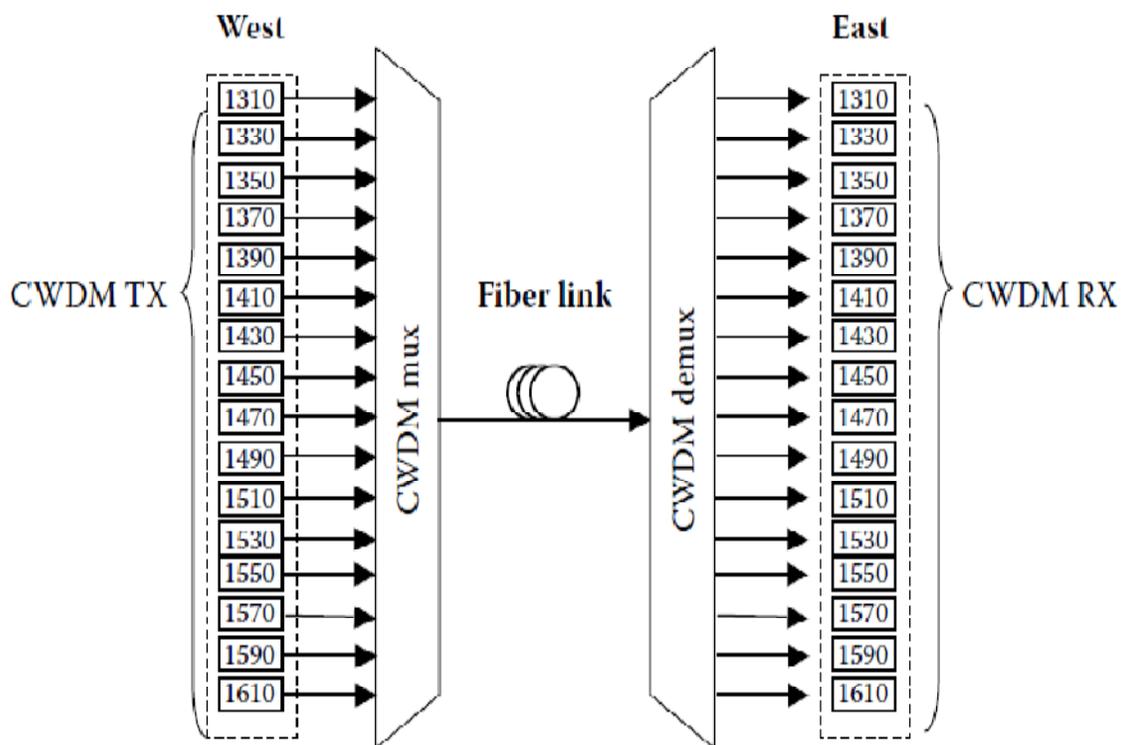
3.3.5. Enlace de transmisión CWDM

En este ejemplo, transmisores y receptores son utilizados para construir enlaces de transmisión de 16 canales entre 1310 y 1610nm.

Cada uno de los canales requiere de un par transmisor receptor como lo muestra la figura siguiente para un enlace convencional unidireccional, es decir, donde todas las señales son transmitidas paralelamente del oeste al este.

Todos los canales operan típicamente ya sea a 1. 25Gb/s o 2. 5Gb/s, aunque diferentes tasas de bit podrían aparecer. Los láser DFB son modulados directamente con una secuencia NRZ de 1. 25/2. 5-Gb/s por medio de un ER típico de 8dB. Los láser son sin enfriamiento y sus longitudes de onda caen dentro de la banda de paso de los componentes multiplexores/demultiplexores. Luego de transmisión sobre enlace de fibra, los canales son demultiplexados e individualmente detectados.

Figura 41 Un enlace de transmisión estándar de 16 canales CWDM utilizando 16 pares de transmisores (TX) y receptores (RX).



3.4. Transcievers para CWDM

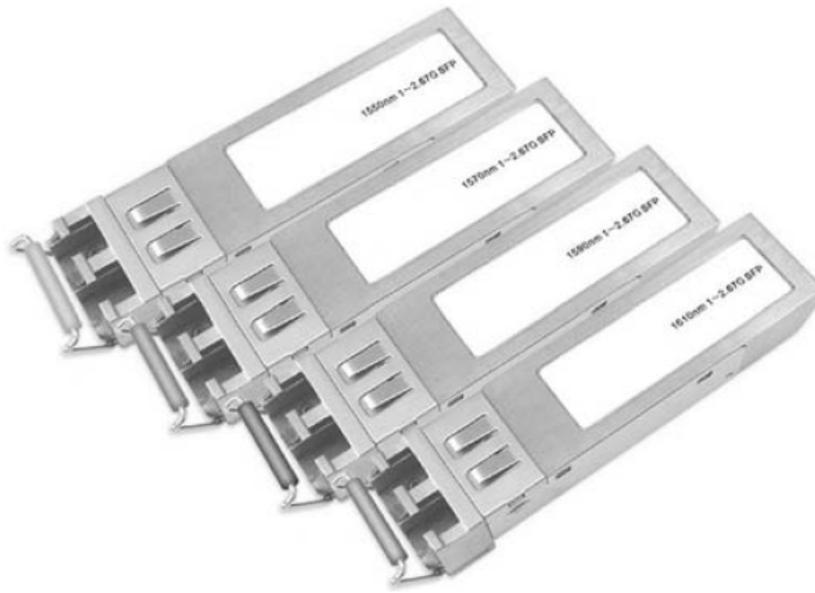
En lugar de utilizar láser discretos, circuitería de manejo, PIN/APDs, y circuitería de recepción montada en placas, estas funciones se están volviendo más integradas en módulos. Este más alto grado de integración dio lugar al concepto del transciever. Estos dispositivos son particularmente útiles cuando se opera en enlaces bidireccionales, debido a premisas de sitio un transmisor también es un receptor.

Láser, diodo receptor y electrónica relevante para manejar el láser y darle forma a la señal recibida son integrados en un solo módulo con una interfaz estandarizada como lo muestra la figura siguiente.

Otra característica importante del transciever es su modularidad, es decir, la habilidad de conectar los transcievers a circuitos electrónicos para intercambiarlos. Esta modularidad permite separación entre la parte óptica de la parte electrónica del sistema y por lo tanto soportan un diseño de sistema costo-efectivo.

Uno de los requerimientos de esta modularidad es la adopción de estándares comunes para los transcievers. Antes de enfatizar el uso de transcievers para CWDM, nos enfocaremos en los estándares principales para transcievers de 2.5Gb/s y 10Gb/s, los cuales impulsaron la amplia aceptación de estos dispositivos en los sistemas de redes metro y de acceso.

Figura 42 Juego de transcievers para uso en CWDM; cada dispositivo tiene un conector óptico para el transmisor y receptor.



3.4.1. Bloques de construcción

Los transcievers son dispositivos altamente integrados y consisten de varios elementos: diodo láser (DFB, VCSEL o FP), receptor (PIN o APD), y los circuitos electrónicos mencionados en las secciones anteriores. Los transcievers CWDM típicamente utilizan láser DFB para desempeño y diodos PIN por simplicidad y costo. Los transcievers son armados en placa y montados a modo que son interfaz eléctricamente directa a la placa electrónica. En la interfaz óptica, conectores son utilizados para ajustar convenientemente y permitan una simple pero confiable conexión para la fibra de transmisión u otros componentes ópticos. Los conectores son generalmente estándar tipo LC o SC.

A continuación, deseamos hacer énfasis en el uso de transcievers como bloques de construcción de sistemas CWDM. En la figura 42 se mostro que para un sistema unidireccional de 16 canales, se necesitan 16 transmisores individuales en un extremo y 16 receptores al otro lado del enlace. Cuando se usan transcievers, tres diferentes casos son posibles para configurar un enlace bidireccional CWDM:

- Los 16 transmisores y receptores son reemplazados por transcievers, resultando en 16 transcievers en cada extremo y dos fibras separadas. Consecuentemente, la referencia unidireccional de 16 canales del sistema de la figura siguiente es el doble con ahora un total de 32 canales de transmisión sobre dos fibras.

Aquí, el uso de transcievers duplica la capacidad añadiendo otro sub-enlace de transmisión unidireccional en la dirección opuesta. Por ejemplo, el canal 1 a 1310nm existe en ambos enlaces, pero la separación espacial de las dos fibras, elimina cualquier crosstalk. Típicamente, cables ópticos consisten de múltiples fibras, por ejemplo, 48 ó 96, de modo que seleccionar fibras individuales por dirección puede ser logrado con facilidad. La figura 43(a) ilustra el arreglo de dos enlaces bidireccionales.

Los dos conectores ópticos por transciever están conectados de tal forma que uno envía la señal de transmisión por una fibra mientras que la segunda fibra es acoplada dentro del transciever por medio de otro conector. De cualquier manera, este acercamiento requiere duplicidad del número de componentes ópticos, llevando el sistema a complejidad y costo aumentados.

- De cada lado, ocho transceivers son utilizados con únicamente una fibra. En este caso, existen únicamente cambios pequeños comparados con el enlace de referencia de 16 canales. Solamente una fibra lleva tráfico bidireccional y no se requieren de multiplexores adicionales. De cada lado, ocho transceivers son utilizados donde la mitad de las longitudes de las 16 longitudes de onda se propagan de oeste a este, por ejemplo, 1310, 1350, 1390nm, etc. , mientras que la longitudes de onda restantes, 1330, 1370nm, etc. , se propagan en la dirección opuesta.

Otros planes de canal son también posibles, donde los ocho canales de abajo hasta 1450nm se propagan en una dirección y la otra dirección es utiliza longitudes de onda mas grandes hasta de 1610nm. Aunque se utiliza solo una fibra, el crosstalk entre canales es despreciable. A diferencia del caso mencionado anteriormente, solo la mitad de la capacidad se logra pero, en la otra mano, el monto de nuevo equipo es considerablemente reducido a solamente reemplazar los transmisores discretos y receptores con módulos de transceivers. La figura 43(a) muestra una implementación del esquema en discusión con un total de 16 transceivers.

- Similar al primer caso, 16 transceivers para cada uno de los lados son utilizados pero con una sola fibra. Iniciando desde el enlace CWDM mostrado en la figura 44 (b), la capacidad de transmisión es duplicada en 16 canales propagándose en cada dirección. El reto aquí es que en cada uno de los 16 multiplexores pasabanda existe transmisión bidireccional. Por ejemplo, el canal a 1310nm es lanzado a través de un puerto multiplexor y, al mismo tiempo la señal del otro extremo del enlace de transmisión es detectada del mismo puerto. Como resultado, este sistema es más compacto que la solución descrita en la figura 43 (a), pero los

requerimientos sobre los componentes son más altos. Crosstalk dentro de la banda sucede de las reflexiones en la trayectoria de la señal – la luz reflejada viaja en la dirección opuesta y de esta manera actúa como interferencia en el canal detectado.

Figura 43 Enlace bidireccional CWDM que consiste de dos enlaces unidireccionales separados y 2x16 transceivers llevando así a obtener 16 canales de transmisión en cada dirección.

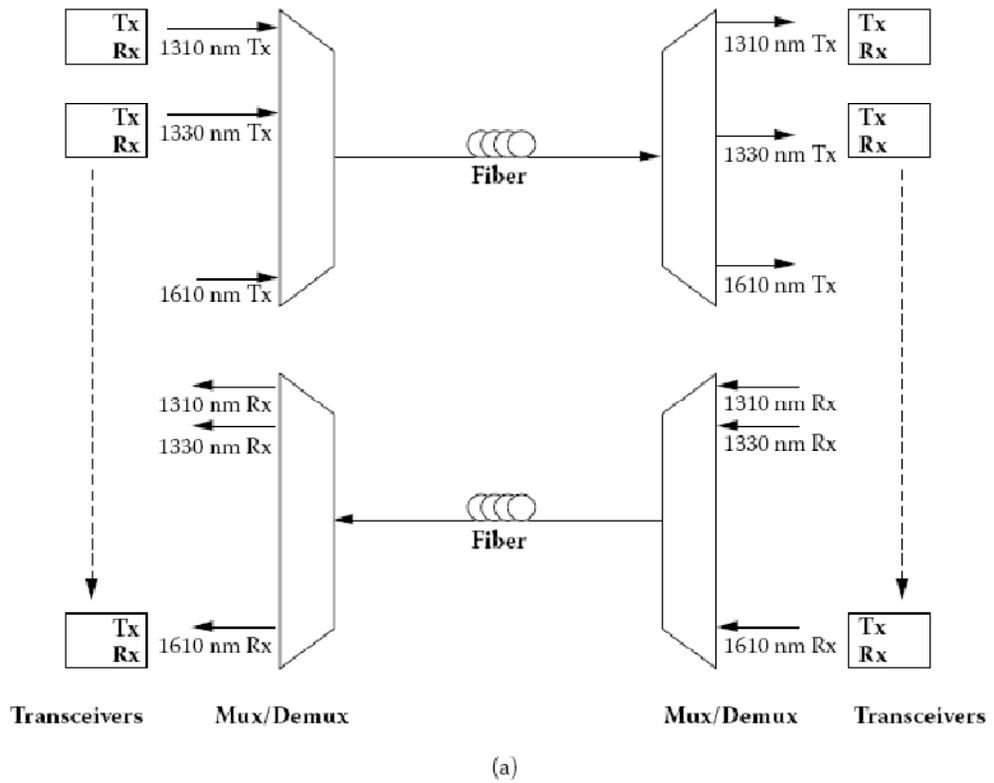


Figura 44 Enlace CWDM bidireccional sobre una sola fibra con 2X8 transcieivers y un total de 16 longitudes de onda.

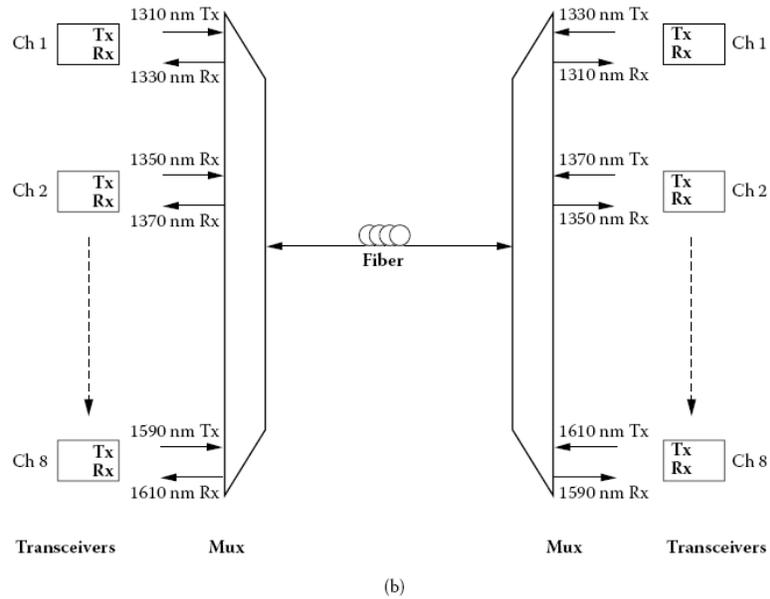
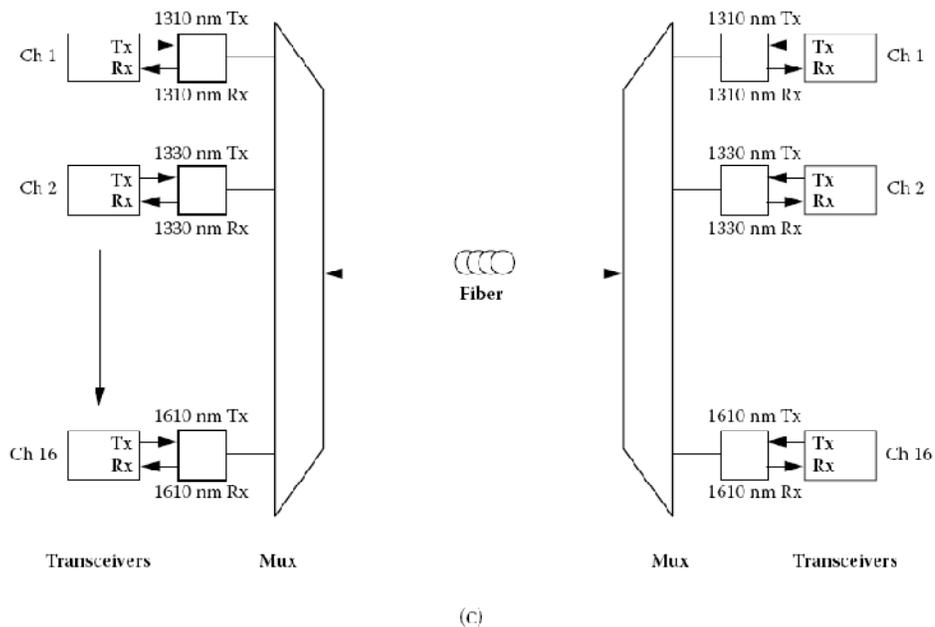


Figura 45 enlace bidireccional con 16 transcieivers de cada lado. Cada longitud de onda es utilizada dos veces en este arreglo y combinadas en el mismo puerto multiplexor.



3.4.2. Estándares para transcievers

El transmisor y receptor integrado evolucionaron de la necesidad de proveer bajo costo, mejor desempeño y facilidad de implementación y conectividad en transporte óptico. Esta tendencia comenzó en 1980 con aplicaciones en datacom, donde computadoras estaban apenas empezando a ser conectadas vía cable de fibra óptica.

En paralelo, diseños de placas discretas sobre tarjetas de línea usados en aplicaciones telecom eran migradas para separar transmisores y receptores. A medida que los volúmenes incrementaban al final de los 80's, para optoelectrónica integrada en ambas aplicaciones datacom y telecom, los transmisores y receptores fueron ubicados en el mismo módulo para costos futuros y ahorro de espacio.

Unos de los primeros transcievers estandarizados fueron el OC-3 y módulos FastEthernet de 1x9 pines. Estos utilizaban un diseño de receptáculo para la interfaz de fibra en lugar que una cola de cerdo de fibra. El dispositivo podía ser montado directamente en una placa de circuito impreso y tener la interfaz extendiéndose a lo largo del encapsulado para fácil acceso. Este ahorro tiempo de ensamble y espacio debido a que la cola de cerdo de fibra siempre necesitaba tener un loop de servicio y el radio de dobléz se necesita mantenerse a cierto diámetro con el objetivo de mantener la confiabilidad así como el desempeño. Los módulos 1x9 tuvieron luego la función de recuperación de reloj introducida en las unidades y tuvo una segunda fila de pines añadida. (Figura siguiente).

Figura 46 Un transceiver 1x9



3.4.2.1. Factor de forma pequeña (Small Form Factor SFF)

Con el incremento de la necesidad de una mayor densidad de interconexiones, transceivers de huella más pequeñas fueron desarrollados para acomodarse a estos requerimientos. Conectores más pequeños tales como los LC, MT-RJ y MU daban la habilidad a los distribuidores de transceivers fabricar dispositivos más pequeños que fuesen encontrados cuando ellos usaban conectores tipo ST-, SC- y FC. El SFF era uno de los primeros transceivers pequeños comercialmente disponibles que utilizaba la mitad de espacio que el convencional tipo SC. Estos dispositivos SFF encontraron su lugar en aplicaciones que van desde los 100Mb/s en tolo lo largo hasta 2. 5Gb/s. El SSF era uno de los transceivers de alto volumen fabricado bajo un acuerdo múltiple (MSA).

Esto propició a muchos distribuidores a producir partes que tienen la misma forma, condición y función, ambas eléctricamente y mecánicamente; de cualquier manera, el MSA no definía o estándares de desempeño o confiabilidad.

Figura 47 Un transceiver SFF.



3.4.2.2. Convertidor a interfaz gigabit (GBIC)

Un paso grande en el manejo para hacer a los transceivers ópticos más de modo conector en lugar de elementos de red era el desempeño del transceiver desconectable. Esto permitió a los vendedores de blades y tarjetas de línea gran flexibilidad para reducir el inventario de tipos de tarjetas basadas en su interfaz óptica y en vez tarjetas estándar con socket en el ensamble para acomodar los transceivers desconectables.

Esto permitiría a una tarjeta estándar ser vendida y tener una variedad de diferentes tipos de transceivers disponibles tanto como interfaces. Esto se adoptó primeramente por la comunidad Ethernet, con la pieza desconectable GBIC.

Este fue el primer transceiver desconectable MSA con aplicaciones primariamente en blades de routers y switches para Gigabit Ethernet. Habían tres tipos básicos de transceivers Ethernet: de corto alcance, pieza láser basada en VCSEL de 800nm llamada la SX con un período 500m sobre fibra multimodo; el de medio alcance, pieza láser FP de 1310nm llamada LX con un alcance de 2km sobre fibra monomodo y una pieza DFB de 1550nm utilizada para larga distancia llamada LH con un alcance de 80km, también sobre fibra monomodo.

Una migración sencilla de las piezas estándar LH era tener láser DFB de longitud de onda específica; esto permitía el desarrollo de GBICs CWDM y eventualmente GBIC DWDM. Los transceiver GBIC han sido utilizados primordialmente en aplicaciones Gigabit Ethernet, pero en algunos casos ambos baja velocidad, piezas multi-rata y más altas velocidades de alrededor de 2.5Gb/s han sido desarrolladas. EL GBIC fue uno de los primeros transceivers en tener receptor APD en lugar de un tipo PIN para más alta sensibilidad. (Figura siguiente).

Figura 49 Transciever SFP para longitud de onda de 1570nm CWDM.

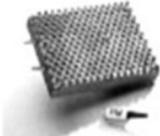


3.4.3. Transcievers para 10Gb/s

Las próximas piedras para el camino del desempeño de los transcievers se encuentran en el desarrollo de 10Gb/s. Existen múltiples MSA para el transciever de 10Gb/s, típicamente denotados por una X en el nombre, X denotando el número 10 en Romano. XFP, Xenpak, X2 y LX-4 son los nombres de algunos de estos dispositivos. Para permitir mayores distancias a 10Gb/s, el instituto de ingeniería eléctrica y electrónica (IEEE) ha desarrollado un estándar para CWDM en el diseño de estos dispositivos de alta tasa de bit, IEEE 802. 3 ae-2002. En vez de tener un enlace serial corriendo a 10Gb/s, el concepto LX-4 transmite y recibe cuatro señales a diferentes longitudes de onda espaciadas a 1275, 1300, 1325 y 1350nm. La rejilla de 25nm ligeramente diferente que la rejilla de 20nm de la ITU. La tasa de bit de operación de canal es de 3. 125Gb/s.

