

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA, MULTIPLEXIÓN DENSA POR  
DIVISIÓN DE ONDA, PARA DAR SOLUCIÓN A LA NECESIDAD DE MAYORES ANCHOS DE  
BANDA EN LAS REDES DE LOS PROVEEDORES DE SERVICIOS DE  
TELECOMUNICACIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**LUIS FERNANDO MEJIA AYALA**

ASESORADO POR LA INGA. INGRID RODRÍGUEZ DE LOUKOTA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Durán Córdova
EXAMINADOR	Ing. José Aníbal Silva de los Ángeles
EXAMINADOR	Ing. Keneth Issur Estrada Ruiz
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA, MULTIPLEXIÓN DENSA POR DIVISIÓN DE ONDA, PARA DAR SOLUCIÓN A LA NECESIDAD DE MAYORES ANCHOS DE BANDA EN LAS REDES DE LOS PROVEEDORES DE SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería en Mecánica Eléctrica, con fecha julio de 2008.



Luis Fernando Mejia Ayala

Guatemala 7 de septiembre del 2010

Ingeniero  
Carlos Guzmán  
Coordinador del Área de Electrónica  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Estimado Ingeniero Guzman.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado: **“ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA, MULTIPLEXIÓN Densa POR DIVISIÓN DE ONDA, PARA DAR SOLUCIÓN A LA NECESIDAD DE MAYORES ANCHOS DE BANDA EN LAS REDES DE LOS PROVEEDORES DE SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN”**, del señor Luis Fernando Mejía Ayala, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

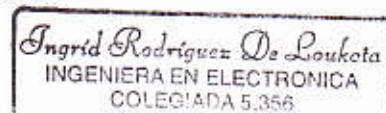
Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesora, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Inga: Ingrid Rodríguez de Loukota  
Colegiada 5,356  
Asesora





Ref. EIME 09.2011

Guatemala, 17 de enero 2011.

Señor Director  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
"ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA,  
MULTIPLEXIÓN Densa POR DIVISIÓN DE ONDA, PARA DAR  
SOLUCIÓN A LA NECESIDAD DE MAYORES ANCHOS DE  
BANDA EN LAS REDES DE LOS PROVEEDORES DE SERVICIOS  
DE TELECOMUNICACIÓN", del estudiante, Luis Fernando Mejía  
Ayala, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.



CEGS/sro

Atentamente,  
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar  
Coordinador de Electrónica



REF. EIME 09. 2011.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; LUIS FERNANDO MEJÍA AYALA titulado: "ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA MULTIPLEXIÓN DENSA POR DIVISIÓN DE ONDA, PARA DAR SOLUCIÓN A LA NECESIDAD DE MAYORES ANCHOS DE BANDA EN LAS REDES DE LOS PROVEEDORES DE SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN", procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puentes Romero

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Guillermo Antonio Puentes Romero'.



GUATEMALA, 26 DE ENERO 2011.



## ACTO QUE DEDICO A:

<b>Mis padres</b>	Fernando Emilio Mejía Carrillo y Norma Oralía Ayala de Mejía.
<b>Mis hermanas</b>	Vivian Carolina Mejía de Martínez, Norma Vanessa Mejía de Rizos, Lizbeth Xiomara Mejía Ayala.
<b>Mis sobrinos</b>	Sherley Vanessa Rizos Mejía, Diego Manuel Martínez Mejía .
<b>Mis amigos</b>	Armando Gálvez, Alexander Lemus, Byron Gálvez, Gerson Chamo, Henry Lemus, Hugo Barrientos, Jeremy Santizo, José Melgar, José Andrade, Mario Silvestre, Kelvin Silvestre, Luis Lavagnino, Manuel Martínez, Miguel Gualim, Noé Gualim, Omar Rizos, Roland Márquez.
<b>Los que ya no están</b>	Rodolfo Ixtamalí y Henry Cifuentes (q.e.p.d.).



## AGRADECIMIENTOS A:

<b>Dios</b>	Por darme la vida y concederme el entendimiento necesario para alcanzar la meta.
<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darme la oportunidad de realizarme como profesional.
<b>Mis padres</b>	Porque con cariño me enseñaron sobre la vida y la perseverancia para llegar al objetivo.
<b>Mis hermanas</b>	Por compartir este triunfo conmigo.
<b>Mis amigos</b>	Por el apoyo que cada uno en su momento, me brindó para seguir adelante.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	I
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XXVIII
OBJETIVOS.....	XXXI
INTRODUCCIÓN.....	XXXIII
1. ACTUALIDAD Y FUTURO DE LAS REDES ÓPTICAS DE TRANSPORTE.....	1
1.1. Evolución de la red.....	1
1.1.1. La red de hoy.....	2
1.1.2. Evolución de la infraestructura del transporte.....	3
1.2. La visión de red.....	8
1.2.1. Valor de la tecnología <i>DWDM</i> en el área metropolitana.....	9
1.2.2. Requerimientos en el área metropolitana.....	12
1.2.3. Demanda ancho de banda.....	13
1.3. Ley de Edholm (crecimiento de ancho de banda).....	15
1.4. Fuerzas económicas (beneficios del <i>DWDM</i> ).....	18
1.4.1. El mercado <i>WDM</i> .....	19
1.5. Redes de nueva generación NGN.....	21
1.5.1. Definición y características de las redes de nueva generación.....	22
1.5.2. Arquitectura NGN.....	24
1.6. Comparación <i>TDM</i> vs. <i>DWDM</i> .....	25