El ancho de banda agregado de los cuatro canales es de 125. Gb/s, el cual incluye el protocolo asociado de cabecera. La ventaja de los LX-4 paralelos es que cada uno de los cuatro canales tributarios tiene una menor tasa de bit y mejor tolerancia a dispersión. Al mismo tiempo, láser de bajo costo y detectores pueden ser utilizados.

Tabla X Comparación entre los diferentes transcievers disponibles.

MSA	300 pin	XENPAK	XPAK	XFP
				
Application Target	Enterprise switch	Enterprise switch	Server NIC Storage Enterprise switch	Server NIC Storage Enterprise switch
Electrical Interface	16-Bit parallel SFI4 (OIF)	4-Bit parallel XAUI	4-Bit parallel XAUI	10 Gb/s serial XFI
Optical Reach	10 GbE to 40 km 80 km (future)	10 GbE to 40 km 80 km (future)	up to 10 km 40 km (future)	10 km up to 40 km (future)
Dimensions (L × W × H)	1st Gen: 4.0 × 3.5 × 0.53 2nd Gen: 3.0 × 2.2 × 0.53	4.8 × 1.4 × 0.7	2.7 × 1.4 × 0.4	2.7 × 0.7 × 0.4
Power Consumption	up to 12W	up to 11W	up to 4W	2.5W + external SerDes
Main Features	Protocol independent	Hot pluggable XAUI	Shorter, thinner Single side of PCB Common interface for low integration disk	protocol independent small size requires 10Gbps CDR

4. FILTROS Y AMPLIFICADORES PARA CWDM

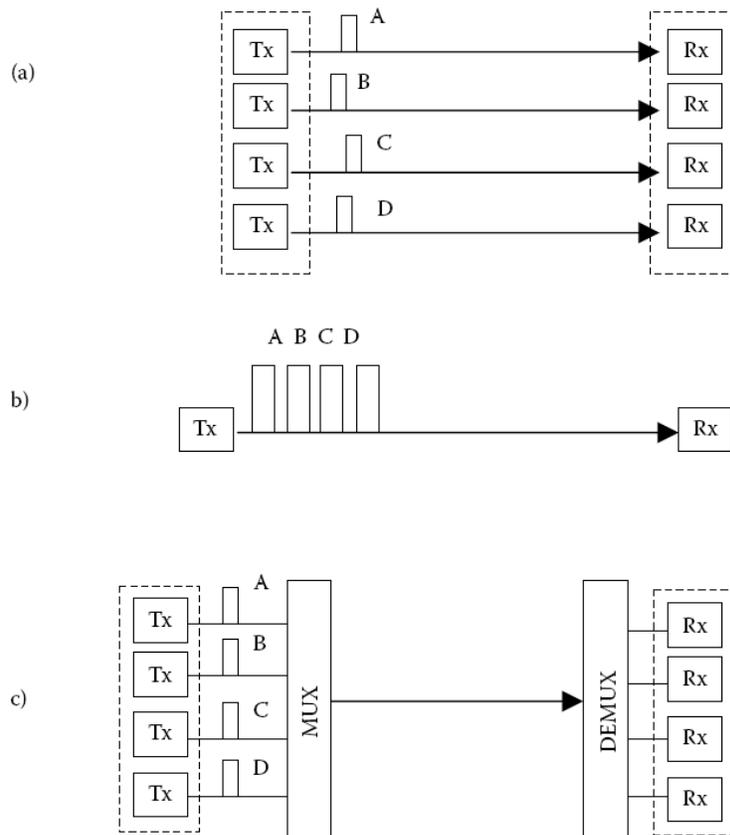
Comunicaciones basadas en fibra óptica pueden ser tan simples como un enlace punto a punto donde un canal de datos simple es transmitido entre dos sitios. Por otro lado, la demanda por capacidad y flexibilidad ha llevado a una evolución de enlaces lineales a redes más complejas, incluyendo arquitecturas estrella, anillos y diseños de malla. A medida que la complejidad, también lo hará la demanda por dispositivos adicionales requeridos para soportar la funcionalidad de red. Las características más importantes del uso de CWDM en la red incluyen multiplexión y demultiplexión de todos los canales ópticos o sub-bandas, también el selector de canal de uno o más canales en los nodos de red.

4.1. Filtros para CWDM

4.1.1. Conceptos básicos de red

La demanda por el incremento de capacidad de transmisión es el mayor incentivo tras los conceptos de multiplexión por división de longitud de onda (WDM), multiplexión por división de tiempo (TDM) y multiplexión por división de espacio (SDM). Estos tres últimos enfoques se comparan en la figura 50.

Figura 50 Conceptos básicos de multiplexión. Combinando cuatro canales diferentes A, B, C y D en (a) SDM, (b) TDM y (c) WDM.



Cuando la información de cuatro canales diferentes A...D es transmitida entre sitios, el enfoque (a) utiliza cuatro fibras distintas cada una terminando en un par transmisor receptor. Esta solución tiene la mayor demanda en total de equipo y especialmente en fibras ópticas, pero al mismo tiempo ofrece cuatro canales paralelos totalmente independientes que pueden ser configurados todos individualmente. En contraste, la técnica de TDM en la figura 50(b) combina la información de los cuatro tributarios ya sea eléctricamente (ETDM) u ópticamente (OTDM) en una misma longitud de onda.

Se aprecia por encima de SDM una reducción dramática en el número de fibras, transmisores y receptores a utilizar. Sin embargo, la rata de bit del canal resultante aumenta cuatro veces y es por lo la misma razón aumenta también los requerimientos del transmisor y receptor y posiblemente también un manejo de dispersión más sofisticado del enlace de fibra. Otra diferente de la transmisión serial en TDM, la técnica de WDM en la figura 50 (c) utiliza transmisión paralela de cuatro canales entre sitios, pero a diferencia de SDM, a cada canal se le asigna una única longitud de onda. Por lo tanto, los transmisores a la misma rata de bit baja como la de SDM se pueden utilizar, pero láser con color son requeridos.

4.1.2. Requerimientos para filtros CWDM

En general, WDM permite la combinación de múltiples canales de diferentes longitudes de onda en una sola fibra donde componentes selectores de longitud de onda tales como multiplexores y filtros juegan un papel vital combinando y separando canales. Dependiendo de la topología de red y demanda de capacidad, los 16 canales CWDM pueden también ser divididos en sub-bandas de 4 u 8 canales.

- Multiplexor CWDM (MUX) que combina hasta 16 longitudes de onda diferentes en una sola fibra. Sus requerimientos son bajo costo y pérdida de inserción uniforme baja para todos los canales. A medida que el requerimiento de aislamiento de crosstalk es bajo en un multiplexor, este dispositivo puede ser realizado con una etapa simple de filtro de película delgada TFF (Thin Film Filter), requiriendo múltiples etapas para un

DEMUX. Un pasabanda ancho de 12 a 13nm para cada canal cuenta para la deriva de temperatura del láser sin enfriamiento.

- El demultiplexor CWDM (DEMUX) es utilizado como par con el multiplexor para separar los canales CWDM luego de la transmisión. Típicamente, el aislamiento de la unidad MUX es mucho más pequeño que el del DEMUX. Ejemplo: MUX:15dB, DEMUX: 50dB.
- Add/Drop MUX: En principio, la función add/drop puede ser realizada demultiplexando los canales primero y luego entregando los canales seleccionados. Todos los canales expresos, es decir, longitudes de onda que no son modificadas, están directamente conectadas a un multiplexor subsecuente combinando todos los canales discretos de nuevo en la fibra común. En el MUX, nuevos canales pueden también ser agregados a esos puertos donde del lado del DEMUX correspondiente los canales han sido terminados. Usualmente, en aplicación práctica, los filtros add/drop son construidos de TFF de longitud de onda simple. Los canales expresos son no demultiplexados y remultiplexados, pero se mantienen juntos y experimentan pérdida de inserción relativamente baja.

4.2. Opciones técnicas para CWDM

Aunque en las redes CWDM de hoy en día la tecnología de multiplexor más comúnmente implementada está basada en TFF, existen varios diferentes tipos de tecnologías disponibles para multiplexar y demultiplexar las longitudes de onda sobre una red CWDM.

4.2.1. Rejillas, arreglos de guías de onda, y filtros de película delgada

4.2.1.1. Rejillas de Fibra Bragg

La figura siguiente muestra una vista artística de una rejilla que ha sido inscrita en el núcleo de una fibra óptica. La rejilla es una estructura periódica de segmentos índice de alta y baja refracción que reflejan la luz de una longitud de onda específica y dejan pasar otra. El período de la rejilla determina cuales longitudes de onda están siendo reflejadas. Es posible inscribir rejillas con periodicidad cambiante (rejilla con punteado) y fuerza variante (rejilla con punteado removido) del índice de refracción en el núcleo de la fibra para obtener funciones de respuesta optimizada. La estructura de rejilla con punteado en la figura 51, por ejemplo, puede ser utilizado para compensación de dispersión donde longitudes de onda más largas y reflejadas primero y longitudes de onda más cortas después.

Fabricación: La sensibilidad de la fibra óptica a los rayos UV es el factor que hace posibles los FBG debido a que esto permite la creación de aéreas de mayor índice de refracción en el núcleo de la fibra. La preparación de la fibra con hidrógeno presurizado mejora la receptividad de luz UV.

La figura 52 muestra dos métodos para obtener FBG: (i) por medio de arreglo holográfico o (ii) por medio de máscara de fase. En ambos casos, se necesita quitar el revestimiento de la fibra previamente y recubierta luego del proceso de escritura para permitir a la luz UV tener acceso al núcleo de la fibra sin perturbaciones o absorción debido al revestimiento.

La reproducibilidad del proceso del enmascarado de fase es mucho mejor que el arreglo holográfico, y es por eso que las mascararas de fase son comúnmente utilizadas en ambientes en producción.

Figura 51 Principio del punteo de la rejilla de fibra Bragg reflejando diferentes longitudes de onda.

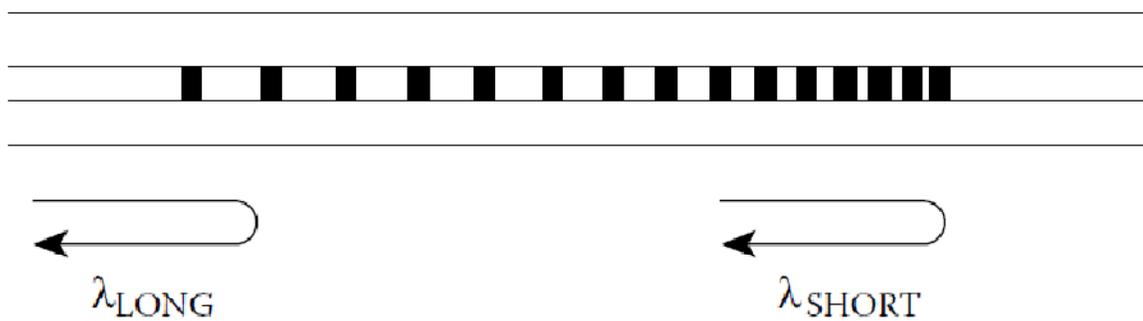
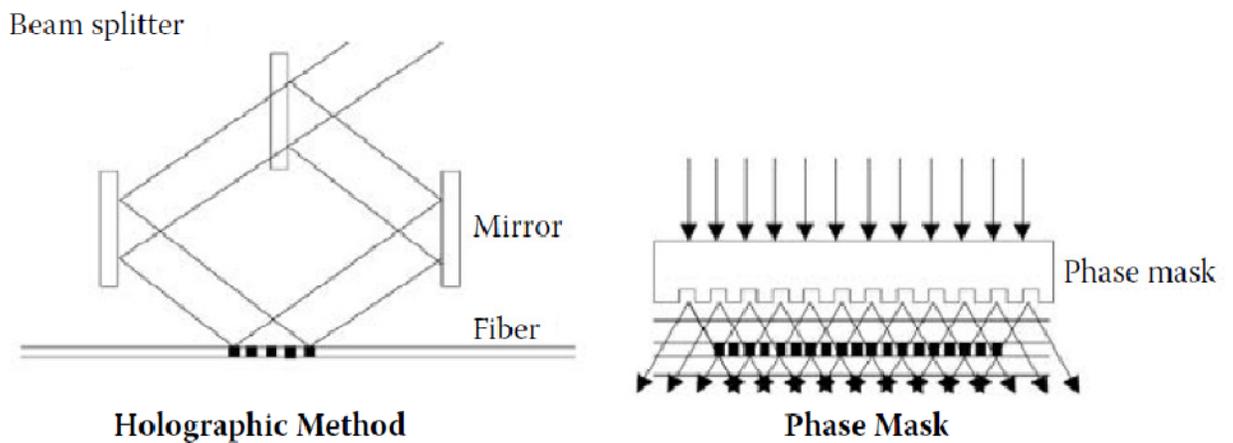


Figura 52 Dos métodos para crear rejillas de fibra Bragg.



La figura 52 revela otra propiedad clave de las FBG: La longitud de onda de interés es reflejada por la estructura periódica y viaja de regreso en la dirección donde se originó. Debido que una rejilla es un dispositivo con únicamente dos puertos (IN o OUT), esto hace necesario combinar la rejilla con otro dispositivo óptico para acceder a la longitud de onda de interés. La figura 53 muestra una configuración de un multiplexor tipo add/drop (OADM) para una longitud de onda. El dispositivo utiliza una rejilla y dos circuladores ópticos.

Una señal WDM multicanal en el puerto IN pasa a través del primer circulador y alcanza la rejilla Bragg (FBG). Con la FBG siendo designada para λ_1 , esa longitud de onda es reflejada, donde todas las demás longitudes de onda pasan el dispositivo, alcanzan el segundo circulador y el puerto de salida. El canal λ_1 , que ha sido reflejado por el FBG, viaja de regreso al primer circulador y aparece en el puerto DROP donde puede ser más adelante procesado por la conversión O/E, etc.

El puerto ADD introduce nuevo tráfico, es decir, un nueva corriente de voz, datos y video que está siendo modulado de nuevo sobre la misma longitud de onda λ_1 . Debido a que el FBG está reflejando esa longitud de onda en ambas direcciones, la rejilla puede ser utilizada para multiplexar el nuevo tráfico sobre el enlace de fibra óptica.

El puerto ADD λ_1 alcanza el segundo circulador y es pasado al puerto FBG. La FBG refleja ese canal de modo que ahora se encuentra viajando en la misma dirección que los canales restantes sobre la red WDM que pasa a través de la FBG hacia el puerto OUT.

Figura 53 Multiplexor óptico tipo Add/Drop utilizando una rejilla y dos circuladores

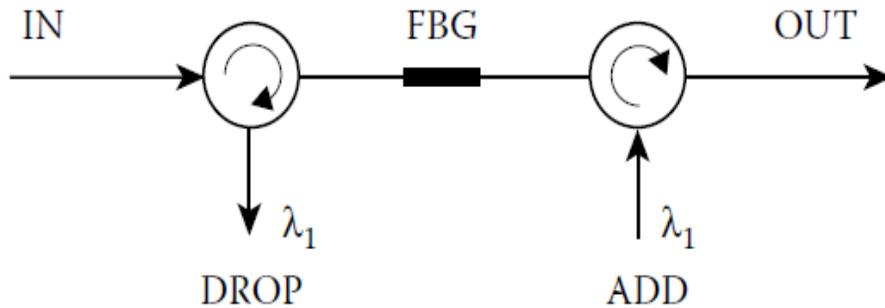
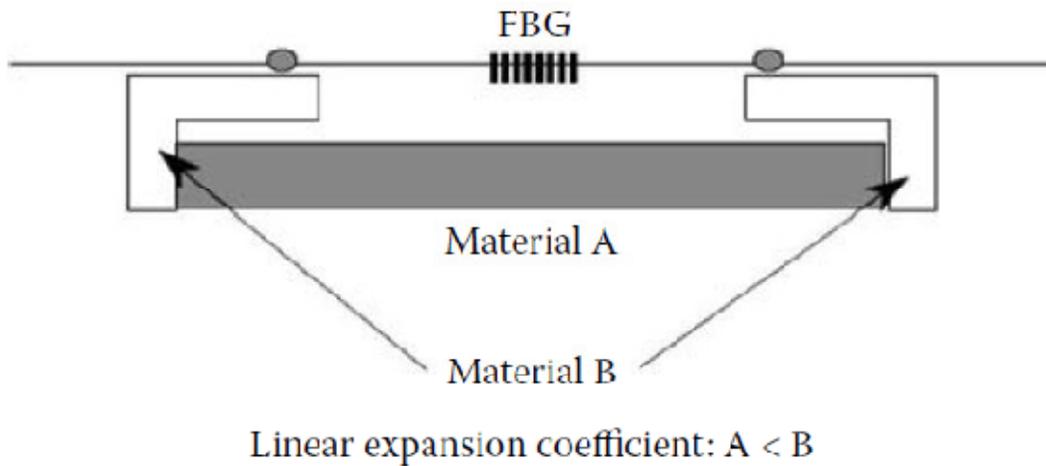


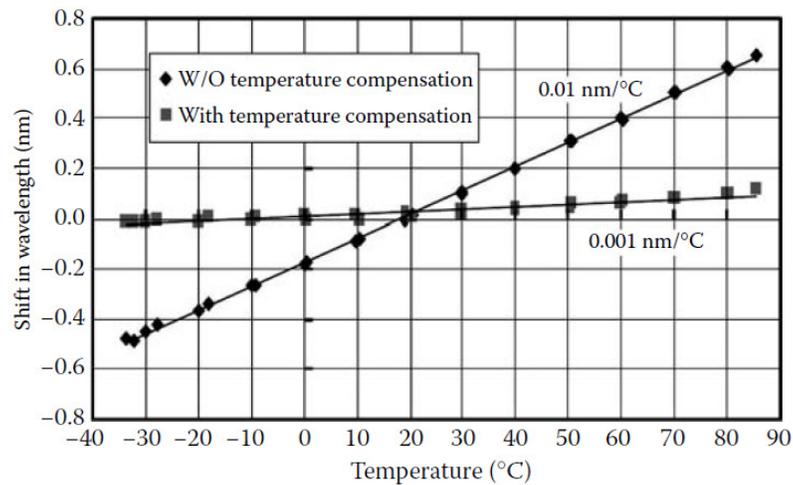
Figura 54 Rejilla de fibra Bragg con diseño de empaquetamiento atermalizado



Existen dos efectos en rejilla que tienen impacto en el centro de la longitud de onda de una función de filtro FBG: (i) Temperatura y (ii) tensión. Ambos efectos necesitan ser considerados cuando se diseña un paquete FBG para redes de comunicación donde un comportamiento de temperatura-dependencia no se desea. Por otro lado, la respuesta de la función de transferencia de la FBG a temperatura y tensión hace que el dispositivo muy interesante para aplicaciones de sensor.

Una solución de de empaquetamiento esta sugerida en la figura 54 Durante el proceso de encapsulación, la rejilla será pretensada antes de ser montada a una estructura de diferentes materiales y coeficientes de expansión termal específicos. Durante un incremento de temperatura del empaquetamiento, la tensión de la rejilla seria reducida y viceversa; durante una reducción de temperatura, la tensión sobre la rejilla se incrementaría. Si los cambios en la tensión son calculados para balancear la respuesta a temperatura de la rejilla, el cambio del centro de longitud de onda puede ser despreciado.

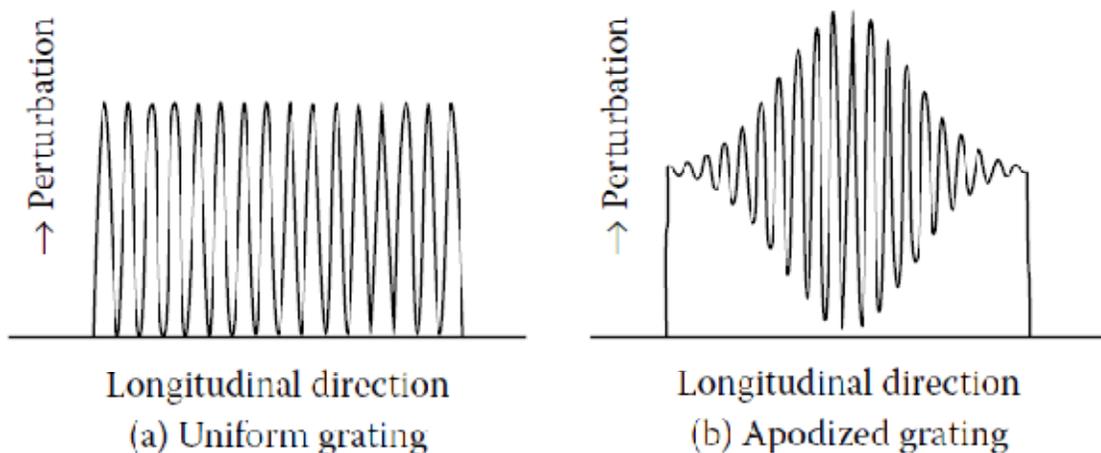
Figura 55 Rejillas de fibra Bragg del centro de longitud de onda con temperatura y resultados de atermalizacion



Sin compensación de temperatura la longitud de onda centro cambia a 0.01nm/°C y tiene una dependencia lineal de la temperatura. Con un diseño de empaquetamiento atermalizado, la respuesta de temperatura es reducida por un orden de magnitud de 0.001nm/°C. Redes DWM ultra densas de hoy en día con canales de espaciado propuesto de 50-GHz o 25-GHz requerirían aun mayor control de la longitud de onda centro.

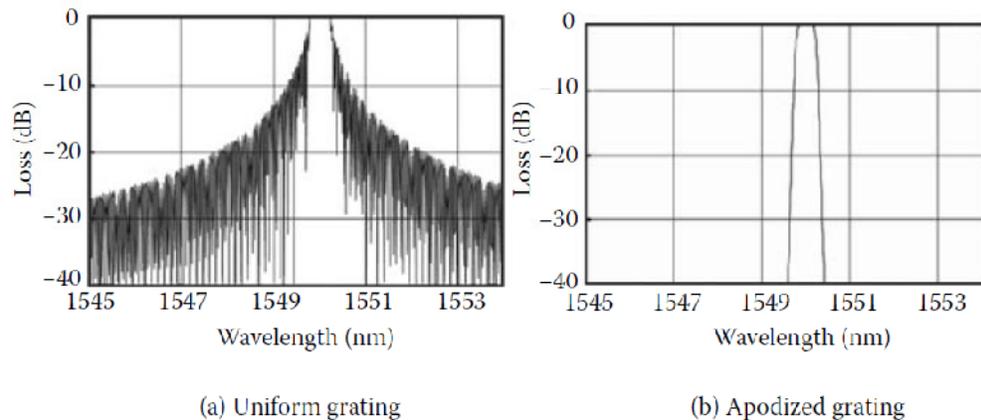
Optimización: El desempeño de las FBG necesita ser optimizado más adelante para proveer características de banda de paso óptimas para redes de comunicación. Aunque esta optimización de FBG es constantemente necesaria para DWDM, podría ser también utilizada en aplicaciones DWDM sobre CWDM donde menor espaciamiento entre canales pone requerimientos mayores sobre el crosstalk.