1.6.1.	Las principales ventajas de <i>DWDM</i> sobre <i>TDM</i> .....	29
1.6.2.	Los inconvenientes de <i>DWDM</i> .....	30
2.	FUNDAMENTOS DE LA LUZ RELACIONADOS A LA FIBRA.....	31
2.1.	Fundamentos de la luz.....	31
2.1.1.	La onda de luz .....	31
2.1.2.	Partícula natural de la luz .....	32
2.2.	Principio de propagación óptica .....	34
2.2.1.	Propagación de la luz .....	35
2.2.2.	Ley de <i>Snell</i> .....	36
2.2.3.	Descripción óptica .....	36
2.2.4.	Propagación.....	38
2.2.5.	Velocidad .....	39
2.2.6.	Ancho de banda.....	40
2.3.	Prisma óptico .....	40
2.3.1.	Difracción.....	42
2.3.2.	Difracción de rejilla .....	43
2.4.	Interacción de la luz con la materia.....	44
2.4.1.	Refracción y reflexión .....	44
2.4.1.1.	Refracción .....	44
2.4.1.2.	Reflexión .....	45
2.4.2.	Birrefringencia.....	46
2.4.3.	Polarización .....	47
2.5.	Atenuación espectral en la fibra.....	49
2.5.1.	Espaciamiento ( <i>scattering</i> ) de <i>Rayleigh</i> .....	49
2.5.2.	Dispersión.....	52
2.5.3.	Dispersión modal .....	52
2.5.4.	Dispersión cromática .....	53

2.5.5.	Dispersión de modo de polarización <i>PMD</i> .....	54
2.6.	Efectos en casos de impureza en la fibra.....	56
2.6.1.	Micro curvas y macro curvas.....	57
2.6.2.	Efecto de micro cortes .....	59
2.6.3.	Efectos de presión mecánica .....	59
2.6.4.	Efectos de las variaciones en temperatura .....	60
2.7.	Codificación y decodificación óptica .....	61
2.7.1.	Codificando información óptica .....	61
2.7.1.1.	Señales Unipolar y Bipolar .....	62
2.7.2.	Formato <i>ASK</i> .....	63
2.7.3.	Demodulador <i>ASK</i> .....	65
2.7.4.	Formato <i>PSK</i> .....	66
2.7.5.	Formato <i>FSK</i> .....	67
2.7.6.	Demoduladores <i>PSK</i> y <i>FSK</i> .....	68
3.	FUNDAMENTOS DEL DWDM.....	71
3.1.	Sistemas Ópticos de Comunicación .....	71
3.2.	Componentes de un sistema <i>DWDM</i> .....	76
3.2.1.	Multiplexor/Demultiplexor <i>OADM</i> .....	77
3.2.1.1.	Multiplexor óptico <i>Add/Drop</i> .....	77
3.2.1.2.	Función <i>OADM</i> .....	78
3.2.1.3.	<i>OADM</i> .....	79
3.2.2.	Técnicas de multiplexión y demultiplexión .....	80
3.2.2.1.	Demultiplexor <i>Mach Zehnder</i> .....	83
3.2.2.2.	Transponder .....	85
3.2.2.3.	La función de un transpondedor.....	86
3.2.2.4.	<i>Cross</i> conector óptico <i>OXC</i> .....	87
3.2.2.5.	Modelo óptico de <i>cross</i> conexión .....	88
3.2.2.6.	Conmutación óptica de espacio libre...	89

	3.2.2.7.	Cross conectores de estado solido .....	90
3.2.3.		Micro-sistema electromecánico <i>MEMS</i> .....	93
	3.2.3.1.	Arreglo de espejos con actuadores.....	95
3.2.4.		Espectro óptico de filtros y rejillas.....	97
	3.2.4.1.	Filtro <i>Fabry-Perot</i> .....	97
	3.2.4.2.	Resonador <i>Fabry-Perot</i> .....	98
	3.2.4.3.	Red de <i>Bragg</i> en fibra .....	101
	3.2.4.4.	Fibra <i>Bragg</i> .....	103
3.3.		Clasificación de los amplificadores de fibra óptica .....	105
	3.3.1.	Amplificadores de potencia.....	105
	3.3.2.	Preamplificadores .....	106
	3.3.3.	Amplificador de línea .....	106
	3.3.4.	Amplificador de fibra dopado de	
		<i>Erbium (EDFA)</i> .....	108
	3.3.4.1.	Configuraciones de bombeo .....	110
	3.3.4.2.	Ganancia de un <i>EDFA</i> .....	111
	3.3.5.	Amplificador de fibra dopada <i>PDFA</i> .....	113
	3.3.6.	Amplificadores de <i>Raman</i> .....	114
4.		TOPOLOGÍA Y TRANSMISIÓN CON MULTIPLEXIÓN	
		DENSAPOR DIVISIÓN DE ONDA.....	117
4.1.		Topologías .....	117
	4.1.1.	Topologia punto a punto.....	117
	4.1.2.	Topologia de anillo .....	119
	4.1.3.	Topologia de malla .....	121
4.2.		Clasificación de las redes ópticas según su tamaño	
		geográfico y funcionalidad.....	123
	4.2.1.	Redes de larga distancia .....	124
	4.2.2.	Redes de acceso .....	125

4.2.3.	Redes de área metropolitana.....	125
4.2.4.	Diferencias entre redes de acceso y redes metropolitanas.....	126
4.3.	Ip sobre <i>ATM / SDH</i> sobre <i>DWDM</i> .....	127
4.3.1.	Encapado <i>IP</i> sobre <i>DWDM</i> .....	128
4.3.2.	<i>IP</i> sobre <i>ATM</i> sobre <i>SONET/SDH</i> sobre <i>DWDM</i> .....	129
4.3.3.	<i>IP</i> sobre <i>ATM</i> sobre <i>DWDM</i> .....	130
4.3.3.1.	<i>IP</i> sobre <i>SONET/SDH</i> sobre <i>DWDM</i> .....	131
4.3.3.2.	<i>IP</i> sobre <i>DWDM</i> .....	132
4.3.4.	Capas ópticas de la OTN.....	132
4.3.4.1.	Funciones generales de Gestión entre capas de la Red.....	137
4.3.5.	Interfaces estándar y marcos de estructura de OTN.....	140
4.3.5.1.	OTN sobre SDH (G-modem).....	141
4.3.5.2.	Mapeo de la señal del cliente en la OTN.....	141
4.3.5.3.	El procedimiento de trama genérico.....	142
4.3.5.4.	Encabezado <i>GFP</i> , control de error y sincronización.....	143
4.3.5.5.	Estructura del marco <i>GFP</i> .....	148
4.3.5.6.	Modo <i>GFP-F</i> y <i>GFP-T</i> .....	149
5.	DISEÑO – INGENIERÍA – IMPLEMENTACIÓN DEL ANILLO <i>DWDM</i> .....	153
5.1.	Ingeniería y diseño óptico.....	153

5.2.	Factores que afectan el diseño del sistema .....	158
5.2.1.	Efectos en la fibra por no linealidad .....	159
5.2.2.	Efecto de la dispersión cromática en la longitud de transmisión y penalidad de potencia .....	162
5.2.3.	Diseño de un enlace punto a punto basados en el Factor Q y OSNR .....	163
5.2.3.1.	Cálculo de Q facto de OSNR .....	165
5.2.3.2.	Margen de requerimiento .....	166
5.2.3.3.	Requisitos del margen de diseño usando la compensación de dispersión cromática .....	169
5.2.3.4.	Bases de diseño OSNR .....	174
5.2.4.	Efectos FWM y XPM a larga distancia de diseño .....	174
5.2.5.	PMD en diseños de larga distancia .....	177
5.3.	Diseño de topología virtual o lógica para el paso DWDM .....	179
5.4.	Clasificación del diseño de las redes ópticas basadas en el tamaño geográfico y funcionalidad .....	182
5.5.	Arquitectura nodal y canal óptico de servicio .....	185
5.6.	Protección en la red DWDM y protección de conmutación .....	188
5.6.1.	Protección para diferentes calidades de <i>lightpath</i> .....	192
5.6.2.	Protección de malla .....	194
5.7.	Asignación de onda y ruteo .....	194
5.7.1.	Los inconvenientes básicos .....	194

5.7.2.	Asignación y ruteo de lambda y programación lineal.....	197
5.7.3.	Gráfica coloreada aprovechando la asignación de lambda .....	199
5.7.4.	Creación estática y dinámica de <i>lightpath</i> .....	204
5.7.5.	Diseño virtual de a topología .....	206
5.8.	Diseño e implementación de anillo	
	<i>DWDM</i> (instalación).....	208
5.8.1.	Localización geográfica y cobertura de la red .....	210
5.8.2.	Análisis de tráfico .....	211
5.9.	Características del equipo <i>SPECTRAL WAVE DWDM4000</i> .....	214
5.9.1.	Elementos de red .....	216
5.10.	Diseño de anillo y estudio de los factores de propagación que afectan al diseño de los sistemas ópticos <i>DWDM</i> .....	218
5.10.1.	Recuento de ruta (medición).....	219
5.10.2.	Cálculos de diseño .....	222
5.10.3.	Estableciendo lambdas.....	226
5.10.4.	Descripción del costo de los equipos.....	227
5.10.5.	Análisis de recuperación de costos .....	229
5.10.5.1.	Ingresos .....	230
5.10.5.2.	Gastos de inversión .....	231
5.10.5.3.	Gastos operativos .....	231
5.10.5.4.	Alquiler de fibra oscura.....	232
5.10.5.5.	Depreciación .....	232
5.10.5.6.	Análisis de la inversión.....	232
	CONCLUSIONES.....	235