Figura 56 Fuerza relativa de la modulación del índice de refracción en (a) una rejilla uniforme y (b) una rejilla apodizada.



La figura anterior muestra dos diferentes perfiles de índices de refracción en una FBG. En la figura anterior inciso (a), todos los elementos de la rejilla de alto y bajo índice tienen una estructura uniforme, donde en la figura anterior inciso (b), la amplitud de la variación de perfil es una función de la longitud de la rejilla. En el caso de una estructura uniforme, la respuesta de la función de la rejilla no es muy útil para enlaces de comunicación.

Figura 57 Función de respuesta calculada de una (a) rejilla uniforme y (b) una rejilla apodizada.

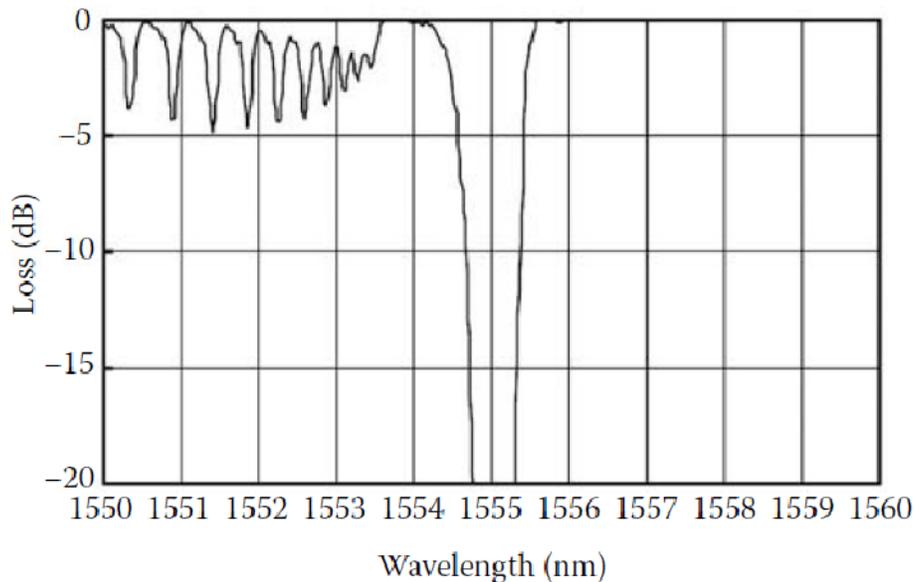


La figura anterior muestra la respuesta calculada de una rejilla uniforme centrada a 1550nm. Con aumento gradual incrementa en aislamiento, este tipo de rejilla no puede ser utilizado en enlaces de comunicación con espaciado de canal angosto. El crosstalk de canales adyacentes y no adyacentes haría imposible recuperar la señal deseada en la calidad deseada. La figura 57(b) demuestra la efectividad de rejilla apodizadas. El incremento y decremento gradual de la perturbación del índice de refracción tiene una influencia muy positiva sobre el aislamiento de canal adyacente y no adyacente. Los lóbulos laterales de la función de respuesta espectral de la rejilla son suprimidos más allá de -40dB, de este modo permitiendo una excelente supresión de los canales vecinos.

Otro inconveniente es mostrado más adelante en la figura 58; longitudes de onda más cortas comparadas con la longitud de onda centro de la rejilla son expuestas a una estructura de pérdida paródica adicional si la rejilla es escrita en una SSMF (pérdida de lado azul). Este efecto puede explicarse por el acople del modo de guía de onda en dirección hacia adelante con el modo ce

del revestimiento en dirección de regreso. En una configuración OADM, esto tendrá impacto en los canales de paso o canales expresos en una manera negativa. El perfil de índice de la rejilla de fibra puede ser cambiado de tal modo que el modo de acople es suprimido y la región espectral del patrón periódico es movido fuera de la ventana de transmisión.

Figura 58 Pérdida espectral medida para una FBG escrita en una fibra monomodo. Longitudes de onda más cortas experimentan pérdida adicional.

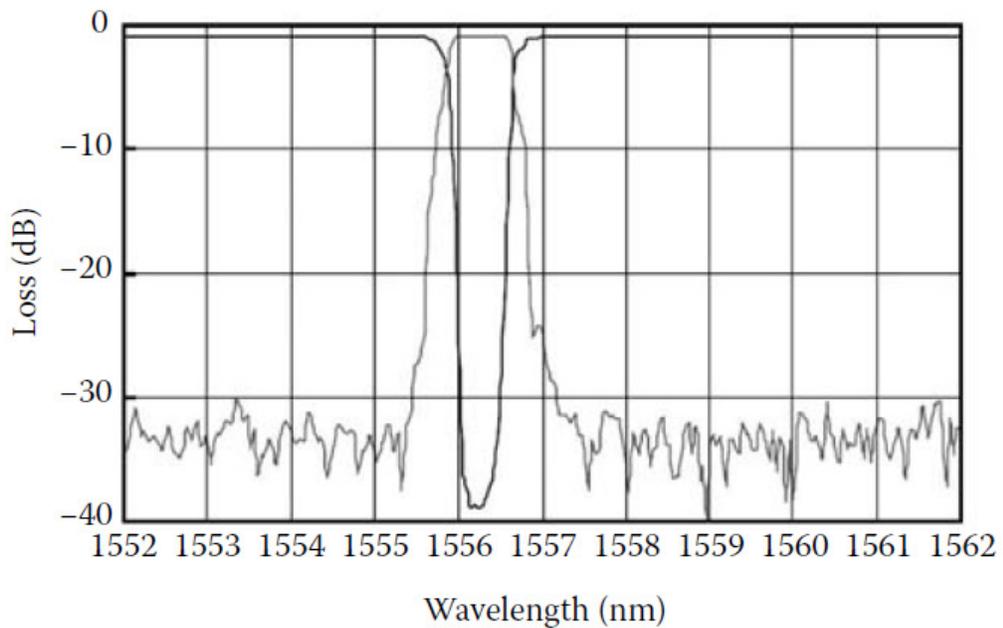


La figura anterior muestra la pérdida espectral de una FBG optimizada para espaciamiento angosto de canal. Todos los artefactos previamente mencionados de la figura 57 han sido corregidos por medio de apodización utilizando fibra óptica de alto NA.

Las FBG han encontrado una amplia variedad de aplicaciones en redes DWDM, tanto como los filtros con ganancia plana (GFF Gain-flatennig filters) para amplificadores ópticos y compensadores de dispersión.

Sin embargo, no son comúnmente utilizados en redes CWDM por dos motivos: (i) el rango espectral de redes CWDM es muy amplio con solo unos cuantos canales. El canal 1 (1271nm) empieza justo arriba de la longitud de onda de corte de una fibra monomodo a 1260nm. El rango espectral de los 18 canales CWDM termina a los 1611nm, a veces también incluyendo un camino de monitoreo a 1625nm. (ii) Debido al costo: la combinación de FBG con circuladores no cumple con las metas de bajo costo y aumentos de capacidad en la infraestructura metro/edge. Fuera de comunicación, CFF son utilizados en aplicaciones de sensibilidad de temperatura y tensión.

Figura 59 Pérdida espectral medida para una fibra Bragg apodizada en fibra no estándar con apertura numérica alta, señal transmitida y reflejada.



4.2.1.2. Arreglos de guía de onda

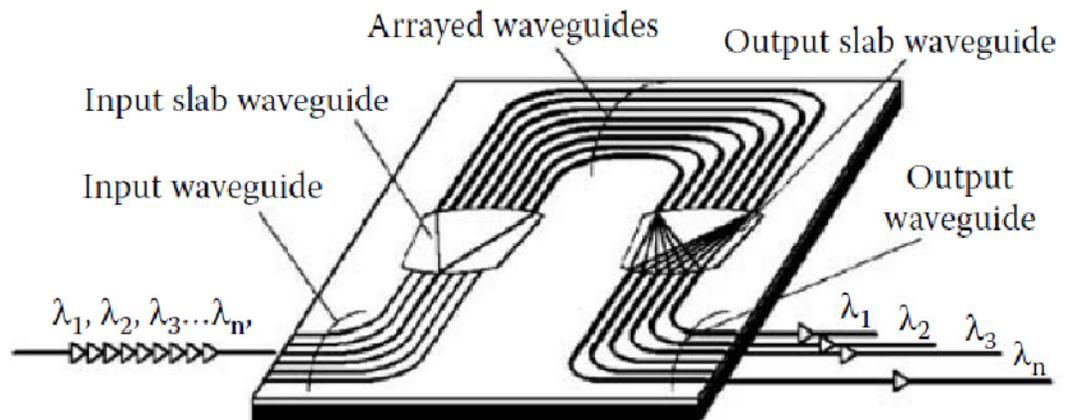
Con arreglos de guía de onda, una nueva clase de métodos se hace presente en el mundo de las aplicaciones datacom/telecom que se derivan de la manufactura del chip de silicón. El proceso de manufactura depende de maquinaria intensa y de alta precisión CAPEX y son desinados par bajar los precios a altos volúmenes con la intención que el diseño de chip (AWG Arrayed Waveguides) es similar al diseño ASIC. La pregunta que surge es sí el mercado de telecom/datacom es lo suficientemente grande en ofrecer volúmenes comparables para hacer uso efectivo de este equipo, y tal parece que la respuesta ha sido “no” al menos al día de hoy.

Algunas redes de larga distancia muestran AWGs de alto desempeño con espaciamiento de canal angosto DWDM en el rango de 100 a 50 GHz o incluso 25GHz. Pero aplicaciones de volúmenes reales con cantidades esperadas en redes FTTH de nivel consumidor que juegan un papel en dirección de la fuerza de procesos de manufactura no han sido vistos aun. La figura 60 muestra los diferentes elementos estructurales de un arreglo de guía de onda en más detalle. Una guía de onda es un área con índice de refracción alto que esta insertado en un ambiente con índice de refracción bajo.

La fibra monomodo usa un principio similar. Los AWGs son formados de arreglos de guías de onda individuales que cumplen con ciertos requerimientos bien definidas distancias y longitudes. Los materiales carrier planares son típicamente silicón como el usado por la industria del semiconductor. Las estructuras de guía de onda pueden ser hechas de silicón, cristal de sílice o incluso polímeros.

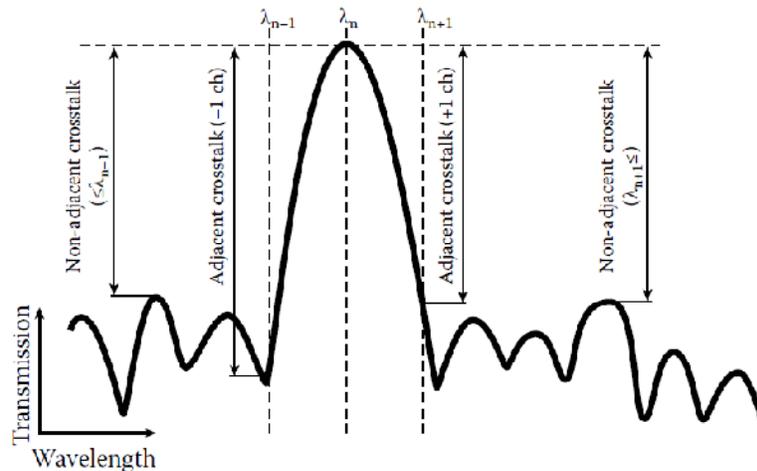
El proceso más comúnmente utilizado para los AWGs es sílice sobre silicón, es decir, vidrio sobre semiconductores. Las demás técnicas están más o menos en estado de investigación.

Figura 60 Elementos estructurales de un multiplexor de un arreglo de guía de onda.



Como se muestra en la 60, la entrada de la fibra con canales $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ es acoplada a una guía de onda de una entrada. Esta guía de onda lleva la luz al bloque de guía de onda en el cual propagación de espacio libre distribuye la potencia óptica uniformemente a lo largo del arreglo de guía de onda. Las guías de onda en la sección del arreglo tienen retardo óptico bien definido. Esto resulta en interferencia de diferentes señales ópticas en el bloque de salida de la guía de onda. Cada canal aparece en un filtro separado.

Figura 61 Función de respuesta de un arreglo de guía de onda. El espectro muestra la típica distribución Gaussiana.



Típicamente, la función de respuesta de un arreglo de guía de onda tiene una distribución Gaussiana, como lo muestra la figura anterior.

Otro importante inconveniente es la estabilidad de temperatura de la longitud de onda centro. La expansión termal de los materiales y la dependencia de temperatura del índice de refracción causa que la longitud de onda entre en deriva de alrededor de $0.011\text{nm}/^\circ\text{C}$ en la banda de 1550nm . Considerando un rango de temperatura de operación de -5 a 70°C , esta deriva resulta en un cambio de la longitud de onda centro de 0.8nm o 100GHz . Esto corresponde al espaciamiento completo de canal en un enlace DWDM de 100GHz , lo cual es aceptable para tales sistemas de comunicaciones. Para CWDM, el pasabanda angosto típico de un AWG y la longitud de onda láser CWDM tienen diferentes coeficientes de temperatura de modo que es traslape espectral de la longitud de onda centro del filtro y la longitud de onda del láser sin enfriamiento no se pueden asegurar sobre el entero rango de temperatura de operación.

Como soluciones para degradación de desempeño debido a deriva de temperatura, dos aproximaciones han sido implementadas para los AWG: la primera emplea compensación para efectos de temperatura en AWGs atermales, mientras que la segunda utiliza estabilización de temperatura a través de un elemento de calentamiento donde una constante de temperatura es mantenida por medio de loop de control. La desventaja de controlar la temperatura es que añade otro elemento de red activo en el enlace óptico que requiere una fuente de energía, manejo de alarmas y soporte del software de administración de la red.

Para el despliegue de redes de acceso o metro CWDM, los AWG no juegan un rol importante. Parra trabajar apropiadamente con láser DFB sin enfriamiento, los multiplexores y demultiplexores CWDM requieren de un pasabanda mayor de 13nm, por lo cual no es práctico obtener en una manera costo efectivo con arreglos de guías de onda.

4.2.1.3. Filtros de película delgada TFF

Comparados con los FBG y los arreglos de guía de onda, los TFF (Thin-Film Filters) están dominando el mercad hoy en día por las siguientes tres razones:

1. Los TFF proveen de la confiabilidad un producto pasivo. La funcionalidad MUX/DEMUX puede ser entregada en un solo dispositivo que está hecho de unos pocos sub-elementos. Dados los bien pensados diseños y procesos estables de manufactura, esto elimina la necesidad de una fuente de poder y administración de alarmas sofisticado.

2. Proveen de escalabilidad para ajustarse a todo tipo de plan de canales. Sistemas WDM sencillos de 2 canales solamente utilizando 1310 y 1550nm pueden ser potenciados en sistemas de 192 canales con combinaciones de separadores de banda y filtros de banda angosta. La escalabilidad también soporta el escenario típico de “pago por crecimiento” para que los operadores mantengan su primer costo de instalación a un tamaño manejable.
3. Comparado con otras tecnologías, los TFF ofrecen un precio muy atractivo por canal. Las rejillas demandan más alto precio debido a que necesitan un circulador para insertar o extraer longitudes de onda. Los arreglos de guía de onda tienen alto costo a bajos volúmenes para amortizar su inversión. Los AWG tienen ventajas de costo de los TFF con sistemas que cuentan con alto número de canales, típicamente 16 o más.

Los TFF inciden exitosamente en la necesidad del mercado de personalización. Esto incluye cambio rápido de planes de canal, requerimientos de desempeño aumentado tales como pérdida de inserción, retorno de pérdida, aislamiento y tamaño físico.

Tabla XI Comparación entre los diferentes tipos de filtros para CWDM.

	Number of Channels	Channel Spacing	Insertion Loss	Isolation	Cost per Channel	Size
Fused biconic taper devices	2	wide	low	medium	low	small
Gratings & circulators	low	wide or narrow	medium	high	high	large
Arrayed waveguides	high	narrow	medium	medium	high	large
Thin-film filters	low to medium	wide or narrow	medium	medium to high	medium	small to medium

4.3. Propiedades de los filtros de película delgada

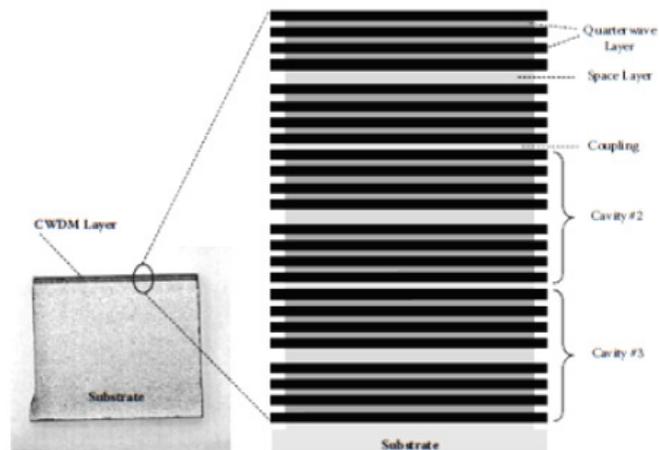
En esta sección se hará un repaso de los conceptos tras los dieléctricos de los TFF con mayor detalle. Esto se hace con la intención de proveer un vistazo general de la tecnología y dar una idea general del proceso genérico de manufactura que permite los requerimientos de desempeño que han sido discutidos previamente.

4.3.1. Estructuras multi-cavidad de película delgada

Los TFF son hechos de materiales con diferentes índices de refracción en una estructura de capas alternantes. Estas capas son llamadas revestimientos dieléctricos en contraste con revestimientos metálicos tales como el oro, plata, aluminio, etc.

Los revestimientos sencillos son hechos de unas pocas capas de dieléctricos tales como Pentaóxido de Tántalo (Ta_2O_5) como material de alto índice y Dióxido de silicio (SiO_2) como material de bajo índice. La figura 62 muestra una vista lateral de un elemento de filtro óptico CWDM, incluyendo la capa de revestimiento de dieléctrico.

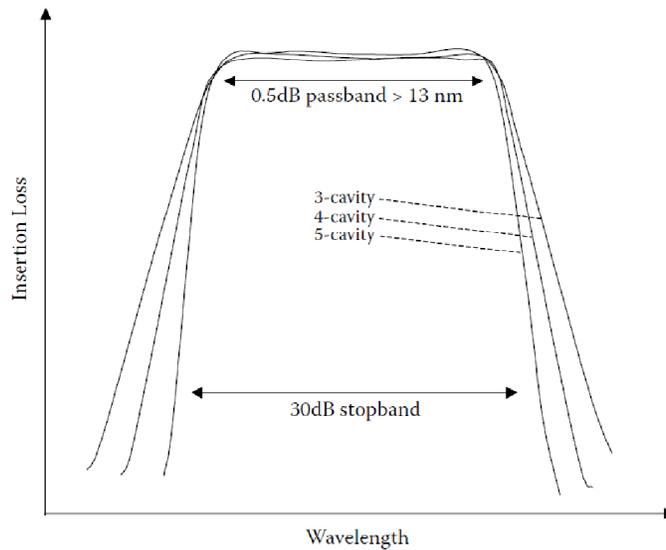
Figura 62 Estructura de revestimiento de capa de un filtro de película delgada de 3 cavidades



La capa de revestimiento típicamente consiste de un número de cavidades Fabry-Perot, las cuales determinan el desempeño del filtro óptico. La figura anterior muestra un ejemplo con tres cavidades. Cada cavidad tiene una “capa especial” para establecer un espaciado fijo y estable entre ambos reflectores. Los reflectores son hechos de una secuencia de capas de cuarto de onda de alto y bajo índice. El acople entre las diferentes cavidades es completado por medio de una capa de acople.

Las características de pasabanda de este tipo de TFF puede ser modificado cambiando el número de cavidades. La figura siguiente muestra una comparación de desempeño de un filtro de 3, 4 y 5 cavidades. Con el número de capas aumentado, es posible obtener pendientes de filtro paso a paso al mismo ancho del pasabanda. Esto resulta en un aislamiento de canal adyacente mejorado del multiplexor.

Figura 63 Un número de cavidades aumentado resulta en banda de detención pequeña o asilamiento de canal adyacente mejorado.



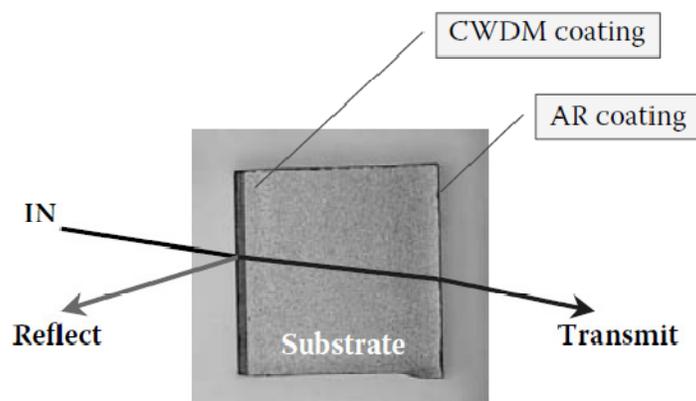
Para filtros CWDM típicos, la estructura de revestimiento dieléctrico tiene un grosor de alrededor de 30 a 40 μm y pueden ser claramente identificadas en un microscopio. El número de capas ópticas están en el rango entre 130 y 160 y puede ser tan alto como 200 capas para aplicaciones de alto desempeño.

La parte trasera de un elemento de filtro dieléctrico típicamente tiene un revestimiento de anti-reflexión de banda ancha (AR) para reducir las pérdidas de otra manera causadas por reflexión interna. Para filtros CWDM, tales como revestimientos AR necesitan desempeñarse sobre un rango espectral amplio, típicamente 1260 a 1620nm y tienen 60 a 80 capas de cuarto de onda.

La figura siguiente muestra una configuración simple de haz óptico yendo a través del elemento de filtro simple. Un Haz colimado (IN) entra en el substrato del filtro bajo cierto Ángulo de incidencia (AOI angle of incidence).

Dependiendo del concepto de empaquetamiento, los AOI pueden estar en el rango de menor que 2° hasta bien mas allá de 10° . El haz de transmisión experimenta una pequeña compensación debido al alto índice de refracción del substrato.

Figura 64 Definiciones para haz de salida y entrada, IN, Transmisión y reflexión.



Existen dos tipos básicos de filtros dieléctricos que son utilizados en dispositivos TFF, los cuales son nombrados por el desempeño espectral característico: (i) filtros rechaza banda y (ii) filtros pasabanda.