RECOMENDACIONES .....	237
BIBLIOGRAFÍA .....	239
ANEXO .....	241

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Capa de red actual .....	2
2.	Esquema de capacidad de red .....	4
3.	Capa de infraestructura de transporte- siguiente generación .....	5
4.	Capacidad de gestión de ancho de banda .....	7
5.	Reglas de la tecnología .....	16
6.	Ley de Edholm.....	17
7.	Red de nueva generación.....	23
8.	Redes clásicas/ Redes nueva generación.....	26
9.	Multiplexión por división de tiempo.....	27
10.	Protocolos y capacidades.....	29
11.	Espectro de luz.....	33
12.	Trayectoria de un haz de luz.....	34
13.	Ángulo de aceptación máximo.....	35
14.	Reflexión de ángulo interno .....	37
15.	Ángulo de reflexión total .....	38
16.	Velocidad es típicas vidrio/vacío.....	39
17.	Gráfico pérdidas por frecuencia en tipos de fibra .....	40
18.	Bases del prisma .....	41
19.	Efecto de la difracción .....	42
20.	Difracción en una rejilla .....	43
21.	Refracción.....	45
22.	Reflexión.....	46
23.	Polarización .....	48

24.	Tipos de dispersión .....	50
25.	Longitud de onda vs. atenuación.....	51
26.	Bandas definidas ITU-T.....	51
27.	Dispersión modal.....	53
28.	Dispersión cromática.....	54
29.	PMD .....	55
30.	Pérdida de enlace mecánico .....	56
31.	Fibra ideal sin curvaturas .....	57
32.	Coefficiente de atenuación con curvas y sin curvas .....	58
33.	Materia con micro cortes .....	59
34.	Efectos de presión mecánica .....	60
35.	Efectos de temperatura .....	61
36.	Detección coherente .....	62
37.	Modulación bipolar .....	64
38.	Modulador Mach Zehnder .....	64
39.	Modulador externo .....	65
40.	Modulador PSK .....	66
41.	Codificación y decodificación óptica .....	68
42.	Principio básico Demodulador heterodino .....	68
43.	Principio básico demodulador homodino FSK.....	69
44.	Diagrama de regenerador .....	72
45.	Pérdida en fibra .....	73
46.	Compensación de pérdida.....	74
47.	Técnica DWDM .....	75
48.	Unión TDM /DWDM.....	75
49.	Ampliación capacidad .....	76
50.	Componentes de un sistema DWDM .....	77
51.	Multiplexor óptico .....	78
52.	OADM.....	79

53.	Técnicas de Multiplexión .....	81
54.	Principios de refracción .....	81
55.	Principios de difracción .....	82
56.	Interferómetro Mach-Zehnder .....	84
57.	Transponder .....	85
58.	Aplicación transponder .....	86
59.	Matriz cross conexión .....	89
60.	WGR .....	90
61.	Cross conector estado sólido .....	91
62.	Arreglo 4X4 estado sólido .....	92
63.	Microsistemas electrónicos .....	94
64.	MEMS .....	95
65.	Arreglo de espejos .....	96
66.	Macro fotografía .....	96
67.	Fabry Perot .....	98
68.	Incremento de reflectancia .....	98
69.	Resonador Fabry Perot .....	99
70.	Transmitancia .....	101
71.	Red de Bragg .....	103
72.	Fibra Bragg .....	104
73.	Funcionamiento de un amplificador óptico .....	107
74.	Diagrama de niveles energéticos del Erbio .....	109
75.	Configuraciones de un EDFA .....	110
76.	Representación de la ganancia de un EDFA .....	112
77.	Obtención de una ganancia constante con la longitud de onda .....	115
78.	Topología punto a punto habilitada con add/dropp .....	118
79.	Topología anillo DWDM .....	121
80.	Topología combinada/malla .....	122
81.	Jerarquía global de redes .....	124

82.	Encapado IP sobre DWDM .....	129
83.	Encapado general y monitoreo de OTN .....	133
84.	Funciones digitales de OTN y niveles de cross-conexión .....	136
85.	Ej. conexión monitoreo OTN.....	138
86.	Diverso tipo de carga útil en un solo canal óptico.....	145
87.	Área de carga útil GFP .....	146
88.	Cabecera de GFP.....	147
89.	Marco general de GFP .....	150
90.	Detalles de la estructura GFP.....	151
91.	Encapsulado Ethernet sobre GFP .....	152
92.	Paso simple de amplificación y ruido asociado con la señal .....	156
93.	Ruido acumulado, resultado de múltiples pasos de amplificación...	157
94.	Relación de factor Q con BER.....	164
95.	Factor Q/ penalidad .....	164
96.	Variación de la dispersión con penalidad de potencia.....	171
97.	Posicionamiento de DCU de pre-compensación .....	172
98.	Mapa de posicionamiento para post-compensación.....	173
99.	FEM Igual separación.....	175
100.	Canales de desigual espaciamento .....	176
101.	El PMD en el pulso .....	177
102.	Diagrama de flujo diseño de red óptica .....	180
103.	Número de nodos red vs. anillo .....	181
104.	Segmentación de redes.....	183
105.	Topología por nodo .....	187
106.	Protección de enlace (note que cada transmisor y receptor tienen su conmutador) .....	190
107.	Protección de enlace (Note que solamente recepción posee conmutación) .....	190
108.	Protección 1: N (protección compartida) .....	192

109.	La topología básica.....	201
110.	Enrutador del tráfico sobre la topología .....	202
111.	El gráfico de <i>lightpath</i> .....	203
112.	Distribución geográfica para nodos de la red DWDM .....	211
113.	Traslado anillo STM64 .....	212
114.	Descripción de topología .....	213
115.	Interconexiones anillo DWDM.....	219
116.	Configuración por nodo.....	223
117.	Potencias del diseño de transmisión.....	225
118.	Diseño de lambdas .....	226
119.	Porcentajes de inversión por estación .....	229

## TABLAS

I.	Áreas clave de flexibilidad .....	19
II.	Mercado (1999-2003) .....	20
III.	Utilización de redes.....	21
IV.	Sistema básico de transmisión óptica.....	71
V.	Estandarización de amplificadores .....	107
VI.	Parámetros típicos de un amplificador EDFA .....	113
VII.	Mecanismo de protección .....	139
VIII.	Estructura del marco GFP .....	148
IX.	Pérdida en la ventana de operación de 1 550 nm.....	168
X.	Requerimiento de margen .....	169
XI.	Parámetros de dispersión por tipo de fibra .....	173
XII.	Comparación de redes.....	184
XIII.	Asignación de lambdas.....	203
XIV.	Elementos de red.....	218
XV.	Mediciones de fibra óptica anillos DWDM.....	220

XVI.	Características y referencias de equipo de medición .....	221
XVII.	Cálculos de diseño .....	224
XVIII.	Diseño de amplificación .....	225

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
ADSS	Cable autoportado
VC	Contenedor Virtual
dB	Decibelio
ETH	Ethernet
Gbps	Gigabit por segundo
PDH	Jerarquía Digital Plesiócrona
SDH	Jerarquía Digital Síncrona
Km	Kilómetro
Mbps	Megabit por segundo
OSI	Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos
TDM	Multiplexación por división de tiempo
WDM	Multiplexación por longitud de onda
nm	Nanómetro
ns	Nanosegundo
%	Porcentaje
MAN	Red de Área Metropolitana
LAN	Red de Área Local
OTDR	Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo
DSL	Suscriptor de Línea Digital
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones





## GLOSARIO

<b>ADM</b>	Multiplexor que permite extraer, en un punto intermedio de una ruta, parte del tráfico cursado y a su vez, inyectar nuevo tráfico desde ese punto ( <i>Multiplexer Add/Dropp</i> ).
<b>ASK</b>	Forma de modulación en la cual se representan los datos digitales como variaciones de amplitud de la onda portadora. ( <i>Amplitude-shift keying ASK</i> ).
<b>ATM</b>	Tecnología de red, que permite la transferencia simultánea de datos y voz a través de la misma línea, transfiere datos de manera asíncrona. ( <i>Asynchronous Transfer Mode</i> ).
<b>AWG</b>	A veces llamado enrutador óptico de guía de onda. Consiste en una matriz de guías de ondas curvadas con una diferencia fija en la longitud del camino entre canales adyacentes. Matriz de rejilla de guía de onda ( <i>Arrayed Waveguide</i> ).

**Back Bone**

Se refiere a las principales conexiones troncales, el término se usa para describir grandes redes que se interconectan entre ellas.

**BER**

Número de *bits* o bloques incorrectamente recibidos, con respecto al total de *bits* o bloques enviados durante un intervalo especificado de tiempo. Tasa de *bit* errado (*Bit Error Rate*).

**BLSR**

Es una arquitectura de anillo *SONET* que provee las fibras de trabajo y protección entre los nodos. Si la fibra de trabajo entre los nodos se corta, el tráfico se enruta automáticamente a la protección de la fibra (*Bidirectional Line Switch Ring BLSR*).

**Booster**

Utilizada en el ámbito de equipos de telecomunicaciones, regularmente para equipos multiplexores/ demultiplexores de fibra óptica (*ADM*), unidad de apoyo o amplificador dado que complementa una potencia extra a la unidad con la que va conectada.

**Cascadear**

Sucesión continua y abundante de elementos electrónicos activos, generalmente enlazados o relacionados entre sí.

<b>CRC</b>	Es un código de detección de error cuyo cálculo es una larga división de computación en el que se descarta el cociente y el resto se convierte en el resultado. ( <i>Cyclic redundancy check CRC</i> ).
<b>CWDM</b>	Es un sistema que pertenece a la familia de multiplexión por división de longitud de onda ( <i>WDM</i> ) la cual está desarrollada especialmente para zonas metropolitanas. Multiplexación por división de longitud de onda gruesa ( <i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i> ).
<b>Demultiplexor</b>	Dispositivo que puede recibir varias entradas y transmitir las por un medio de transmisión compartido, para que varios nodos puedan comunicarse al mismo tiempo.
<b>DSF</b>	Es un tipo de fibra monomodo que logra tener una dispersión cromática nula en la 3ª ventana, en contra su atenuación aumenta ligeramente (unos 0,25Db/km) y su principal inconveniente se debe a los efectos no lineales como el fenómeno de mezclado de cuarta onda ( <i>FWM</i> ) que imposibilitan la utilización de esta fibra óptica en sistemas <i>WDM</i> . Fibra de dispersión modificada ( <i>Dispersion Shifted Fiber</i> ).