Los filtros rechaza banda tienen una sola pendiente o lado que separa el rango espectral de alta transmisión del rango espectral de alto bloqueo o reflexión. Los filtros rechaza banda se dividen en dos sub-grupos: (i) Filtros de paso corto y (ii) filtros de paso largo. El filtro de paso corto transmite la luz de las longitudes onda corta y refleja las longitudes de onda largas. Su contraparte es el filtro de paso largo que transmite las longitudes de onda largas. Un filtro de paso largo típico para 1310/1550nm es mostrado en la figura 65.

El camino de reflexión provee acceso al canal de 1310nm, donde el camino de transmisión provee acceso a la banda de 1550nm, incluyendo todos los canales CWDM desde 1471 a 1611nm.

Los filtros pasabanda son típicamente utilizados para proveer acceso a un canal individual CWDM. La figura 65 muestra una exploración espectral típica para un filtro pasabanda CWDM centrado a 1551nm. La luz que pertenece al canal CWDM a 1551nm pasara a través del elemento de filtro (transmisor) mientras que todas las demás longitudes de onda serán reflejadas.

Otros tipos más complejos de elementos de filtros pasabandas también son desplegados hoy en día en redes CWDM. La figura 67 muestra un elemento óptico de filtro llamado "4-skip-0". Sus características de paso de banda son diseñadas de tal manera que cuatro canales CWDM (1511 a 1571nm) son transmitidos por el elemento de filtro, mientras que los dos canales de la izquierda (1471 y 1491nm) y los dos de la derecha (1591 y 1611nm) aparecen en el camino de reflexión.

Este dispositivo es útil para conceptos "pago por crecimiento" y "mejora de servicio", tanto como DWDM sobre CWDM. Esto provee acceso a la banda C (1530 a 1565nm), la cual permite a los diseñadores de sistemas impulsar DWDM combinado con amplificadores de fibra dopados con erbio (EDFA) para luego aumentar el número de canales de transmisión.

Figura 65 Filtro rechaza banda (de paso largo) separando la ventana de 1310nm de la ventana de 1550nm.

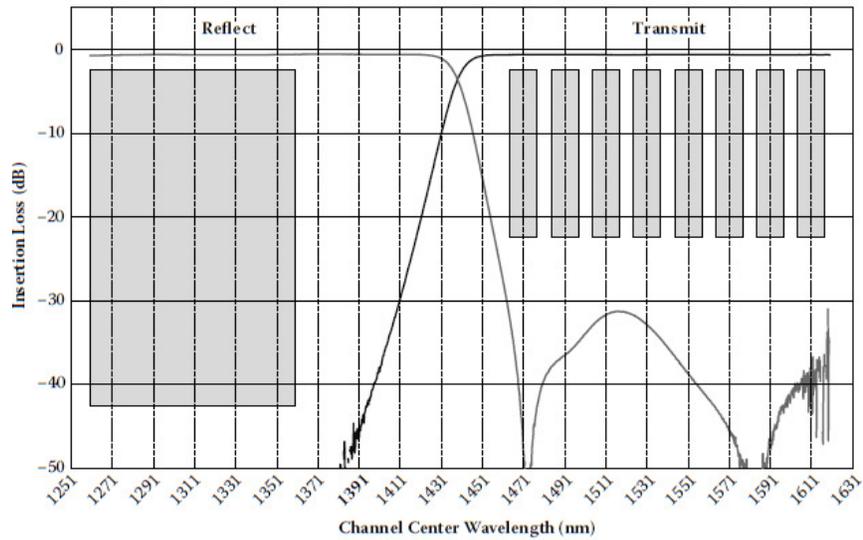


Figura 66 Ejemplo de un filtro pasabanda CWDM. El filtro transmite la luz al canal correspondiente de 1551nm mientras todas las demás longitudes de onda aparecen en el puerto reflector.

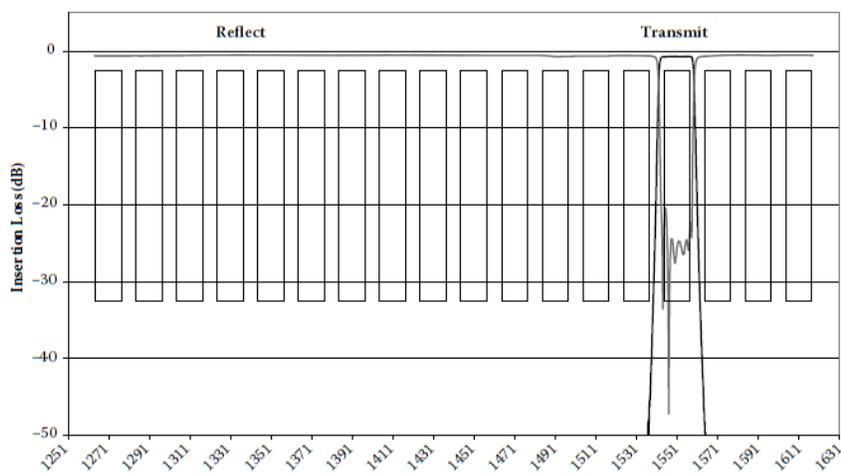


Figura 67 Ejemplo para un tipo especial de filtro pasabanda llamado “4-skip-0”.

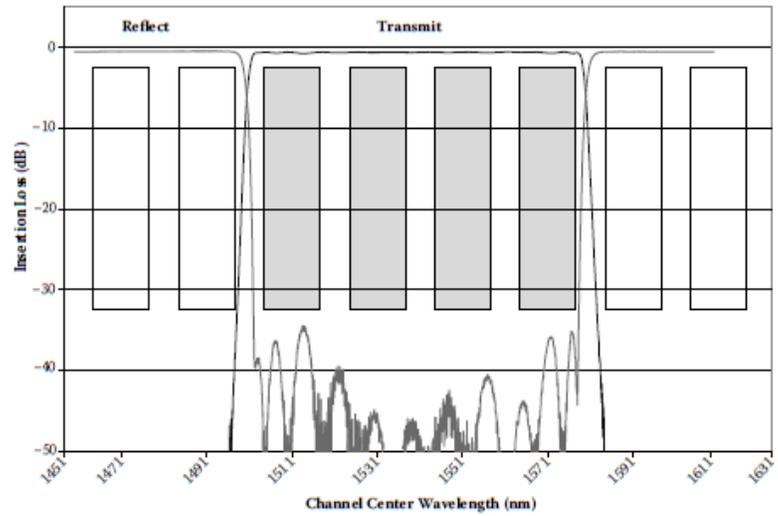
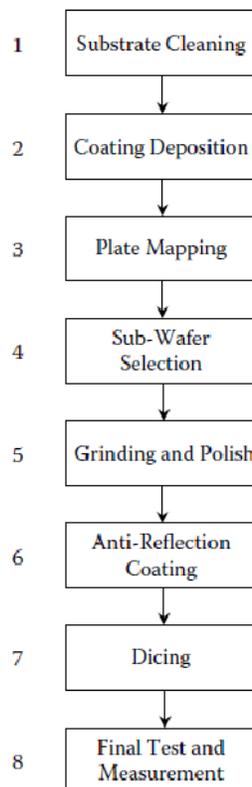


Figura 68 Diagrama de flujo para revestimientos de dieléctricos de película delgada.



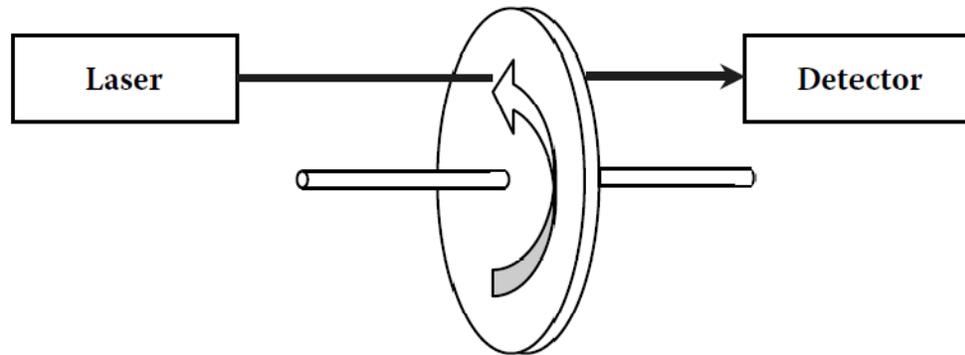
4.3.2. Pasos de los procesos de fabricación

Los procesos de fabricación para revestimientos de película delgada pueden ser mejor descritos en ocho pasos básicos de proceso. El diagrama de flujo de la figura anterior muestra los pasos de este proceso desde la limpieza del sustrato inicial hasta la inspección final.

Las láminas de vidrio tienen típicamente de 6 a 8 pulgadas de diámetro y un grosor de alrededor de 6 a 10nm. Estos sustratos de vidrio necesitan estar extremadamente limpios antes de ser revestidos. Limpieza muy compleja y procesos de enjuagado han sido desarrollados para cumplir con estos requerimientos. El proceso involucra utilizar manejo de láminas automatizado, agua altamente purificada y limpieza por ultrasonido. Sin embargo, el paso final del proceso de limpieza es usualmente inspección manual a cargo de un operador experimentado. Los sustratos son entonces puestos en la cámara de revestido donde el primero de dos procesos de revestimiento comienza.

Para monitorear el proceso durante los comienzos de la producción de filtros CWDM y DWDM, las cámaras típicamente utilizan sustrato de vidrio con frecuencia resonante que fue puesta a prueba por medio de excitación por ultrasonido. A medida que el proceso de deposición progresaba, la frecuencia de resonancia del sustrato cambio, dando al operador la indicación de que tan lejos estaban en el proceso de deposición. Sin embargo, las propiedades ópticas de la lámina se mantuvieron no claras hasta que el proceso de deposición estuvo completado y la lámina era removida de la cámara para caracterización.

Figura 69 Capacidad de monitoreo *in situ* de las cámaras modernas de revestimiento. Un haz de luz es dirigido a través del sustrato que gira para monitorear el progreso del proceso de deposición.



Las cámaras modernas están equipadas con análisis óptico *in situ*, la cual permite monitoreo del proceso de deposición, de este modo produciendo mucho mejor control del proceso. El principio fundamental es sencillo (Ver figura anterior): un haz óptico idealmente proveniente de una fuente láser fuera de la cámara es dirigido a través de las ventanas de la cámara sobre la lámina. Típicamente, el láser es ajustado a longitud de onda donde el revestimiento que está siendo procesado en la cámara tuviese alta transmisión y baja reflexión. La luz transmitida luego de pasar a través de la lámina es entonces dirigida hacia una foto detectora. El punto interruptor apunta entre el material de alto índice y el de bajo índice puede ser controlado por medio de decisión de circuito que compara la absorción actual de la estructura de capa con la curva teórica.

Dependiendo de la complejidad del revestimiento, no todas las aéreas de la lámina cumplen con los requerimientos de especificación objetivo. Para diseños de filtro muy demandantes, solamente un pequeño anillo alrededor del haz monitor podrían producir un producto utilizable. Por esta razón, la mayoría de láminas están sujetas a un proceso de mapeo de placa donde puntos individuales sobre la lámina son caracterizados para desempeño óptico.

Ésta aproximación provee un vistazo general del paisaje del desempeño producto a través de la lamina y determina cuales partes de la lamina son útiles para producción futura. Una limitante de este proceso es que las características ópticas del revestimiento pueden ser únicamente determinadas en transmisión, mientras que también para algunas aplicaciones, las características de reflexión, por ejemplo aislamiento de reflexión, son de interés.

Una breve evaluación de las características de reflexión de un espectro de transmisión puede ser obtenida por medio de la suposición de no absorción en el revestimiento.

Luego que el mapeo de placa es completado, la lámina es típicamente cortada en sub-secciones más pequeñas las cuales se espera que produzcan un buen producto. Estas sub-laminas son luego pulidas al grosor deseado según la especificación objetivo. Este paso también determina el Ángulo de la calza entre el revestimiento dieléctrico y la superficie trasera. Algunas tecnologías de empaquetamiento requieren de alrededor de 0° de calce, mientras que otras son diseñadas para un calce nominal de 0.7° para evitar interferencia multicanal dentro del substrato de vidrio. Con alto desempeño revestimientos anti reflexión (revestimientos AR) sobre la superficie trasera, estos efectos de interferencia pueden ser evitados.

Las sub-láminas tienen revestimientos en ambos lados, típicamente un revestimiento WDM sobre un lado y un revestimiento sencillo AR en el lado opuesto. El paso final del manejo es el proceso de corte donde las sub-láminas son cortadas del tamaño final. El corte es un arte y claramente va más allá de simplemente "cortar" la lámina. Un solo revestimiento CWDM tiene un grosor de alrededor de 30 a $40\mu\text{m}$; esto genera presión en un lado de la sub-lámina.

La velocidad de la cuchilla, profundidad de corte, etc determina por mucho la apariencia del filtro. El proceso de corte es luego seguido por un intenso proceso de limpieza para remover residuos de los pasos anteriores. Los filtros individuales son situados en paquetes de gel o arreglos de paquetes similares en preparación para el paso final.

La inspección final y encapsulamiento es típicamente hecho con prueba automatizada y equipo de medición. Una maquina que recoge sitúa un filtro sobre un pivot suspensor de montaje de filtro. El filtro necesita ser calibrado en ángulo para garantizar que el recubrimiento CWDM es probado a 0° AOI.

4.4. Soluciones de empaquetamiento de filtros de película delgada

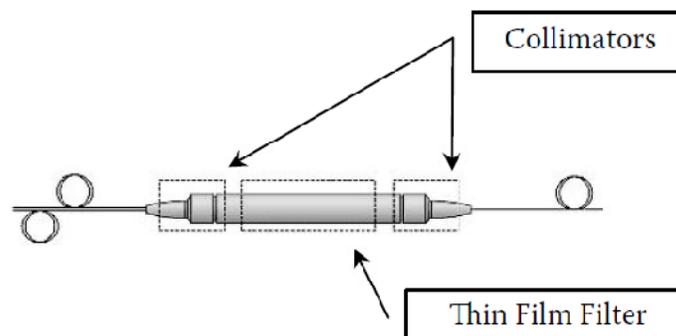
Durante los últimos años, muchos diferentes tipos de conceptos de empaquetamiento para los TFF han sido desarrollados e introducidos en el mercado. A continuación una breve descripción de los diferentes conceptos de empaquetamiento, comenzando con la aproximación básica para encapsular elementos de filtro individuales.

4.4.1. Empaquetamiento de 3 puertos en cascada, multi-puertos, y empaquetamiento de vidrio

4.4.1.1. Empaquetamiento de “3 puertos”

La figura siguiente muestra un empaquetamiento típico de 3 puertos. El nombre “3 puertos” se deriva del número de puertos o colas de cerdo que estos dispositivos tienen. En la mayoría de casos, estos dispositivos están entre 35 y 50nm de largo, dependiendo de los requerimientos para relajación de tensión para proteger las colas de cerdo. Los diámetros de empaquetamiento están entre 5 y 6mm. En cualquier caso, estos dispositivos tendrán fibras en ambos lados del empaquetamiento. Como se muestra en la figura siguiente la luz proveniente del puerto de entrada o puerto “común” de cola de cerdo entra en una contera dual de fibra, la cual es un elemento estructural que mantiene dos fibras ópticas a cierta distancia una de la otra. La luz que proviene del puerto común entra en un lente de índice gradiente (GRIN) el cual colima el haz. Este sub-ensamble de la contera de fibra dual y un lente GRIN es llamado “colimador dual de fibra”.

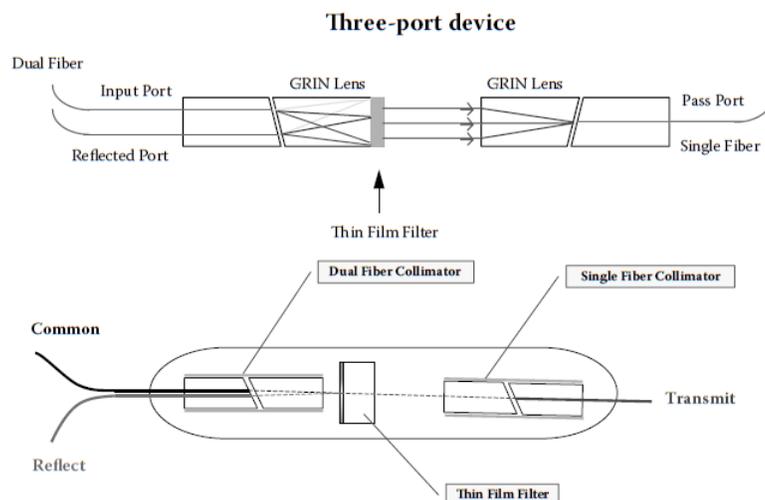
Figura 70 Un empaquetamiento típico “3 puertos”



El haz emitido del puerto común es dirigido hacia el dieléctrico del filtro que esta cercanamente montado en frente del colimador dual de fibra. Todas las longitudes de onda reflejadas por el revestimiento dieléctrico viajan de regreso hacia el colimador dual de fibra, mientras el lente GRIN enfoca la luz en la segunda fibra en el ensamble de la contera. Debido a que estos puertos recolectan toda la luz reflejada, es a veces llamado “puerto reflector”. Una de las ventajas clave de este ensamble es que los diseños permiten muy bajo AOI, típicamente entre 1.8 a 2.8°. A estos bajos ángulos, la variación de pérdida entre s- y luz polarizada-p que está implícita por el revestimiento dieléctrico es muy baja. Como consecuencia, el dispositivo 3 puertos tiene baja pérdida dependiente de polarización (PDL) y no muestra sensibilidad a la luz polarizada.

La luz que pasa el filtro dieléctrico es recolectada por un segundo colimador que está alineado en opuesto al puerto común del colimador dual. Este segundo colimador consiste de un lente GRIN y una fibra y es por la misma razón referida como “colimador de una fibra”. Debido a que la luz es transmitida a través del filtro, este puerto es llamado “puerto transmisor”.

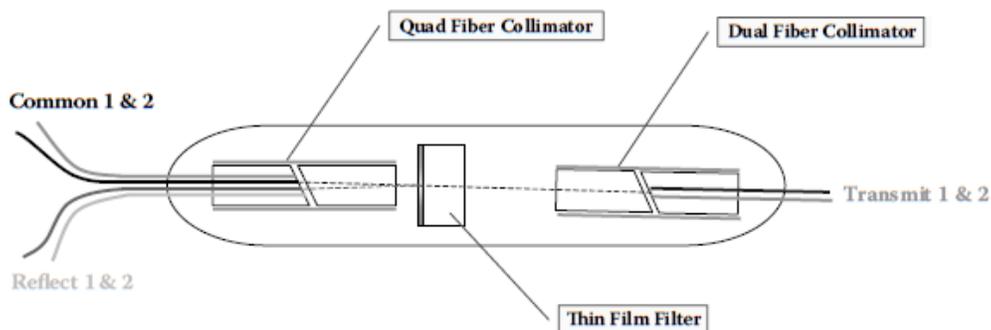
Figura 71 Elementos ópticos clave de un empaquetamiento de 3 puertos.



4.4.2. Multi-puertos

La figura siguiente muestra el concepto detrás de la idea de utilizar el mismo filtro varias veces, por ejemplo, como un OADM, para una longitud de onda en un nodo de red. El colimador dual de fibra ha sido reemplazado por un colimador cuádruple de fibra y el colimador de fibra ha sido cambiado a un colimador dual. Con este concepto, dos caminos ópticos independientes han sido superpuestos para utilizar el mismo TFF. La densidad de empaquetamiento es duplicada, es decir, un dispositivo reemplaza la funcionalidad de dos dispositivos “3 puertos”.

Figura 72 Dibujo conceptual de un dispositivo de 6 puertos; el mismo filtro es utilizado en dos “3 puertos” compartiendo el mismo empaquetamiento.



Esta es una excelente estrategia de diseño para incrementar la densidad del canal y reducir costo de dispositivo por medio del uso de filtro compartido. Esto es posible donde el multiplexor y demultiplexor están en cercana proximidad uno del otro. Sin embargo, un diseño cuidadoso del empaquetamiento se requiere para tomar ventaja completa de este concepto.

Algunas consideraciones se necesitan darse a la luz dispersa viajando dentro del empaquetamiento. Un ejemplo de fuente puede ser un transmisor de alta potencia que esta añadido a la red utilizando la función de inserción del OADM mientras un receptor altamente sensitivo es conectado al puerto de extracción del dispositivo. Debido a que la función de extracción y la función de inserción comparten el mismo empaquetamiento físico en este diseño “6 puertos”, la directividad se convierte en un factor sumamente importante.

4.4.2.1. Empaquetamientos de vidrio

El concepto de un empaquetamiento de vidrio sigue la misma aproximación de diseño que un empaquetamiento 3 puertos, mientras que todos los materiales han sido cambiados a vidrio. El concepto de todo de vidrio se enfoca en un inconveniente fundamental de los primeros empaquetamientos 3 puertos: el desajuste del coeficiente de expansión termal de los diferentes materiales (latón, soldadura, vidrio, adhesivo, etc.), el cual ha sido visto como la raíz de la causa de la sensibilidad de la temperatura de los dispositivos.

4.4.2.2. Módulos CWDM

Con el objeto de construir dispositivos multi-canal como los multiplexores y demultiplexores de 8 canales, varios dispositivos 3 puertos necesitan estar conectados en cascada y con empalmes ópticos. Esto hace necesario proveer alojamiento secundario que mantenga todos los 3 puertos requeridos, empalmes y algunas veces separadores también.

El diseño de tal encapsulamiento secundario se espera pase el nivel de resistencia de nivel de módulo y confiabilidad de prueba acorde a Telcordia GR-1221. Tres elementos críticos son: (i) la técnica de montar los 3 puertos y los protectores de empalmes para soportar los shocks mecánicos y la prueba de vibración, (ii) asegurar que el mínimo de radio de doblez de fibra se cumpla y (iii) la provisión de fibra a través es diseñada para cumplir con retención y tensión lateral requerida.

Dependiendo de la complejidad del sistema y el número de canales, el tamaño de un módulo de 8 canales CWDM que utiliza dispositivos 3 puertos concatenados es aproximadamente 100x80x10mm³.

Otro aspecto interesante es que la inserción de pérdida incrementa para cada canal en la secuencia de canal está dando diferentes condiciones de lanzamiento de potencia para el canal individual. Esta secuencia de inserción de pérdida ha sido calculada para un MUX y un DEMUX en la figura anterior. En el multiplexor en el lado del receptor, este efecto puede ser compensado por medio de reversión de la cascada de los canales relativos del multiplexor.