**DWDM**

Es un método de Multiplexación por división de longitud, varias señales portadoras (ópticas) se transmiten por una única fibra óptica utilizando distintas longitudes de onda de un haz láser para cada una de ellas. (*Dense Wavelength Division Multiplexing*).

**E1**

Trama E1 es un formato de transmisión digital, consta de 32 divisiones (*time slots*) PCM (*pulse code modulation*) de 64 k cada una, lo cual hace un total de 30 líneas de teléfono normales más 2 canales de señalización.

**EDFA**

Es un amplificador de fibra, normalmente con tierras raras que se basa en el dopaje con Erblio de una fibra óptica. Amplificador de fibra dopada de Erblio (*Erbium Doped Fiber Amplifier*).

**Encapado**

Se refiere al término dado a los protocolos con diferentes escalas de programación en su estructura y comunicación con otro protocolo.

**Escalabilidad**

Es la propiedad deseable de un sistema, una red o un proceso, que indica su habilidad para extender el margen de operaciones sin perder calidad, o bien manejar el crecimiento continuo de trabajo de manera fluida.

<b>FDDI</b>	Es un conjunto de estándares ISO y ANSI para la transmisión de datos en redes de computadoras de área extendida o local (LAN) mediante cable de fibra óptica. Interfaz de datos distribuidos por fibra ( <i>Fiber Distributed Data Interface</i> ).
<b>FDM</b>	Es un tipo de multiplexación utilizada generalmente en sistemas de transmisión analógicos y se transmite en forma simultánea por un sólo medio de transmisión. Así se pueden transmitir muchos canales de banda relativamente angosta por un solo sistema de transmisión de banda ancha. Multiplexación por división de frecuencia ( <i>Frequency Division Multiplexing</i> ).
<b>FEC</b>	Es un tipo de mecanismo de corrección de errores, que permite su corrección en el receptor sin retransmisión de la información original. Reduce el número de transmisiones de errores, así como los requisitos de potencia de los sistemas de comunicación ( <i>Forward Error Correction o FEC</i> ).
<b>Fibra Oscura</b>	Denominación popular que se atribuye a los circuitos de fibra óptica, que han sido desplegados por algún operador de tele-

comunicaciones, pero no están siendo utilizados.

**Fotónica**

Ciencia de la generación, control y detección de fotones, en particular en el espectro visible e infrarrojo cercano.

**FSK**

Modulación de frecuencia cuya señal modulante es un flujo de pulsos binarios que varía entre valores predeterminados, de modo que la señal modulada resultante codifica la información asociándola a valores de frecuencia diferentes.

**FWM**

El efecto consiste en la generación de productos espectrales o mezclas de las ondas, en el caso de  $3 \lambda$  una cuarta onda, cuya frecuencia resulta de la mezcla de las frecuencias originales en un material no lineal. Mezclado de cuatro ondas (*Four-Wave Mixing*).

**GE**

Ampliación del estándar *Ethernet* (concretamente la versión 802.3ab y 802.3z del IEEE) que consigue una capacidad de transmisión de 1 gigabit por segundo *Gigabit Ethernet*.

<b><i>GFP-F</i></b>	Modo <i>GFP</i> que mapea cada trama cliente en una única trama <i>GFP</i> . <i>GFP-F</i> se emplea cuando la señal cliente está enmarcada o paquetizada por el protocolo cliente.
<b><i>GFP-T</i></b>	Modo por otra parte, permite el mapeo de múltiples flujo de datos cliente de código de bloque 8B/10B en un código de bloque 64B /65B eficiente para transportarlo dentro de una trama <i>GFP</i> .
<b><i>GMPLS</i></b>	Avance evolutivo lógico de MPLS que soporta no sólo la conmutación de paquetes, sino también la conmutación en el tiempo, en longitud de onda y de fibras ópticas. Conmutación de etiquetas multiprotocolo generalizado ( <i>Generalized Multiprotocol Label Switching</i> ).
<b><i>GPF</i></b>	Técnica de multiplexación definida por la <i>ITU-T G.7041</i> . Eso permite el mapeo de señales cliente de "capa-alta" y longitudes variables sobre redes de transporte como <i>SDH/SONET</i> .
<b><i>GVD</i></b>	En una onda se refiere a la velocidad con que las amplitudes de la onda se propagan a través del espacio. <i>Group Velocity Dispersion</i> <i>GDV</i> .



**Hertzio**

Unidad del Sistema Internacional, representa un ciclo por cada segundo. Proviene del apellido del físico alemán Heinrich Rudolf Hertz que descubrió la propagación de las ondas electromagnéticas.

**Heterodina**

La frecuencia producida por la mezcla de dos o más señales en un dispositivo no lineal se denomina heterodino.