Esta aproximación para optimizar el presupuesto de potencia de un enlace óptico es posible por medio de apareo de un multiplexor con un demultiplexor. La mejora técnica hace necesario distinguir claramente entre multiplexor y demultiplexor e identificarlos por medio de diferente número de partes.

4.5. Amplificadores para CWDM

Un buen caso se puede obtener que el progreso hecho en los sistemas de telecomunicaciones ópticos de la última década haya sido primordialmente debido a la introducción de la amplificación óptica, y más específicamente por el amplificador de fibra dopado con erbio (EDFA). Este desarrollo permitió que las distancias de transmisión se multiplicaran y para que las capacidades de línea aumentaran de magnitud, gracias a DWDM. Hoy en día, es posible transmitir canales DWDM por medio de un enlace de fibra a lo largo de muchos kilómetros. Amplificadores de línea situados cada 80km más o menos, regeneran el nivel de señal para todos los canales simultáneamente.

La distancia de transmisión ya no es limitada por la potencia de la señal sino por el ruido del amplificador y la acumulación de impedimentos de transmisión tales como dispersión cromática y ausencias de linealidad de fibra. De esta manera, los amplificadores ópticos han cambiado radicalmente la economía de la transmisión óptica.

Anteriormente, un regenerador (básicamente un par transmisor receptor) era necesario para cada canal de longitud de onda en cada sitio de regeneración. Actualmente, un solo amplificador puede ser utilizado por varios canales al mismo tiempo, reduciendo dramáticamente el costo por canal. La mayoría, sino todos, los sistemas modernos DWDM utilizan amplificación óptica o al menos están listos para utilizarla. No tanto los sistemas CWDM.

Los sistemas CWDM aun no han visto la introducción de amplificación, al menos no los sistemas instalados, aunque algunas otras técnicas han sido aplicadas.

Esto resulta de varios factores, tales como las relativas cortas distancias de transmisión usualmente requeridas o la no disponibilidad de amplificadores apropiados.

4.5.1. Principios de la amplificación óptica

Un amplificador óptico duplica los fotones entrantes por medio de un proceso conocido como emisión estimulada. Este es el mismo proceso responsable de la regeneración de luz en los láser. Un amplificador ideal incrementaría solamente la fuerza de la señal sin ningún efecto secundario desventajoso y funcionaria como un tipo de desajuste de pérdida por distancia y pérdida por componente. Sin embargo, en realidad, el proceso de emisión espontánea, el cual está enlazado inseparablemente con la emisión estimulada, da lugar a ruido óptico que degrada la señal.

4.5.1.1. Tipos de amplificadores ópticos

La idea de amplificación en sistema CWDM es bastante joven pero la amplificación ha sido utilizada en comunicaciones ópticas por varios años. Los tipos de amplificador más conocidos son los EDFA, el amplificador óptico de semiconductor (SOA Semiconductor Optical Amplifier) y el amplificador Raman.

4.5.1.1.1. EDFA

Es el caso más conocido de un amplificador de fibra dopado con tierra. Una fibra es dopada con raros elementos de tierra, los cuales son bombeados ópticamente.

La luz bombeada excita los raros átomos de tierra y un fotón pasante puede producir emisión estimulada cuando su longitud de onda corresponde a la diferencia de energía entre los niveles apropiados de energía del átomo.

El erbio se ha vuelto muy popular como elemento de dopaje debido a que sus niveles de energía son tales que la amplificación ocurre en la ventana de baja pérdida de la fibra estándar alrededor de 1550nm. La banda de amplificación estándar para un EDFA, en el rango aproximadamente desde 1530 hasta 1565nm, se ha vuelto conocida como la banda C. Escogiendo apropiadamente niveles de dopaje y bombeo, el rango de longitud de onda de 1565 hasta aproximadamente 1610nm, conocida como la banda L, puede ser cubierto. Incluso un amplificador de banda S se ha demostrado, proveyendo 20nm de ganancia centrada alrededor de 1500nm.

A un EDFA se le puede bombear a 1489 ó 980nm, longitudes de onda que ya están accesibles utilizando semiconductores láser. El EDFA más simple consiste de una pieza de fibra dopada de erbio (típicamente decenas de metros), una bomba láser de 980nm o 1480nm y un acoplador dependiente de longitud de onda para multiplexar la señal y bombear longitudes de onda. Los otros elementos raros pueden ser utilizados para amplificar bandas de longitudes de onda fuera de las bandas L y C.

Sin embargo, muchas de estas no son fácilmente incorporadas en fibra de sílice estándar o sufrir de otras desventajas tales como esquemas de bombeo más complicado o dinámica de ganancia más veloz, lo cual los hace imprácticos para su utilización en CWDM.

4.5.1.1.2. SOA

La estructura de un SOA es muy similar a la de un semiconductor láser. En donde amplificación en el EDFA ocurre a través de emisión estimulada por átomos de erbio excitado, recombinación de electrones en el SOA y agujeros en las bandas de conducción valencia del semiconductor dan lugar a emisión de fotones. La longitud de onda emitida corresponde a la energía de ese espacio de banda del material semiconductor.

Un SOA típico, como un láser semiconductor, consiste de un chip de ganancia que contiene una guía de onda activa, con fibras acopladas al él en ambos lados. Uno o más lentes adaptan el modo de la fibra a un modo mucho más pequeño de guía de onda. Debido a que la ganancia por unidad de longitud es muy alto comparado con la ganancia del EDFA, el chip puede llegar a ser muy pequeño (típicamente ~ 1mm).

El chip de ganancia contiene una hetero estructura de semiconductor que confina ambas luz e inyección de corriente en el área activa. La inyección de corriente excita los electrones en la banda de conducción, lo cual da lugar a emisión de luz. En un láser, las facetas del dispositivo proveen realimentación óptica, la cual lleva a generación coherente de luz. En un SOA, por otro lado, la reflexión en las facetas es suprimida utilizando revestimientos de anti reflexión y

teniendo la franja de ganancia no al ángulo preciso con respecto de las facetas. De este modo, la señal inyectada por la entrada de fibra experimenta ganancia durante su solo paso a través de la guía de onda activa, hasta que alcanza la salida de fibra.

En un SOA, el medio de ganancia comúnmente utilizado es fosfato arsénico de galio e indio (InGaAsP). Este material tiene un espacio de banda correspondiente a una longitud de onda de emisión de 0.9 a 1.65 μ m, dependiendo de la composición, la cual puede ser suavemente variada desde InP binario hasta InGaAs. Esto significa que, en principio, el rango entero de longitud de onda utilizado para CWDM es accesible por medio de la selección apropiada de la composición de capa activa.

4.5.1.1.3. Ramán

Esta amplificación sucede en una fibra óptica pero no depende de la presencia de dopantes de tierra. En vez de esto, está basada en interacción no lineal entre la señal y la bomba óptica de alta potencia. Esparcimiento Raman estimulado sucede cuando un fotón de señal causa esparcimiento inelástico de un fotón de bomba de alta energía, produciendo otro fotón de señal, mientras que el exceso de energía es disipado por fonones (calor). En fibra óptica, la frecuencia de desplazamiento hacia abajo es aproximadamente 13THz, lo cual significa que una bomba de aproximadamente 1450nm se requiere con objeto de amplificar la banda C.

Esta amplificación ha demostrado ser de beneficio para transmisión DWDM debido a que la fibra misma puede ser utilizada como medio de ganancia. Debido a que a la fibra se le puede bombear de una manera contra propagación, la señal experimenta ganancia muchos kilómetros antes que esta alcanza el sitio de amplificación, lo cual puede mejorar significativamente la figura de ruido aparente (NF Noise Figure) referenciada a ese sitio.

A menudo, al amplificador Raman se le refiere como amplificador distribuido, mientras que el EDFA y el SOA son más típicamente amplificadores de “elemento amontonado”. La amplificación Raman también puede proveer ganancia de banda ancha por medio de la selección apropiada de un grupo de longitudes de onda bombeadas.

4.5.2. Retos para amplificar CWDM

Un reto fundamental y uno de ingeniería están asociados con la idea de tener amplificación en sistemas CWDM. El reto de ingeniería es cubrir un ancho de banda amplio que ha sido necesario para amplificación DWDM. Varias aproximaciones están disponibles para el tipo de amplificadores en discusión. El reto fundamental es el del ruido de banda ancha hacia el receptor. En un sistema DWDM, ruido óptico hacia el receptor es ampliamente rechazado por un filtro pasabanda angosto de modo que únicamente término relevante de ruido es ruido de golpe espontaneo de señal. Pero la mera esencia de CWDM es el registro de longitud de onda relajada, lo cual necesita el uso filtros en realidad amplios. El resultado es que el ruido óptico en un ancho de banda de alrededor de 13nm alcanza el receptor, haciendo el término de ruido de golpe espontaneo-espontaneo no despreciable.

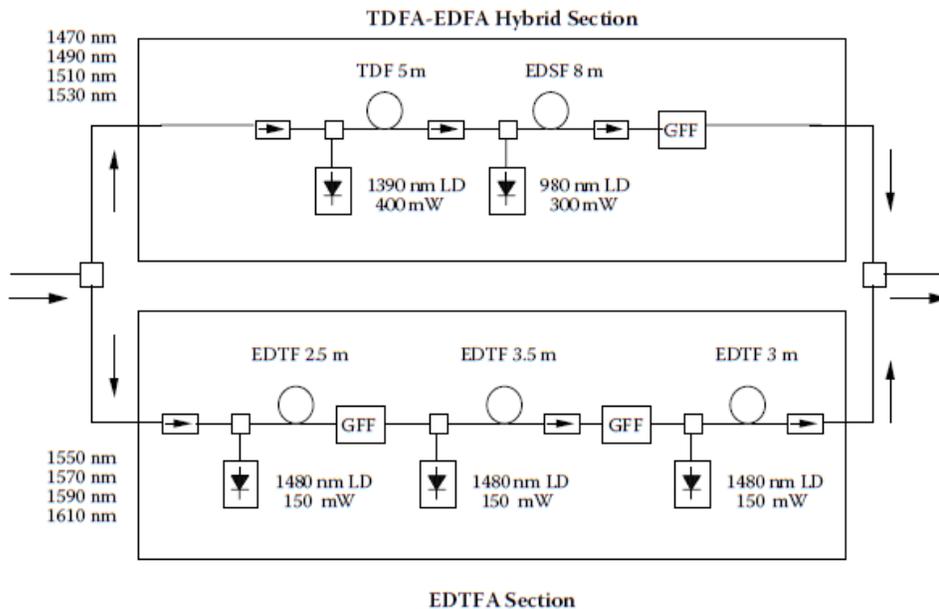
4.5.3. Amplificadores CWDM con dopado basado en fibra

Con objeto de amplificar un número apreciable de canales CWDM en una fibra dopada con tierra rara, un ancho de banda significativamente más ancho que la banda usual de 1530 a 1565nm es necesario. El primer paso en esta dirección era utilizar un amplificador separador de banda para la banda C y L. Debido a que a baja inversión la ganancia en fibra dopada de erbio cambia a longitudes de onda largas, la banda L (1565 a 1610nm) era amplificado por medio de un EDF más largo bombeado para tener menor ganancia por metro.

El siguiente paso es utilizar otros elementos para aumentar la ganancia de banda. Una cascada de un TDFA y un EDFA tienen la habilidad de amplificar cuatro canales CWDM desde 1460 hasta 1540nm. Un esquema de bombeo apropiado puede incluso extender el ancho de banda hasta 100nm.

Combinando esta técnica con erbio en telurito de fibra que puede amplificar los cuatro canales más altos permite la amplificación de ocho canales CWDM. La figura siguiente muestra la configuración de tal amplificador. Consiste de dos amplificadores de banda que están combinados con acopladores de multiplexión por división de longitud de onda (WDM). La primera mitad es una cascada de un TDFA y un EDFA, los cuales velan por la amplificación de la banda 1460 a 1540nm, mientras que la segunda mitad es un amplificador de fibra dopado con erbio y telurito (EDTFA) que amplifica la banda de 1540 a 1620nm.

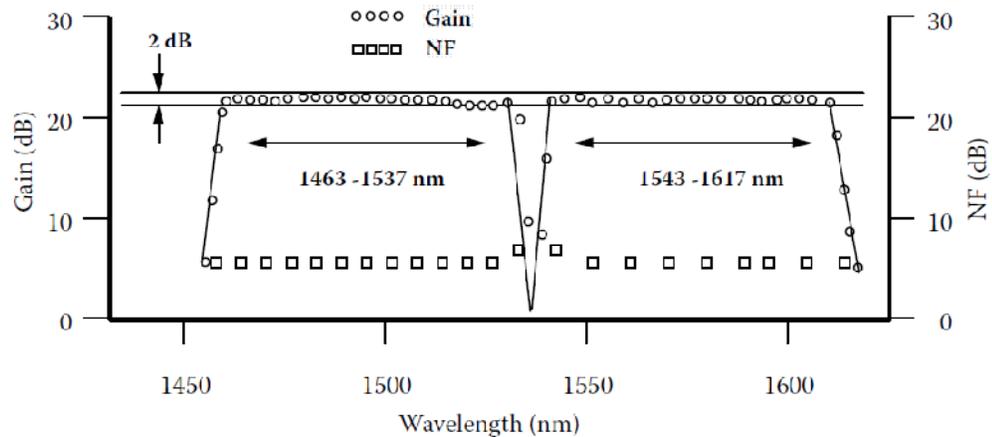
Figura 73 Configuración de amplificador híbrido EDFA – TDFA: las dos longitudes de onda más cortas son amplificadas por el TDFA mientras que las cuatro restantes son amplificadas por el EDFA.



Como lo muestra la figura siguiente, esta combinación provee una ganancia realmente plana de alrededor de 22dB sobre 160nm, buena para 8 canales CWDM, y una NF menor que 8dB.

Este es de alta calidad pero también una solución costosa, a medida que el amplificador consiste de 5 fibras dopadas, cinco láseres de bombeo y tres filtros de ganancia plana, todos empalmados juntos.

Figura 74 Ganancia luego de ecualización y características de NF de un amplificador híbrido EDFA – TDFA.



4.5.4. Amplificadores CWDM basados en semiconductor

4.5.4.1. Especificaciones de los dispositivos

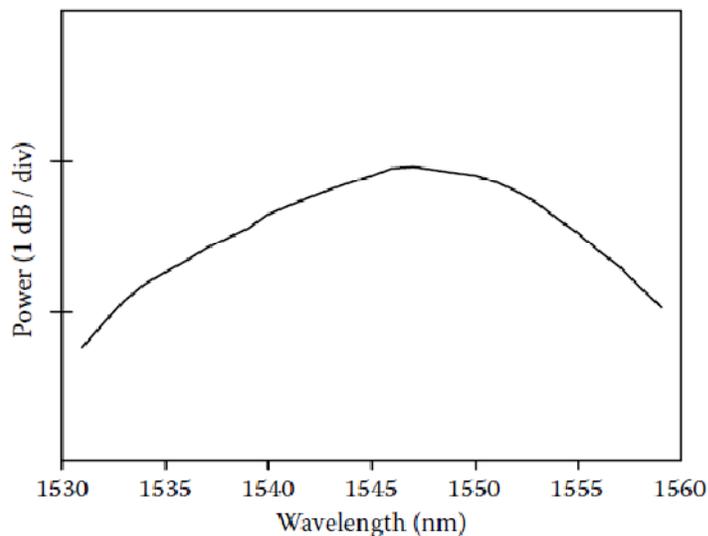
El SOA es naturalmente más apropiado para amplificar canales CWDM debido a su amplio ancho de banda. La figura siguiente muestra la cobertura de la banca C de un SOA típico, mostrando que la variación de ganancia es menor que 1 dB sin ningún tipo de filtro de ganancia plana. La ganancia continúa cayendo suavemente en ambos lados y anchos de banda de 3dB de ganancia de hasta 80nm son comunes.

La ubicación del pico de ganancia es fácilmente calculada por medio del ajuste de la composición de la capa activa.

La mayoría de SOA tienen compuesto de capa activa $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ya sea del material en bruto o de los pozos de cuantos. Una relación definida existe entre x y y para encajar con la rejilla el material cristalino substrato InP . De hecho, pequeñas variaciones de la condición encajamiento de rejilla ayudan a mejorar las propiedades de ganancia de los pozos de cuantos y afinar la independencia de polarización del amplificador. Esto deja un grado de libertad, el cual sirve para ajustar la posición de la banda de ganancia.

En la práctica, y con bastante lógica, cualquier longitud de onda que puede ser generada por un láser InGaAsP puede ser amplificada por un SOA de InGaAsP . Con un ancho de banda de ganancia de 80nm , cuatro longitudes de onda CWDM, cada una ocupando una ranura de 20nm , pueden ser cubiertos de modo que el espectro completo de 16 canales CWDM pueden ser amplificados por medio de un arreglo de cuatro SOAS diseñados apropiadamente.

Figura 75 Espectro de emisión espontánea amplificada de un SOA, el cual típicamente tiene una forma de parábola suavizada.



El ancho de banda del SOA puede ser enriquecido empleando diseños de capa activa más avanzados. Se ha demostrado que utilizando pozos de cuantos un ancho de banda de ganancia de casi 100nm se puede alcanzar. Este amplificador consiste de dos estructuras de pozos de cuantos separadas por una barrera de capa pequeña. La sección plana en el centro es considerablemente ensanchada con respecto del espectro de la figura anterior y en ancho de banda de 3dB se extiende desde 1515 hasta 1615nm.

Figura 76 Medida de las ganancias TE y TM y PDG de un chip SOA utilizando una estructura de pozo de cuantos acoplada con ganancia de banda ancha.

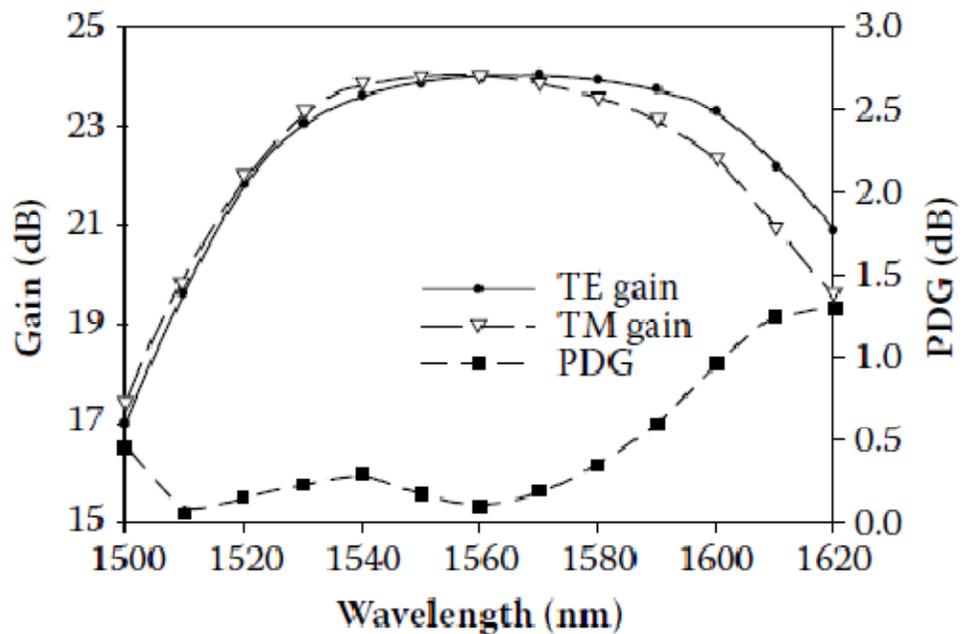
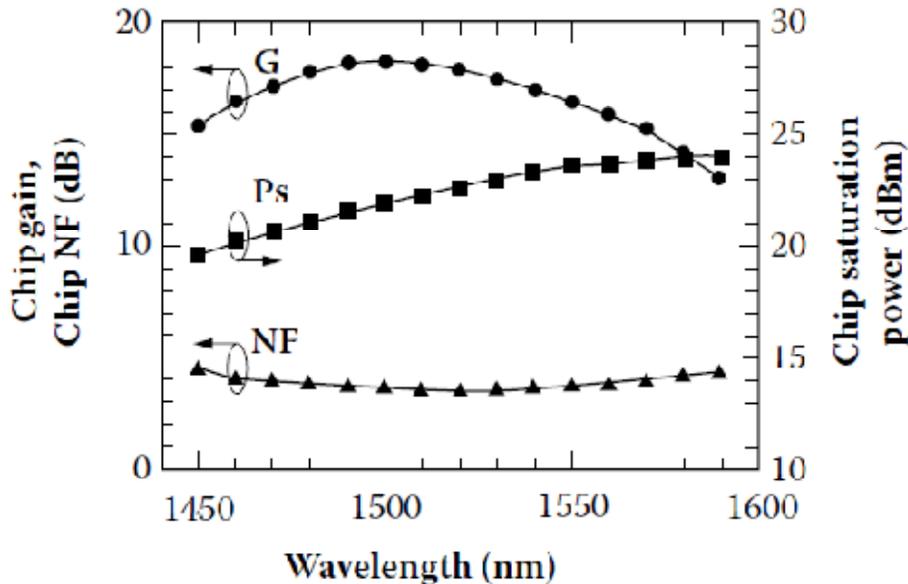


Figura 77 Dependencia de ganancia, saturación de potencia de salida y NF sobre una señal de longitud de onda. Estos parámetros son referenciados a las facetas de chip.



4.5.4.2. Transmisión por fibra utilizando SOA

Amplificación de cuatro canales en la banda de 80nm y 3 dB de un SOA ordinario es la proposición más obvia posible integrando múltiples SOA con filtro de banda planar. Pero incluso en un espectro de 160nm, suficiente margen está disponible para mostrar mejora para un sistema de 8 canales utilizando un solo SOA.

Para ver que la extensión de línea con un SOA no tiene que estar limitada a un espacio adicional, referirse a la figura 78, donde una cascada de nueve SOA es mostrada. Este experimento demuestra transmisión 8x10Gb/s DWDM sobre seis espacios de fibra añadiendo hasta 240km.

Notar que en transmisión CWDM con láseres directamente modulados sin compensación de dispersión, este alcance sería prácticamente limitado por la dispersión acumulada, a menos que las técnicas de compensación sean aplicadas luego de demultiplexión (debido a que la dispersión acumulada para las longitudes de onda más corta y larga sean ampliamente diferentes).

Figura 78 Transmisión de 8 canales WDM modulados a 10Gb/s a lo largo de 6 espacios de 40km de fibra estándar utilizando un total de nueve SOAs.