**Hub**

Es un dispositivo que permite centralizar el cableado de una red y poder ampliarla. Esto significa que dicho dispositivo recibe una señal y repite esta señal emitiéndola por sus diferentes puertos.

**IP**

Una dirección IP es una etiqueta numérica que identifica, de manera lógica y jerárquica, a una interfaz (elemento de comunicación/conexión) de un dispositivo (habitualmente una computadora) dentro de una red que utilice el protocolo *IP (Internet Protocol)*

**ISDN**

Es una red que procede por evolución de la red telefónica existente, que al ofrecer conexiones digitales de extremo a extremo permite la integración de multitud de servicios en un único acceso, independientemente de la

naturaleza de la información a transmitir y del equipo terminal que la genere.

**Lambda**

Lambda ( $\Lambda$   $\lambda$ ) es la undécima letra del alfabeto griego. La letra lambda es usada como símbolo en el área electrónica para representar, como uno de los múltiples caminos o frecuencias de transmisión en un rayo de luz.

**Laser**

Emisión de radiación estimulada por amplificación de luz (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

**LED**

Diodo emisor de luz (*Light Emissor Diode*).

**Lightpath**

Término utilizado para describir una conexión ininterrumpida lógicamente a través de los nodos ópticos, diseñada para que la información realice el camino de origen a destino. (Trayectoria óptica).

**MAN**

Red de alta velocidad (banda ancha) que dando cobertura en un área geográfica extensa, proporciona capacidad de integración de múltiples servicios mediante la transmisión de datos, voz y vídeo, sobre medios de transmisión tales como fibra óptica y par trenzado. Redes de área metropolitana (*Metropolitan Area Network*).

<b>MEMS</b>	Es la integración de elementos mecánicos, sensores, actuadores y electrónicos en un sustrato de silicio mediante la tecnología de micro fabricación ( <i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i> ).
<b>MPLS</b>	Es un mecanismo de transporte de datos estándar creado por la IETF y definido en el RFC 3031. Opera entre la capa de enlace de datos y la capa de red del modelo OSI Conmutación de etiquetas multiprotocolo ( <i>Multiprotocol Label Switching</i> ).
<b>NGN</b>	Es un amplio término que se refiere a la evolución de la actual infraestructura de redes de telecomunicación y acceso telefónico con el objetivo de lograr la congruencia de los nuevos servicios multimedia (voz, datos, video) en los próximos 5-10 años.
<b>NMS</b>	Un sistema de gestión de red ( <i>NMS</i> ) es una combinación de <i>hardware</i> y <i>software</i> utilizados para supervisar y administrar una red. Sistemas de Administración de red ( <i>Network Management Systems</i> ).
<b>NZ-DSF</b>	Fibra óptica de dispersión desplazada no-cero. Presenta una dispersión baja, pero que todavía es lo suficientemente alta para impedir

el desarrollo de los fenómenos de no linealidad fibra de dispersión desplazada no nula (*Non-Zero Dispersion Shifted Fibre*).

### ***OADM***

Un *add-drop* multiplexor óptico (*OADM*) es un dispositivo usado en la multiplexación por división de longitud de onda de los sistemas de multiplexación y enrutamiento de los diversos canales de luz de entrada / salida de una fibra monomodo (SMF). Multiplexor óptico de inserción/extracción (*Optical Add/Drop Multiplexer*).

### ***OSNR***

Relación señal - ruido (a menudo abreviado SNR o S/N) es una medida utilizada en la ciencia y la ingeniería para cuantificar la cantidad de una señal que ha sido corrompida por el ruido. Relación señal que a ruido óptico (*Optical Signal to Noise Ratio*).

### ***OSPF***

Protocolo de enrutamiento jerárquico de paralela interior o IGP (*Interior Gateway Protocol*), se usa para calcular la ruta más corta posible. Abrir primero la trayectoria más corta (*Open Shortest Path First*).

**OTDR**

Es un instrumento óptico-electrónico usado para caracterizar una fibra óptica. Inyecta en la fibra bajo análisis una serie de pulsos ópticos, reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (*Optical Time Domain Reflectometer*).

**OTN**

Conjunto de elementos de red ópticos conectados mediante fibra óptica, capaces de proveer transporte, multiplexación, enrutado, gestión y supervisión de las señales ópticas. Red de transporte óptico (*Optical Transport Network*).

**OXC**

Una conexión óptica cruzada (*OXC*) es un instrumento que utiliza en el transporte de datos de telecomunicaciones, como interruptor de alta velocidad, para señales ópticas en una fibra óptica de la red. Conector cruzado óptico (*Optical Cross Connect*).

**Permeabilidad eléctrica**

Capacidad de un material para que un fluido eléctrico lo atraviese sin alterar su estructura interna.

**Permitividad**

La permitividad (o impropriamente constante dieléctrica) es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. Se determina por la habilidad de un material de polarizarse en

reacción a la aplicación de un campo eléctrico y de esa manera, cancelar parcialmente el campo dentro del material.