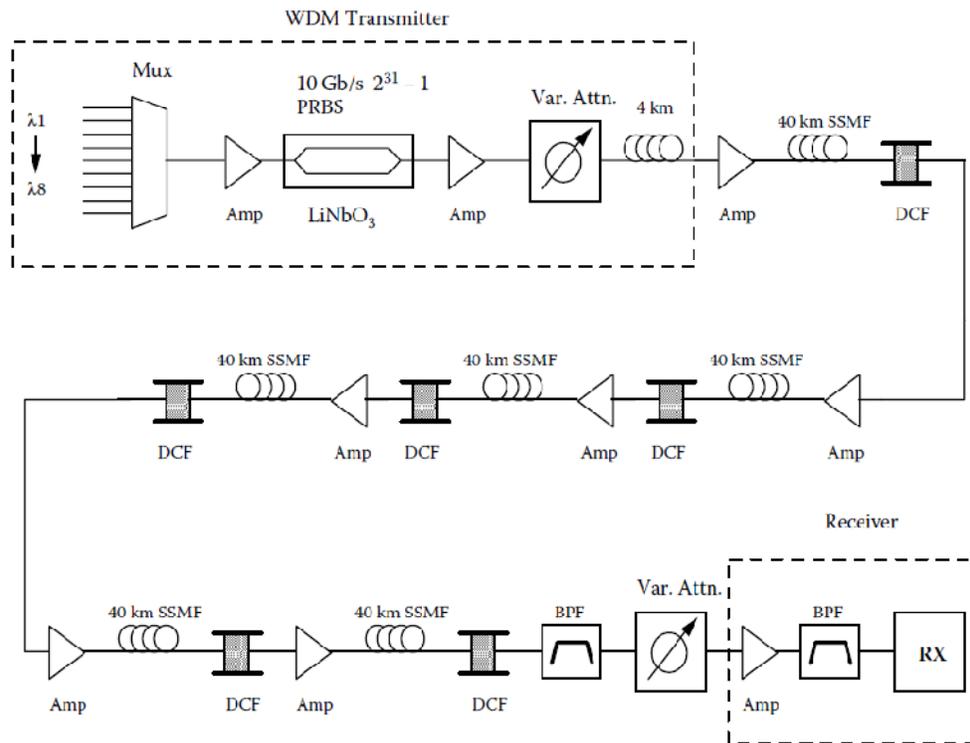
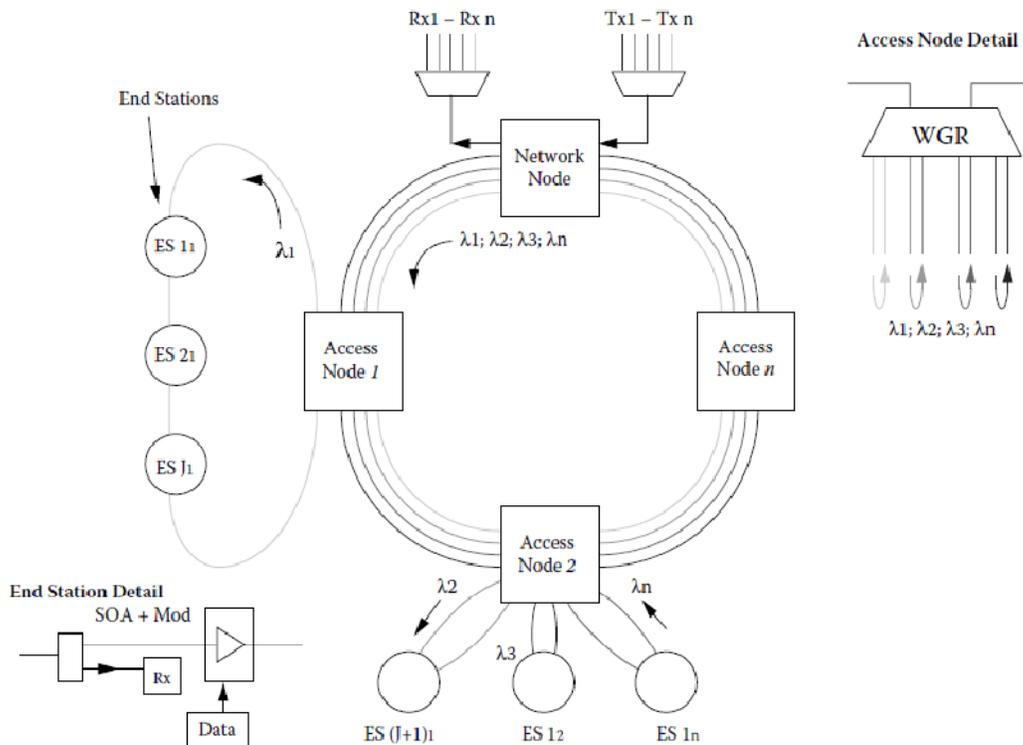


Figura 79 Arquitectura de acceso con SOA en los nodos de usuario final. Los SOA proveen la amplificación necesaria en el anillo metro y doble a como moduladores para subida de datos.



Utilizar el SOA no solo como amplificador, sino como elemento funcional, hace posible arquitecturas como la de la figura anterior: El SOA es utilizado como modulador de datos con las longitudes de onda provistas desde principio a fin. Esto hace que las estaciones finales menos específicas en longitud de onda, a medida que un solo SOA puede modular cualquier grupo de ocho longitudes de onda.

Un segundo ejemplo de transmisión CWDM utilizando SOA es transmisión inalámbrica sobre fibra utilizando una troncal CWDM que alimenta un anillo como arquitectura de transporte.

Un SOA es utilizado bidireccionalmente para amplificar la señal de la troncal desde la estación central alimentando el anillo, así como amplificar señales originándolas desde estaciones inalámbricas base en el anillo de regreso a la estación central.

Finalmente, debido a que los SOA tienen dinámica rápida, son apropiados como elementos de nano conmutación en conmutación de paquetes.

4.5.5. Amplificadores híbridos y Raman

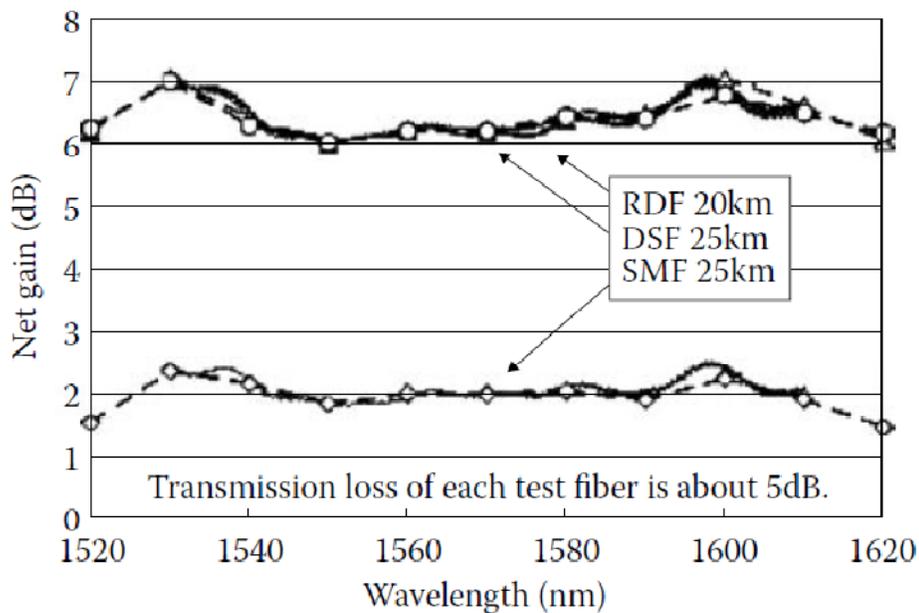
El erbio puede ser utilizado para ampliar la ganancia más allá de la banda C en dirección de la roja (banda L) pero los EDFA de banda S tienen ancho de banda pequeño (un solo canal CWDM) y no están comercialmente disponibles. Raman, por otro lado, es capaz de entregar ganancia en esta banda sobre un amplio ancho de banda, gracias a la propiedad que la ganancia se mueve con bombeo de longitud de onda.

La misma propiedad permite fabricación de amplificadores de este tipo de ultra banda utilizando únicamente fuentes múltiples de bombeo. La figura siguiente muestra un perfil de ganancia plana de este modo alcanzado sobre 100nm. La planeza es mejor que ± 0.5 dB, completada con ubicación asimétrica de canales de bombeo y sin ningún filtro de ecualización de ganancia.

Una aproximación un poco más práctica inicia con solo dos longitudes de onda bombeadas para amplificar cuatro canales CWDM, permitiendo mejorar el amplificador con más bombas láser cuando más señales de longitud de onda tienen que ser amplificadas.

Alternativamente, una aproximación de SOA híbrido puede ser seleccionada. Menor bombeo de potencia Raman es necesaria debido a que el monto de ganancia es proveído por el SOA y el amplificador Raman sirve para bajar la NF de la combinación y para posteriormente aplanar la ya plana ganancia del SOA (La misma aproximación es utilizada por los EDFAS híbridos en larga distancia).

Figura 80 Perfil de ganancia plana (100nm centrada sobre la banda L y C) obtenida por una fibra de bombeo Raman utilizando una fuente multi longitud de de onda.



5. APLICACIONES CWDM Y COMPARACIÓN CWDM CON DWDM

5.1. Red metro

CWDM ya se mostraba en redes de acceso metro en 1999 previo a que el último y final estándar ITU-T G694. 2 tomara efecto en el 2002. El segmento metro era un mercado de telecomunicaciones atractivo que estaba creciendo rápidamente y necesitaba una solución de bajo costo tipo “plug and play”. Lo que hizo a la red metro especialmente interesante era que era rica en una variedad de protocolos de comunicación que evolucionaron todos en forma paralela a medida que la demanda de ancho de banda por parte de los clientes creció. Más allá, la red metro es un objetivo de lucro para proveedores de servicio quienes proveen el ancho de banda rápidamente al medio para grandes empresas.

La red de larga distancia había sido construida y muchos usuarios en ciudades alrededor de aéreas metropolitanas deseaban acceso a internet de inmediato. DWDM era la primera consideración para proveer la capacidad deseada. DWDM era la tecnología comprobada para construir la sección de larga distancia de la red y por lo tanto la primera opción obvia. Sin embargo, DWDM se mostro muy costosa, incluso para cortas distancias sin amplificadores. Entonces CWDM fue introducida como una nueva posible solución de transmisión de bajo costo para múltiples longitudes de onda. Proveedores de servicio pequeños reconocieron CWDM como la respuesta por encima de DWDM.

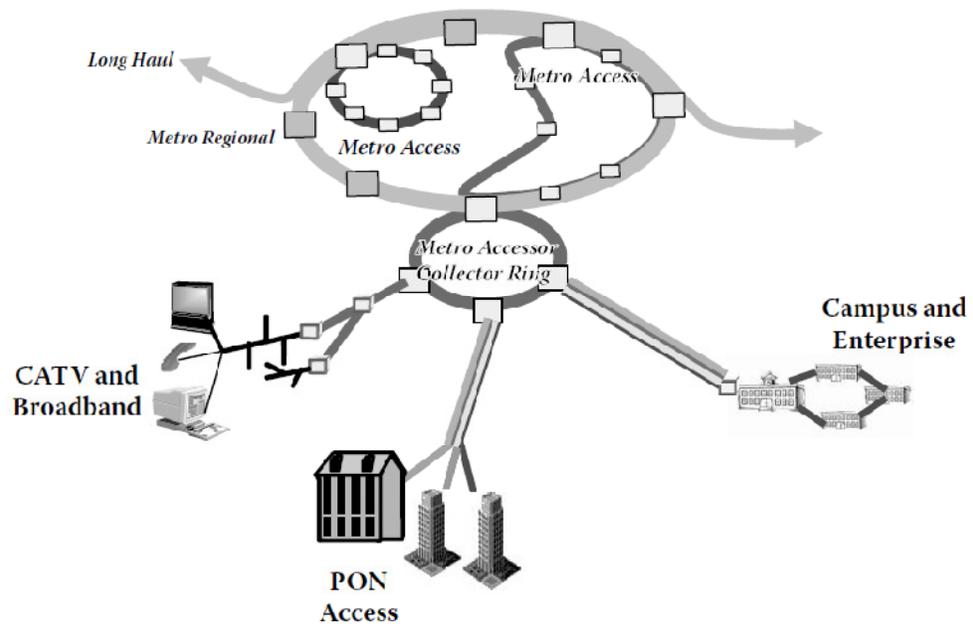
CWDM fue conocida como la manera “del pobre” para construir una anillo metro. La validación del mercado CWDM llego pronto cuando multitudes de vendedores aparecieron con transceivers desconectables CWDM y equipo óptico pasivo.

5.1.1. Definición de red metro

Para entender la red metro, una figura general de la red es útil. La entera red de fibra está hecha de tres grandes segmentos. La figura 81 muestra estos tres grandes segmentos de la red de fibra hoy en día: Larga distancia, núcleo o regional metro y red de acceso metro.

Cada segmento es definido por varias distinciones: distancia, número de longitudes de onda, rata de datos, topología, protocolos, número de puntos de acceso (nodos) o clientes inmediatos y equipo. Más allá de esto, cada área de la red de fibra óptica tiene su propio set de requerimientos especiales.

Figura 81 Red de fibra óptica con larga distancia, metro regional y acceso metro.



Las Redes de larga distancia extienden el tráfico punto a punto a distancias mayores de 400km, llevando 64 hasta 160 longitudes de onda DWDM. El equipo utilizado puede consistir de plataformas SONET que acarrearán datos de 10Gb/s hasta 40Gb/s. El camino de los datos requiere de amplificadores para regeneración de la señal óptica de distribuidor a distribuidor. Hoy en día la red de larga distancia ha sido construida con y se espera crecimiento bajo a moderado en el futuro.

Redes Core, también conocidas como regionales, son la médula espinal de la red de fibra. Estas redes están hechas de anillos con mallas que llevan desde 16 hasta 32 longitudes de onda DWDM y conectan las oficinas centrales. El tráfico en la Core es próximo a ser llevado a cualquiera de las rutas fuera de cada ubicación, por lo tanto requiriendo que la red se configure como malla. Las distancias en la Core son de 50 a 200km.

El equipo utilizado consiste de plataformas SONET o Ethernet que llevan los datos desde 2.5 hasta 10Gb/s. Recientemente, este tipo de red está experimentando crecimiento como resultado de la necesidad de más ancho de banda en las redes de acceso desde Video sobre Demanda (VoD) y protocolo de televisión por internet (IPTV).

La red de acceso metro es el punto de entrega para usuarios finales. Es la mayor área de crecimiento potencial e innovación. La red metro tiene las características de corta distancia acopladas con el requerimiento de equipo de multi-servicio capaz de una gran variedad de protocolos. Las topologías consisten de anillos cortos y redes punto a punto que llevan de 4 a 16 longitudes de onda. Las tasas de datos varían desde 100Mb/s hasta 2.5Gb/s. Los protocolos utilizados son T1, SONET, canal de fibra, Ethernet, ATM y ESCON.

CWDM junta todo dentro de la red metro. Su utilidad es triple. Primero, porque instalar fibra es muy caro en la red metro. CWDM permite expansión de ancho de banda simplemente agregando longitudes de onda adicionales en un par de fibras disponibles entre dos edificios.

Segundo, múltiples protocolos pueden ser transportados transparentemente utilizando una solución CWDM. Finalmente y la más importante, CWDM es una tecnología de bajo costo “pago por crecimiento”.

5.1.2. Bloques de construcción CWDM

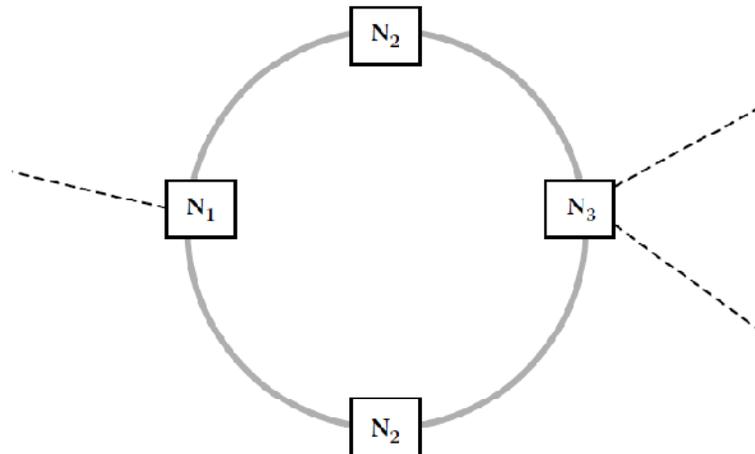
CWDM fue, desde el principio, diseñada para la red de área metropolitana. Empresas y proveedores de servicio están alerta respecto de CWDM debido a su capacidad de escalamiento a medida que la red crece. Más allá de esto, implementar una red CWDM es algo trivial. CWDM permite que una arquitectura WDM de bajo costo con interconexiones simples pueda hacer fácil la construcción de redes de anillo y punto a punto. Las topologías utilizadas para construir son en general:

- Malla con múltiple enlaces interconectados con los nodos.
- Anillos con enlaces y funciones Add/Drop
- Punto a multipunto para broadcasting
- Punto a punto

Las topologías clave utilizadas particularmente en las redes metro son de anillo y punto a punto. Malla y multipunto, las cuales son utilizadas mayormente en red Core, son costosas de implementar y, por lo tanto, no son utilizadas frecuentemente en redes metro.

Una red punto a punto CWDM consiste de una conexión simple desde un edificio a otro por medio de un par de cables de fibra óptica. Un anillo CWDM involucra conectar tres o más edificios por medio de enlaces separados, como lo muestra esquemáticamente la figura siguiente.

Figura 82 Topología en anillo CWDM utilizando cuatro nodos N_1, \dots, N_4 interconectados por medio de enlaces.



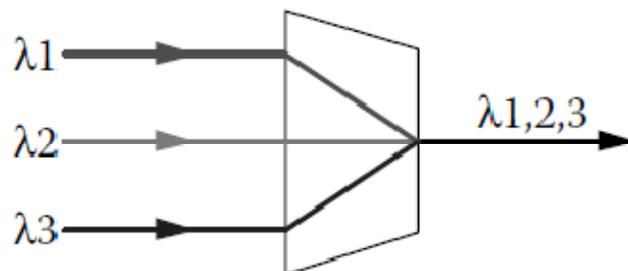
Los bloques de construcción básicos requieren de nodos como los de la figura anterior para construir anillos de red CWDM y los enlaces punto a punto son los MUX (multiplexores), el DEMUX (demultiplexor), y el OADM (multiplexor add/drop). También transceivers desconectables son necesarios en los puntos terminales de cada camino óptico.

5.1.2.1. Multiplexor y demultiplexor

El bloque de construcción MUX CWDM pasivo mostrado en la figura siguiente agrega longitudes de onda desde varias fuentes transmisoras (TX) y transmite la luz combinada en una fibra. Cada longitud de onda de luz permanece sin cambio y transparente en la presencia de longitudes de onda vecinas. Típicamente, los módulos MUX y DEMUX CWDM están diseñados con un mínimo de 4 canales para un máximo de 16 canales. Módulos de ocho canales son comúnmente utilizados en una configuración para todos los canales desde 1470 hasta 1610nm.

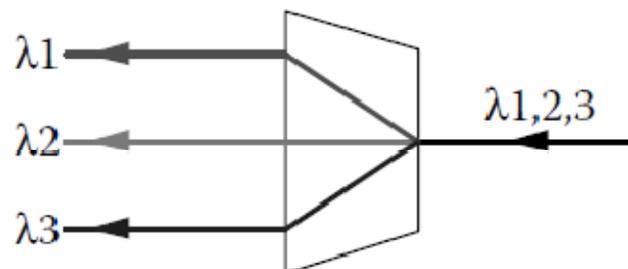
Pérdida de señal típica a través de MUX o DEMUX basado en TFF es de alrededor de 2 a 4 dB para cada longitud de onda. El aislamiento entre canales adyacentes es de un mínimo de 30dB.

Figura 83 MUX CWDM del lado Tx del enlace mostrado con tres diferentes canales teniendo una longitud de onda centro $\lambda_1 \dots \lambda_3$.



En el lado receptor, el demultiplexor hace lo inverso del multiplexor separando las diferentes fuentes de luz combinadas (Rx), como lo muestra la figura siguiente. Las propiedades del DEMUX son similares a las del MUX. En el caso de transmisión bidireccional, cada lado contiene ambos componentes MUX y DEMUX.

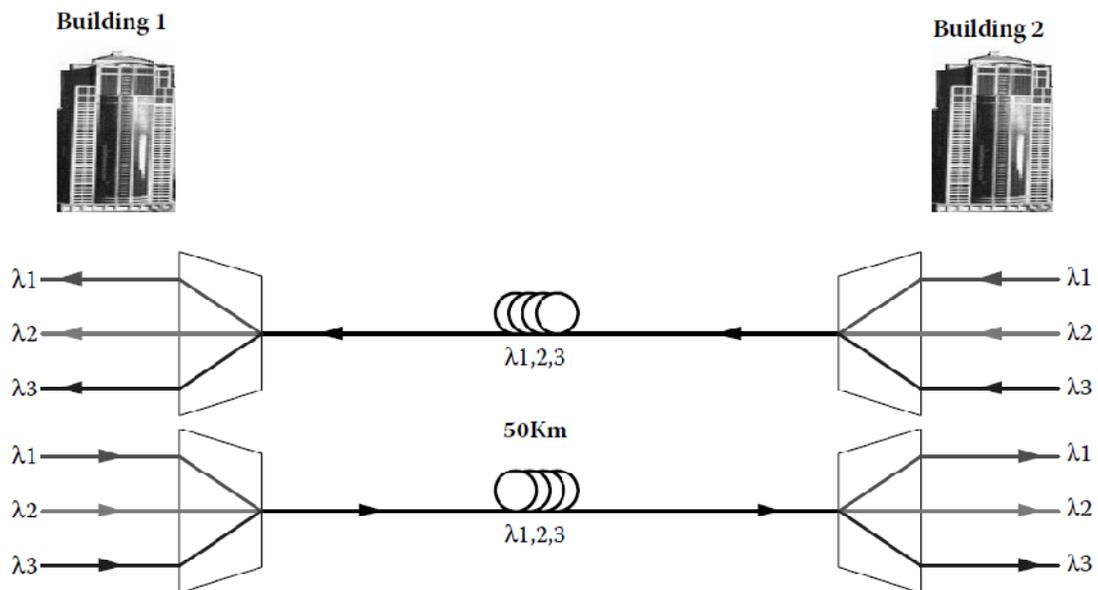
Figura 84 DEMUX CWDM del lado RX del enlace mostrado con tres diferentes canales teniendo longitud de onda centro $\lambda_1 \dots \lambda_3$.



El enlace metro punto a punto típico emplearía un par MUX y DEMUX para terminar las longitudes de onda de cada lado. Esto también aplica al anillo CWDM debido a que puede ser dividido en varios enlaces punto a punto interconectados. La figura siguiente muestra un enlace metro típico de 50km de fibra. Un par de fibras, una fibra yendo de este a oeste, lleva el tráfico de datos entre los dos sitios.

Los puertos del multiplexor son conectados a transcievers CWDM selectores de longitud de onda ubicados en el equipo de comunicaciones. Se debe notar que comúnmente dos fibras separadas son utilizadas para transmisión bidireccional significando que el total de equipo necesario es el doble del caso de transmisión unidireccional. Por lo tanto, la opción de longitudes de onda CWDM para cada dirección es independiente del uso de longitudes de onda en la dirección inversa debido a los enlaces separados.

Figura 85 Conexión bidireccional punto a punto CWDM entre dos edificios.



5.1.2.2. Multiplexor Add/Drop

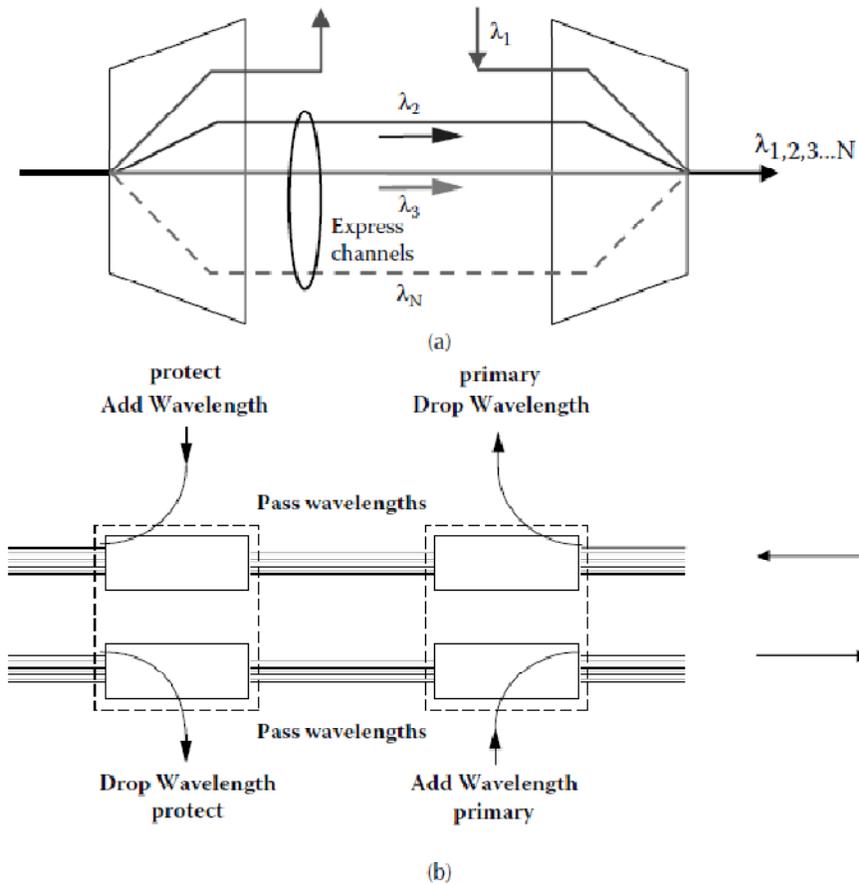
El segundo bloque básico de construcción es el OADM pasivo para CWDM. El OADM está ubicado en una red de anillo y entrega (Rx) las longitudes de onda desde el anillo y añade (Tx) longitudes de onda al anillo p a la línea directa del enlace transmisión.

Todas las demás longitudes de onda pasan a través del OADM sin ser afectadas o como canales expresos. En el inciso (a) de la figura siguiente se muestra un ejemplo de entrega y añadidura de una longitud de onda. Cuando todos los canales llevan tráfico, solamente la longitud de onda que se entrego puede ser ocupada por una longitud de onda igual a la entregada.

Debido a los puertos de colore de los componentes multiplexores, las longitudes de onda CWDM correctas deben ser conocidas para la operación del add/drop. La pérdida de señal típica a través de los puertos del add/drop es de 1.5 a 2.5dB. El paso a través de pérdida desde Este a Oeste es típicamente 1 a 2dB por puerto.

El aislamiento entre canales adyacentes es de un mínimo de 30dB mientras un producto superior podría tener 50dB de aislamiento. Los OADM para CWDM están trópicamente hechos con ya sea configuraciones de uno o cuatro canales.

Figura 86 (a) Esquema de un OADM con un canal add/drop más canales expresos, el OADM es compuesto funcionalmente por un par MX y DEMUX; (b) uso de un OADM dual en una configuración de anillo con protección.



El uso del OADM en el inciso (b) de la figura anterior para un anillo de red protegido. En un anillo protegido, la conexión fibra protegida está acompañada de una segunda fibra donde la información redundante se propaga en la dirección opuesta. La idea principal detrás de este esquema es que en el caso de un corte de fibra la información aun sea accesible en los sitios por medio de la segunda fibra. Por lo tanto, el add/drop existirá dos veces, como OADM primario y OADM de protección.

Se he demostrado que los OADM proveen acceso a una o más longitudes de onda de un sistema aumentando la posibilidad de manejo de red. Aunque esto mejora la flexibilidad par CWDM, la inserción de pérdida de estos dispositivos resulta en un reto en el diseño de anillos debido a que CWDM no utiliza amplificación óptica para superar las pérdidas.

5.1.2.3. Cross conexión

Mientras en el ejemplo anterior, el multiplexor se ha utilizado en pares para lograr la función add/drop, también nodos mas grandes con más de dos fibras son posibles utilizando un multiplexor al final de cada fibra y luego un conmutador apropiado para proveer las conexiones sobre la base de longitudes de onda entre las diferentes fibras entrantes. La complejidad y costo son altos de modo que no se han considerado estos elementos en este contexto.

5.1.2.4. Transcievers a utilizar

Los modules de transciever cuentan con color, es decir, la unidad de transmisión tiene longitud de onda característica entre 1310 y 1610nm mientras que el receptor trabajara a cualquiera de esas longitudes de onda. Los transciever pueden ser manejados directamente con los datos a ser transmitidos que son modulados sobre las longitudes de onda particulares.

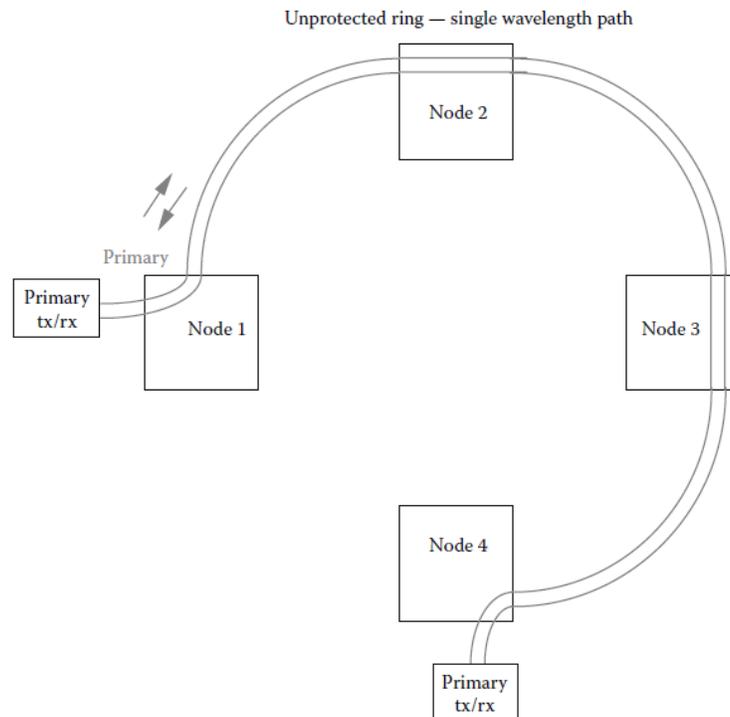
Los transceiver típicamente utilizan láser DFB directamente modulados operando a 2.5Gb/s y receptores PIN con un módulo de recepción y circuito de decisión. La salida de potencia modulada está en el rango de 0 a 3dBm, aunque puede ser reducida a temperaturas elevadas debido a que no se dispone de enfriamiento activo de los dispositivos debido a diseño de bajo costo.

La sensibilidad del receptor (PIN) de los transceiver está alrededor de -24 a 26dB de modo que el presupuesto del enlace de al menos de 24dB debería estar disponible, el cual puede ser utilizado para acomodar ambas componentes de inserción de pérdida (multiplexor, fibra) así como las penalidades debidas a la interacción de la dispersión de fibra y chirrido de láser. A bajas tasas de bit, el presupuesto de enlace se incrementa hasta 32dB a 1.25Gb/s. Por lo tanto, aun con nodos presentes, una circunferencia de anillo de 50km es posible.

5.1.3. Anillos que utilizan CWDM

Un anillo completo se puede construir con los MUX/DEMUX y bloques de construcción OADM mencionados anteriormente. En el diagrama de red mostrado en la figura siguiente, un anillo de cuatro nodos es construido con OADM en las ubicaciones de construcción del nodo y un par MUX/DEMUX de principio a fin. Las longitudes de onda se originan en el inicio del anillo y por simplicidad únicamente un camino longitud de onda es mostrado en la figura siguiente. Cada OADM extrae/inserta una longitud de onda en cada dirección (Este Oeste) del anillo y lo pasa a las longitudes de onda restantes del próximo OADM.

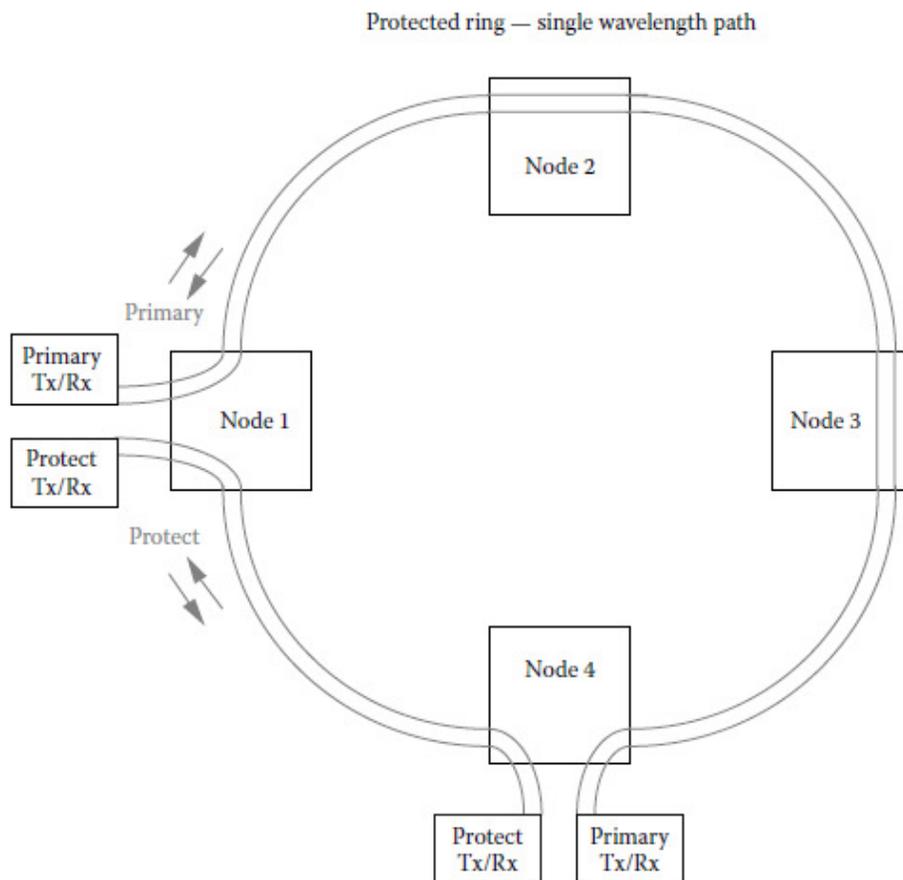
Figura 87 Multiplexor add/drop, transceiver primario y multiplexor utilizado para crear un anillo CWDM con cuatro nodos sin protección.



Por ejemplo, una longitud de onda λ inicia en la dirección Oeste Este a través del MUX/DEMUX Este del nodo, entonces pasa a través de los dos OADM en el edificio 1 y 2 (Nodos 2 y 3), y es finalmente entregado en el edificio 3 (nodo 4). En la dirección Este Oeste opuesta, la misma λ comienza en dirección oeste desde el MUX/DEMUX Oeste y es extraída/insertada inmediatamente en el edificio 3 sin OADM intermediarios. El arreglo dual de OADM del lado inicial permite por lo tanto que los caminos de cada edificio (junto con las direcciones reversas) tengan redundancia en caso de falla de camino. Si esta característica de redundancia o protección no es necesaria, un

solo MUX/DEMUX menos costoso en el lado inicial en una dirección se vería como la figura anterior.

Figura 88 Multiplexor add/drop, transceiver y multiplexor utilizados para crear un anillo CWDM con cuatro nodos y protección.



5.2. Aplicaciones CWDM en la metro

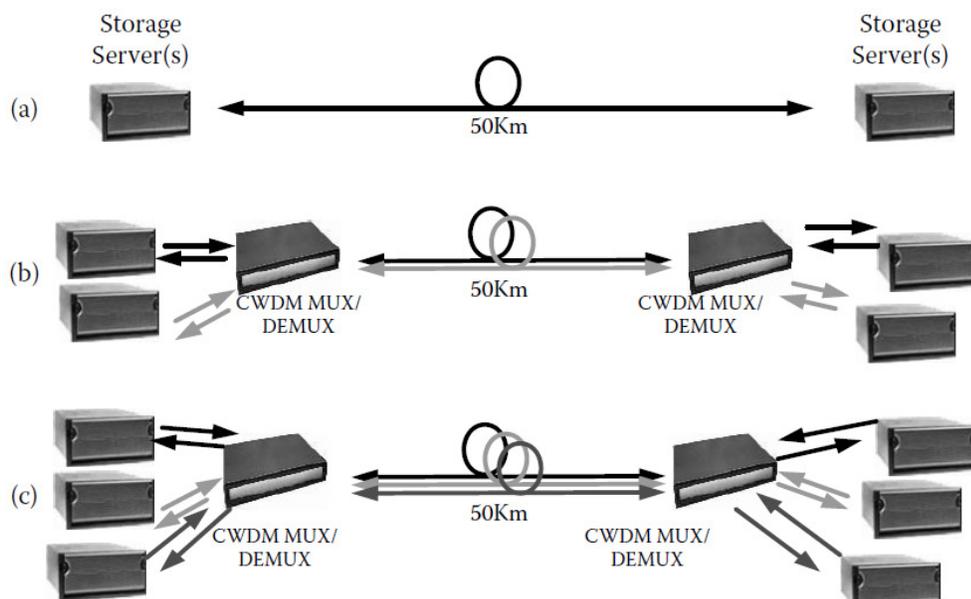
La óptica CWDM es una propuesta sencilla y costo efectiva para escalar ancho de banda y extender el tamaño de las redes en el segmento metro.

En las aplicaciones mostradas en los siguientes ejemplos utilizando óptica CWDM se resuelve algunos problemas básicos en las redes metro.

5.2.1. Recuperación de desastres

Recientemente, las SAN han tenido requerimiento de ancho de banda en aplicaciones remotas de datos para recuperación de desastres. Mientras este tipo de redundancia puede ser implementada en una instalación, redundancia de sitio remoto agrega una capa adicional de protección contra desastres e interrupciones de servicio afectando un sitio entero. Si el servidor de almacenamiento de datos queda no disponible, las replications secundarias hacia una instalación fuera de sitio hacen fácil una replicación de actualización de punto en tiempo. Como lo muestra la figura siguiente, se puede utilizar CWDM para extender una SAN sobre distancias.

Figura 89 Modo de extender redes de almacenamiento con CWDM: (a) Conexión con una sola fibra, (b) dos canales y (c) tres canales multiplexados.



El inciso (a) de la figura anterior muestra un arreglo de almacenamiento para copias de respaldo en remoto hacia otro arreglo de almacenamiento separado por 50km. El inciso (b) y (c) ilustran que añadiendo MUX/DEMUX CWDM en ambos lados escala el sistema para mayor ancho de banda. Múltiples servidores de almacenamiento pueden ser interconectados donde cada par está recibiendo un canal dedicado CWDM. Este es un ahorro significativo por encima de la propuesta (a) donde enlaces de fibra separada son utilizados. Cabe notar que con óptica CWDM desconectables y MUX/DEMUX CWDM el tiempo para creación de copias de respaldo puede ser ajustado a la propuesta de “pago por crecimiento”. Por lo tanto, mas longitudes de onda deben ser añadidas si se desea aumentar el espacio de almacenamiento o si se desea reducir el tiempo requerido para generación de copias de respaldo de la instalación de almacenamiento remota.

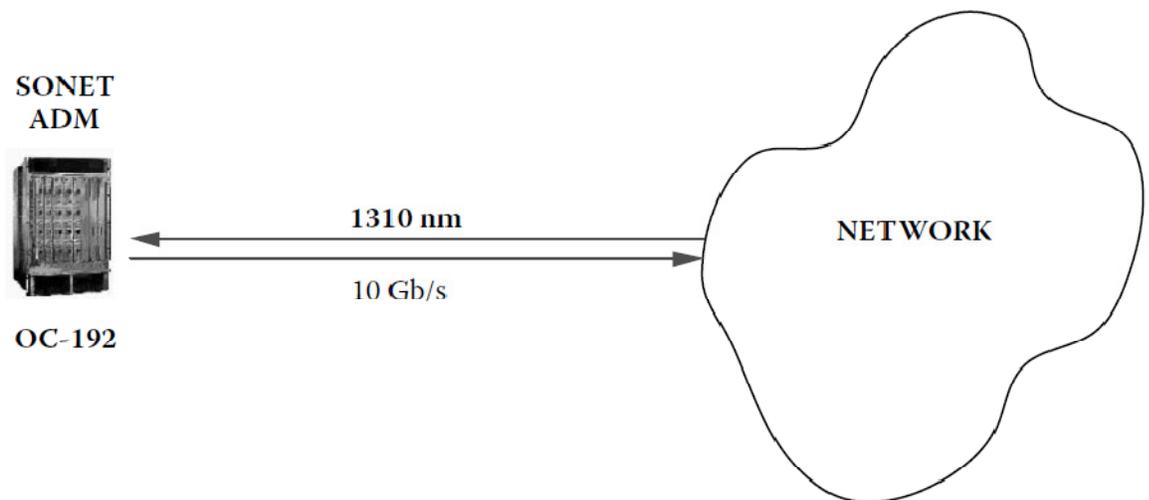
5.2.2. Añadiendo CWDM a redes de una longitud de onda

Añadir ancho de banda adicional a un enlace SONET OC-192 que opera con una sola longitud de onda de 1310nm puede representar una tarea difícil y costosa. Utilizar transcievers ópticos CWDM desconectables, más un MUX/DEMUX CWDM ajustado a un puerto de 1310nm, el ancho de banda adicional se transforma en una actualización de mejora sencilla de bajo. La figura siguiente ilustra la el enlace de referencia SONET original con una longitud de onda de 1310nm.

Esta actualización de mejora es complementada con el uso de un MUX/DEMUX CWDM con un puerto 1310 en el enlace en ambos extremos, como lo muestra la figura 90.

La longitud de onda de 1310nm entonces pasa a través de la infraestructura CWDM transparentemente con longitudes de onda CWDM. Añadir multiplexores no puede ser hecho sin la interrupción de tráfico y también el presupuesto de enlace debe ser suficiente para acomodar la pérdida por inserción del par multiplexor/demultiplexor. Sin embargo, actualizaciones de mejora futuras pueden ser llevadas a cabo sin interrupción de tráfico de los canales existentes, tales como el canal SONET de 1310nm, contando ahora con suficientes puertos libres en el multiplexor CWDM.

Figura 90 Enlace SONET con una sola longitud de onda de 1310nm.

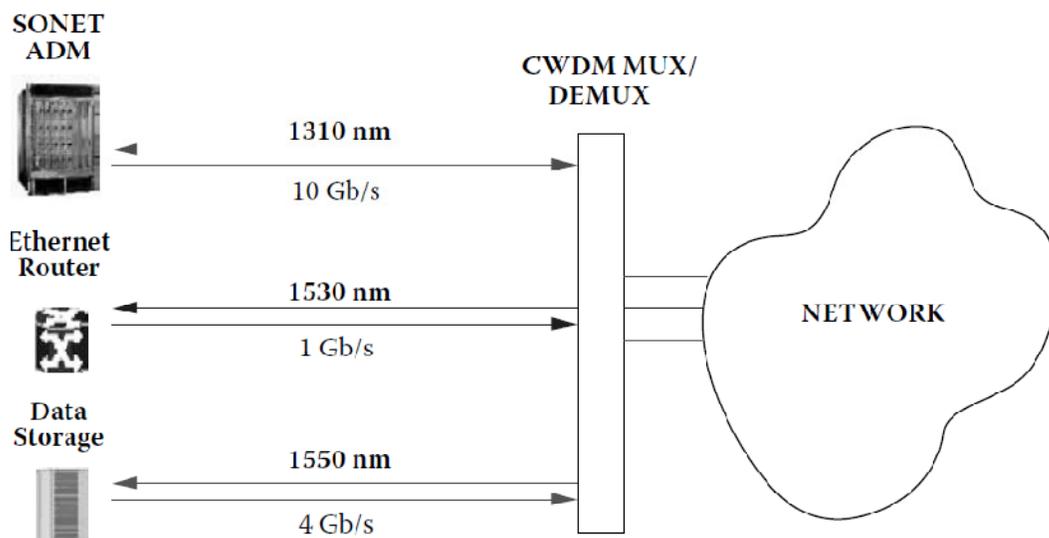


5.2.3. Escalabilidad con DWDM sobre CWDM

Se diría que la capacidad de CWDM está limitada a 16 longitudes de onda. Por lo tanto, servicios para únicamente 16 nodos en anillo son posibles.

Sin embargo, la escalabilidad es posible hasta más de 64 longitudes de onda y correspondientemente un mayor número de usuarios expandiendo la naturaleza básica con DWDM. Esta propuesta promete gran escalabilidad que el incremento de las tasas de bit de los canales CWDM.

Figura 91 Modo de agregar longitudes de onda CWDM a un enlace de una sola longitud de onda. Se muestra una solución común para añadir IP o servicios de datos por canal de fibra a un enlace SONET sin una actualización de mejor my costosa.



La idea de utilizar DWDM en un ambiente CWDM es más que simple: en el mundo DWDM, los canales son espaciados 0.4 o 0.8nm, mientras que en CWDM, las longitudes de onda están separadas 20nm. Utilizando el grid de 20nm CWDM, los canales en un MUX/DEMUX CWDM están diseñados con un pasabanda de 12nm, suficientemente amplios para encajar con 8 o 10 longitudes de onda DWDM que pueden substituir el canal original CWDM.

Debido a espaciamiento angosto y uso espectral del pasabanda entero de los componentes del filtro, los canales DWDM requieren fuentes láser con estabilizador de temperatura para evitar cualquier deriva de longitud de onda, que resultan en crosstalk de canal y caída de señal.

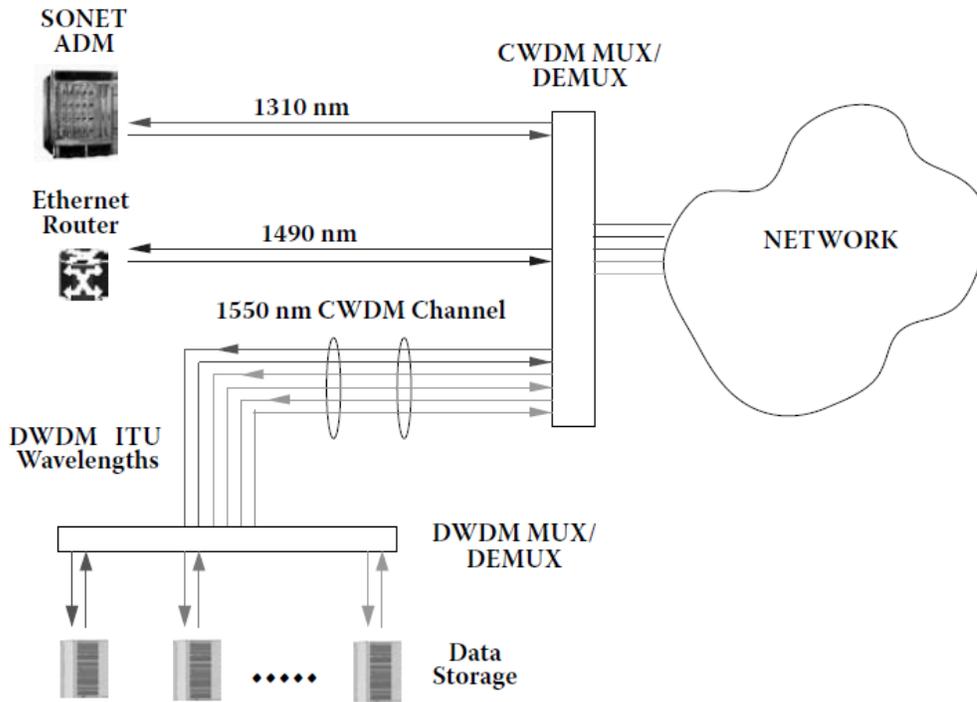
El principio de bandas DWDM se puede apreciar en la figura anterior donde se han añadido nuevos servicios al enlace SONET. Ese enlace escalado utilizo tres longitudes de onda CWDM para SONET, Ethernet y canal de fibra para almacenamiento de datos sobre las longitud de onda CWDM 1550nm.

Si, en particular, la aplicación de almacenamiento requiere más capacidad de almacenamiento y ancho de banda más veloz, se pueden añadir longitudes de onda al canal de 1550nm insertando un MUX/DEMUX DWDM.

La figura siguiente ilustra este concepto para el enlace conocido añadiendo DWDM sobre CWDM para expandir el ancho de banda. Esta es una propuesta ingeniosa que subraya lo que CWDM ha dado al mundo de las redes metro.

Se puede caracterizar por la frase “Se debe construir una red con los requerimientos presentes con una arquitectura flexible y con capacidad de expansión según crecimiento”.

Figura 92 Uso de DWDM (parte baja de la figura) multiplexado sobre CWDM para proveer una capacidad de actualización de mejor para la red de la figura anterior.



5.2.4. Aplicaciones futuras

Desde los noventa, CWDM ha entregado para cualquier en la red metro la capacidad de construir redes escalables, de bajo costo y transparentes. La óptica CWDM proveía en la forma de transceivers desconectables y multiplexores ópticos pasivos han transformado la forma en que las redes metro se construyen.

Los avances en la fabricación de dispositivos y la integración de CWDM con otras partes de la red han ayudado a hacer CWDM un competidor bien establecido con un set completo de estándares y muchos vendedores los cuales optan por estos dispositivos.

A medida que la red metro continua creciendo y madurando, dos cambios están ocurriendo en la red metro:

- Primero, aplicaciones de capacidad demanda tales como VoD están manejando ahora el requerimiento de mayor ancho de banda para el usuario final. Por ahora, esta nueva tendencia será únicamente satisfecha por transcievers de una longitud de onda de 10G. A medida que la demanda de ancho de banda aumenta por un buen número de aplicaciones y una base de usuarios en crecimiento, los transcievers 10G CWDM empezaran a aparecer para agregar múltiples longitudes de onda 10G CWDM sobre la infraestructura de fibra existente. A medida que el ancho de banda aumenta aun mas, soluciones 10G DWDM sobre 10G CWDM pueden empezar a surgir.
- Segundo, el precio del equipo CWDM (transcievers y dispositivos ópticos pasivos) está disminuyendo significativamente.
- Esta erosión de precio de soluciones CWDM habilitaran eventualmente a la empresa más pequeña a implementar redes CWDM. Como resultado, en el caso de escape de fibra, la solución CWDM tendrá gran ventaja sobre añadir más fibra a la red. Con avances en diseño y manufactura de equipo óptico DWDM, la erosión de presión vista en equipo CWDM también empezara a ocurrir en el segmento DWDM. Una forma de bajo costo de DWDM pronto competirá con CWDM a las velocidades de 1. 25 y 2. 5G.

Si la diferencia de precio entre DWDM y CWDM principalmente definida por las reducciones de tamaño de los transceiver al punto de inflexión, entonces CWDM puede estar en riesgo de volverse una tecnología obsoleta.

5.3. Comparación económica entre CWDM y DWDM

5.3.1. Hardware

La diferencia de coste entre los sistemas CWDM y los DWDM pueden ser atribuidos al hardware y a los costes operativos. A pesar de la superioridad en cuanto a coste de los láseres DWDM con respecto a los CWDM, los láser DFB refrigerados proporcionan soluciones de coste efectivo para transportes de largo recorrido y grandes anillos metropolitanos que requieran gran capacidad. En ambas aplicaciones el coste de los sistemas DWDM queda amortizado por el gran número de clientes que se sirven de este sistema. Las redes de metro/acceso, por otro lado requieren sistemas de bajo coste y baja capacidad, para reunir las condiciones del mercado que están basadas en gran parte, en el nivel de predisposición del cliente a desembolsar recursos económicos por los servicios de banda ancha.

El precio de los transceiver DWDM es superior que los de sus homólogos. Los altos costes del transceiver DWDM son atribuibles al gran número de factores relacionados con los láser. Las tolerancias de longitud de onda típicas están en el orden de los $\pm 0,1\text{nm}$; mientras que la tolerancia de fabricación de la longitud de onda de los láser CWDM está situada entre los $\pm 2-3\text{nm}$, generando un aumento de los costes de los láser DWDM con respecto a los

CWDM. Además el encapsulado de los láseres DWDM, para la estabilización de la temperatura con un enfriador y un termistor, es más costoso que un láser coaxial CWDM no refrigerado. La diferencia de coste entre los MUX/DMUX DWDM y CWDM, basado en una tecnología thin film también contribuyen a disminuir los costes generales en favor del CWDM. Los filtros de los CWDM son intrínsecamente más económicos en su construcción, debido al menor número de capas en el diseño del filtro. Típicamente son 150 capas para el diseño de un filtro de 100 GHz para ser usado en sistemas DWDM, mientras que en un filtro CWDM de 20nm hay aproximadamente 20 capas. El resultado es una fabricación más alta de filtros CWDM.

Los láseres CWDM modulados directamente son optimizados para bajos costos. Su diseño se basa en la tecnología DFB, la cual proporciona un desempeño bajo de la dispersión. Consecuentemente, dichos láser son capaces de transmitir a 2.5Gb/s sobre distancias de hasta 80km en fibra ITU G. 652. Los VCSEL que cumplen con las condiciones de pequeño tamaño, eficiencia elevada y capacidad de modulación de alta velocidad. Su diseño provee ventajas de bajo costo de fabricación.

A continuación se resumen las diferencias entre los transmisores CWDM y DWDM:

- El volumen ocupado por un transmisor DWDM es cerca de ocho veces el volumen de un transmisor CWDM.
- La energía consumida por un transmisor DWDM es cerca de 20 veces la de un CWDM
- Debido a los aspectos anteriores, el empaquetado de un transmisor DWDM es más costoso que el de un CWDM sin enfriar.

- El diseño sin enfriar, que no tiene disipadores de calor abultados, ni circuitos de control ni refrigeradores termoeléctricos (TEC) acoplados junto al chipo del láser.

Consecuentemente, los componentes del transmisor CWDM tienen de cuatro a cinco veces el costo de sus contrapartes en DWDM.

Las interfaces de los receptores PIN o APD cubren la banda entera de CWDM de ITU. La ventaja de los detectores PIN es que presentan un costo más bajo y un diseño de recepción más simple.

Los filtros de CWDM están implementados utilizando la tecnología TFF, por lo que son intrínsecamente menos costosos de fabricar que los de DWDM, los cuales deben cumplir requisitos estrictos para las bandas de paso y de guarda.

El resultado es un tiempo de fabricación más corto, menos materiales y producciones más altas de filtros CWDM. Adicionalmente, se produce también un ahorro de costos en el empaquetamiento de los TFF como consecuencia de requisitos de alineamiento menos severos, lo cual permite una mayor automatización de los procesos de fabricación. Consecuentemente, los costos de los filtros CWDM son generalmente menos del 50% de los DWDM.

La expansión de las redes a mayores distancias y/o más nodos requiere de repetidores y/o amplificadores. Los repetidores pueden proporcionar la regeneración 2R o 3R para superar las limitaciones de dispersión y pérdida; mientras que los amplificadores proporcionan la regeneración 1R para vencer solamente las limitaciones de pérdida de suministro de potencia óptica.

El costo de un OADM para DWDM es típicamente de hasta dos o tres veces el costo de un OADM CWDM de banda ancha debido a que un ambiente DWDM tiene un espaciamiento entre longitudes de onda comparado con CWDM.

Longitudes de onda más cercanas significa más calor haciendo esto un esquema más complicado, resultando en un costo mayor.

Tabla XII Comparativa CWDM vs DWDM

Aplicación/parámetro	CWDM acceso/MAN	DWDM MAN/WAN	DWDM largo alcance
Canales por fibra	4-16	32-80	80-160
Espectro utilizado	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Espaciado entre canales	20 nm (2500 GHz)	0,8 nm (100 GHz)	0,4 nm (50 GHz)
Capacidad por canal	2,5 Gbit/s	10 Gbit/s	10-40 Gbit/s
Capacidad de la fibra	20-40 Gbit/s	100-1000 Gbit/s	>1 Tbit/s
Tipo de láser	uncooled DFB	cooled DFB	cooled DFB
Tecnología de filtros	TFF	TFF, AWG, FBG	TFF, AWG, FBG
Distancia	hasta 80 km	cientos de km	miles de km
Coste	bajo	medio	Alto
Amplificación óptica	ninguna	EDFA	EDFA, Raman

5.3.2. Requerimiento de energía

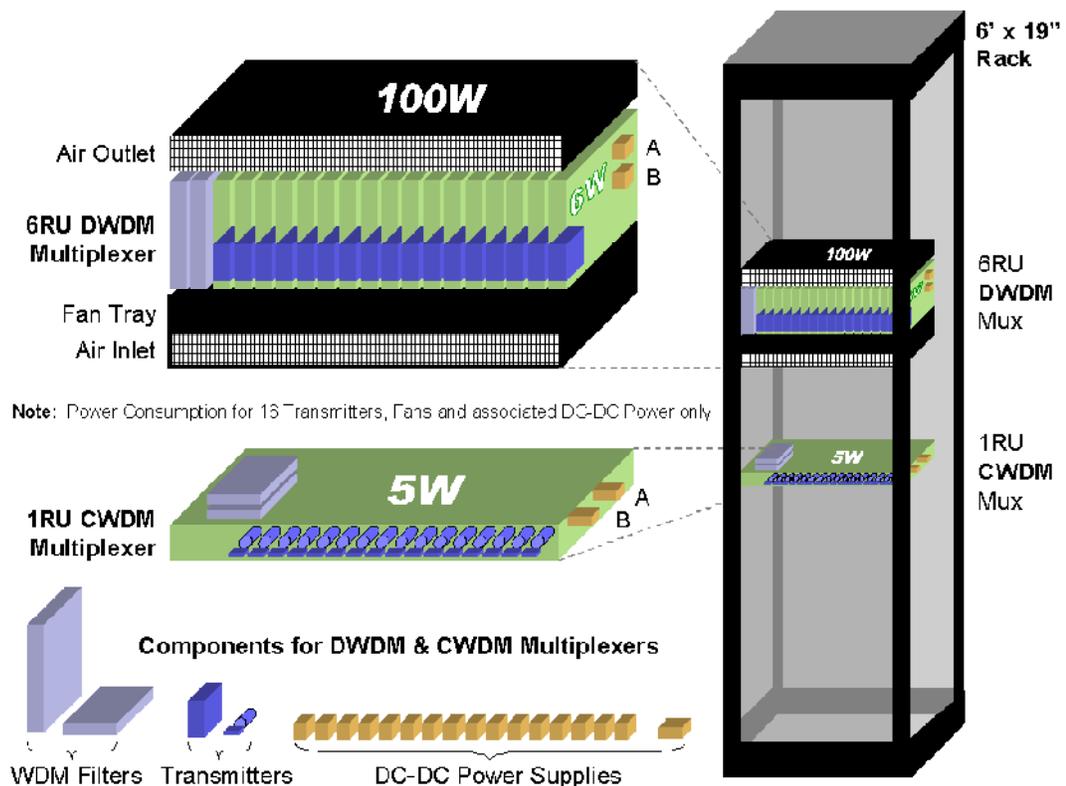
Los costes operativos de los sistemas de transporte óptico dependen del mantenimiento y de la energía. Mientras que los costes de mantenimiento son comparables para ambos sistemas CWDM y DWDM, los requerimientos de energía para el DWDM son significativamente más altos.

Por ejemplo, los láser DWDM estabilizan la temperatura a través de enfriadores integrados en los módulos de su encapsulado. Estos dispositivos junto con el PIN monitor asociado y el circuito de control consumen aproximadamente 4 W de energía por longitud de onda. Mientras que un transmisor láser CWDM no refrigerado consume aproximadamente 0,5 W. Los transmisores en un octavo canal del sistema CWDM consumen aproximadamente 4 W de potencia, mientras que la misma funcionalidad en un sistema DWDM puede llegar a consumir hasta 30 W.

Como el número de longitudes de onda en los sistemas DWDM aumentan con la velocidad de transmisión, la energía y la administración térmica asociada con ellos se convierte en un tema crítico para los diseñadores. La baja energía requerida como resultado del uso de láser no refrigerados en los sistemas CWDM, tiene implicaciones financieras positivas para los operadores de sistema. Por ejemplo, el coste de la batería de respaldo es una consideración importante en la operación del transporte de equipos. Minimizando la energía necesaria para la explotación y los costes asociados con su respaldo incluido se reducen los costes operacionales.

En definitiva, CWDM es una tecnología muy sencilla y tiene un coste muy bajo, típicamente de alrededor del 35-65% al de DWDM para el mismo número longitudes de onda, lo que permite que los desembolsos en capital sigan la trayectoria de la generación de beneficios. La única limitación que puede presentar CWDM frente a DWDM en el entorno metropolitano es la menor capacidad soportada. No obstante, varios suministradores WDM ofrecen esquemas de migración entre CWDM y DWDM, de tal modo que, cuando la capacidad de los sistemas CWDM deba ser extendida, algunos puertos CWDM puedan ser substituidos por puertos y filtros DWDM. Según este esquema de migración, hasta 16 canales DWDM separados 50 GHz pueden ser ubicados en el espectro ocupado por un único canal CWDM. La comparativa entre CWDM y DWDM se resume en la figura a continuación.

Figura 93 Productos representativos DWDM vs CWDM – Diferencias de potencia y ocupación de espacio.



CONCLUSIONES

1. La investigación en el área de sistemas de fibra óptica se centra actualmente en la eliminación de cualquier paso al dominio electrónico (excepción hecha de los procesos de detección). Las operaciones con electrónica convencional constituye un auténtico “cuello de botella” en estos sistemas y limitan drásticamente la posibilidad de utilizar eficientemente todo el potencial en ancho de banda que proporciona la fibra óptica. En otras palabras, como objetivo principal en el área de las telecomunicaciones por fibra, se busca una transparencia óptica total entre el origen y destino. Esto exige, por un lado, el desarrollo de nuevas tecnologías que posibiliten la implementación todo-óptica de las técnicas de multiplexión.
2. La tecnología de transmisión de multiplexión por división de longitud de onda (WDM), ha conseguido un incremento sustancial en la capacidad de transmisión, tanto para redes de larga distancia, basadas principalmente en sistemas DWDM (Dense WDM), como para redes metropolitanas, basadas en sistemas CWDM (Coarse WDM).
3. CWDM se estará empezando utilizar en redes comerciales de área local, red metro, red de acceso y la 10GbE estándar por medio del estándar ITU. El uso actual se basa en canales de 20 a 25nm de espaciamiento para disminuir la deriva de temperatura de los DFB de hoy en día haciendo más fácil el control de longitud de onda. Las ventajas de CWDM son su costo reducido, gracias a la reducción de costo de fabricación en los componentes, simplicidad en el manejo de longitudes de onda y consumo

bajo de potencia atribuido a que no cuentan con controles de temperatura. El uso de control de longitud de onda por medio de CWDM en un nodo de conmutación óptico simple provee muchas ventajas de desempeño de manejo de datos, manteniendo y prolongando la rentabilidad de la infraestructura existente. Se muestra que tales redes pueden ser implementadas utilizando unidades convencionales CWDM acopladas con SOA sencillos basados en puntos de conexión óptica cruzada tipo add/drop.

RECOMENDACIONES

1. Mejorar las capacidades de ancho de banda disponible en las redes metro y de acceso por medio de la utilización de equipos CWDM
2. Continuar investigando las nuevas técnicas de multiplexión que complementen a CWDM
3. Continuar investigando los dispositivos que se emplean en CWDM para el mejoramiento de esta tecnología
4. Continuar buscando áreas de oportunidad para la utilización de redes CWDM, debido a su gran cualidad costo – beneficio
5. Utilizar equipos CWDM para complementar la infraestructura DWDM existente
6. Utilizar equipos CWDM en distancias no mayores a 80km
7. Tomar en cuenta que los equipos CWDM pueden utilizar la infraestructura de fibra óptica actual implementada
8. Verificar que el equipo CWDM que se desee implementar cumpla con las recomendaciones ITU-T
9. Obtener los requerimientos de los usuarios finales para tener una guía definida de investigaciones, para mejoras futuras de CWDM

BIBLIOGRAFÍA

1. Adel A. M. Saleh, Jane M. Simmons. ***Architectural Principles of Optical Regional and Metropolitan Access Networks, Jnl of Lightwave Technology, Vol. 17, No. 12.*** Estados Unidos: Diciembre, 1999.
2. B. C. Peters and K. Herrity, ***Local-area WDM solutions: How fast, how far, how soon?. Lightwave Magazine, vol. 16, issue 9.*** Estados Unidos: Agosto, 1999.
3. Chang-Joon Chae et al, ***A PON System Suitable for Internetworking Optical Network Units Using a Fiber Bragg Grating on the Feeder Fiber. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, No. 12.*** Estados Unidos: Diciembre, 1999.
4. E. Warren. ***When WDM Makes Sense in the Access Network: An Economic Analysis, JDS Uniphase White Paper.*** Estados Unidos: Agosto, 1999.
5. H. Q. Hoe, H. C. Chui, K. D. Choquette, B. E. Hammons, W. G. Breiland and K. M. Geib, ***Highly Uniform and Reproducible Vertical Surface-Emitting Lasers Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy with a In Situ Reflectometry, IEEE Phot. Tech. Lett. , vol. 8.*** Estados Unidos: 1996.
6. K. Herrity and B. C. Peters, ***Long-Term Outlook for Multimode Fiber, Monterey Conference on Fiber Optics for the Next Decade.*** Estados Unidos: Abril, 1999.
7. M. Miller, N. Lewis, J. Ravita, R. Winfrey, M. Page, W. Lewis, ***A Four Channel Bi-Directional Data Link Using Wavelength Division Multiplexing, Proceedings 9th International Fiber Optic Communications and Local Area Networks Exposition.*** Estados Unidos: Septiembre de 1985.

8. **Optical Internetworking Forum (OIF) – Very Short Reach (VSR) Level 5 Project for 40 Gbit/s optical interfaces.** Estados Unidos: Febrero, 2002.
9. **Palais,J. Fiber Optic Communications, Prentice-Hall,** Estados Unidos: 1992.
10. **Recomendación ITU -- G 671 (10/02) SERIE G: CARACTERISTICAS DE TRANSMISION DE COMPONENTES OPTICOS Y SUBSISTEMAS. Publicaciones ITU.** Estados Unidos: Octubre, 2002.
11. **Recomendación ITU -- G 694. 2 SERIE G: SISTEMAS Y MEDIOS DE TRANSMISIÓN, SISTEMAS Y REDES DIGITALES, Características de los medios de transmisión – Características de los componentes y los subsistemas ópticos, Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexión por división de longitud de onda: Plan de multiplexión por división aproximada de longitud de onda, publicaciones ITU.** Estados Unidos: Diciembre, 2003.
12. **Recomendación ITU -- G 695 (12/06) SERIE G: SISTEMAS Y MEDIOS DE TRANSMISIÓN, SISTEMAS Y REDES DIGITALES, Características de los medios de transmisión y de los sistemas ópticos – Características de los sistemas ópticos Interfaces ópticas para aplicaciones de multiplexión por división aproximada de longitud de onda, publicaciones ITU.** Estados Unidos: Diciembre, 2006.
13. Senior,J. **Optical Fiber Communications.** Estados Unidos: Prentice-Hall, 1992.
14. Sterling,Donald. **Technician´s Guide To FIBER OPTICS, Segunda Edición.** Estados Unidos: Delmar Publishers Inc, 1993.
15. Wilson, J; Hawkes,J. **Optoelectronics: An Introduction,** Estados Unidos: Prentice-Hall,1983.