**PMD**

La dispersión de polarización es el fenómeno de separación de las ondas de distinta frecuencia al atravesar un material en la fibra óptica, se relaciona con la dirección de sus vibraciones. El viaje de la luz en una fibra típica vibra en dos modos de polarización perpendiculares. Dispersión por modo de polarización (*Polarization Mode Dispersion*).

**PSTN**

La red telefónica pública conmutada (*PSTN*), también conocida como la *Old Tele-phone Service (POTS)* es la red pública mundial de conmutación de circuito de las redes telefónicas.

**QoS**

Calidad del servicio es la capacidad de proporcionar prioridad diferente a las distintas aplicaciones, los usuarios, o los datos corrientes, o para garantizar un cierto nivel de rendimiento a un flujo de datos. Calidad de servicio (*Quality of Service*).

**Raman**

Dispersión Raman o el denominado efecto Raman es una dispersión inelástica de un fotón.

**RFA**

Amplificadores Raman se basan en una interacción no lineal entre la señal óptica y la señal de bombeo de alta potencia. Amplificador de fibra de efecto Raman (*Raman Fiber Amplifier*).

**RSVP**

Es una capa de transporte del protocolo diseñado para reservar recursos a través de una red de servicios integrados como Internet. Protocolo de reservación de recursos (*Resource Reservation Protocol*).

**SDH Sonet**

*SDH* Jerarquía digital Sincrónica (*Synchronous Digital Hierarch*) ,es un protocolo de transporte (primera capa en el modelo OSI) basado en la existencia de una referencia temporal común (Reloj primario), que multiplexa diferentes señales dentro de una jerarquía común flexible, y gestiona su transmisión de forma eficiente a través de fibra óptica, con mecanismos internos de protección.

**SNMP**

Es un protocolo de la capa de aplicación que facilita el intercambio de información de administración entre dispositivos de red. Protocolo sencillo de administración de redes (*Simple NetworkManagement Protocol*).

<b><i>Spectral-wave</i></b>	Solución de redes ópticas patentizado por NEC, brinda una plena capacidad de multiplexión flexible de hasta 40 longitudes de onda.
<b><i>SPM</i></b>	Efecto óptico no lineal resultado de la interacción de la luz con la materia. Auto modulación de fase ( <i>Self-Phase Modulation</i> ).
<b><i>SRS</i></b>	Dispersión estimulada de Raman ( <i>Stimulated Raman Scattering</i> ). Es una combinación de un proceso de Raman con la emisión estimulada para amplificar el interior del material estándar con bajo nivel de ruido para el proceso de amplificación.
<b>T1</b>	Es un estándar de entramado y señalización para transmisión digital de voz y datos basado en PCM ampliamente usado en telecomunicaciones.
<b><i>TDM</i></b>	Multiplexación por división de tiempo ( <i>Time Division Multiplexing</i> ). Es una técnica que permite la transmisión de señales digitales y cuya idea consiste en ocupar un canal (normalmente de gran capacidad) de transmisión a partir de distintas fuentes, de esta manera se logra un mejor aprovechamiento del medio de transmisión.



<b>Topología</b>	Es el estudio de aquellas propiedades de los cuerpos geométricos que permanecen inalteradas por transformaciones continuas.
<b>Transistor</b>	Dispositivo electrónico semiconductor que cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador.
<b>Transmitancia</b>	Magnitud que expresa la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en la unidad de tiempo (potencia).
<b>Transpondedor</b>	Dispositivo utilizado en telecomunicaciones cuyo nombre viene de la fusión de las palabras inglesas <i>Transmitter</i> (Transmisor) <i>Responder</i> (Contestador / Respondedor).
<b>UIT</b>	Organismo especializado de la Organización de las Naciones Unidas encargado de regular las telecomunicaciones a nivel internacional entre las distintas administraciones y empresas operadoras. Unión Internacional de Telecomunicaciones ( <i>International Telecommunication Union</i> ).
<b>UNI</b>	Conexión de un <i>Switch ATM</i> de una empresa pública o privada con un terminal <i>ATM</i> de un usuario normal. Interfaz usuario-red ( <i>User to Network Interface</i> ).

<b>UPSR</b>	Arquitectura de la tecnología <i>SDH</i> que permite enviar información por ambos lados del anillo y un selector de nodo de salida determina la calidad de copia superior y decide utilizar la mejor copia.
<b>VPN</b>	Redes privadas virtuales ( <i>Virtual Private Networks</i> ). Es una tecnología de red que permite una extensión de la red local sobre una red pública o no controlada, como por ejemplo Internet.
<b>WDM</b>	Multiplexación por división de longitud de onda ( <i>Wavelength Division Multiplexing</i> ). Es una tecnología que multiplexa varias señales sobre una sola fibra óptica mediante portadoras de diferente longitud de onda.
<b>WGR</b>	Una difracción de rejilla es dispositivo óptico pasivo que difracta la luz paralela, en direcciones específicas de acuerdo al ángulo de incidencia sobre la rejilla.
<b>Wi-fi</b>	Es un sistema de comunicación de datos inalámbrico flexible, muy utilizado como alternativa a las redes LAN cableadas o como extensión de éstas.

## **XPM**

Modulación de fase cruzada (*Cross-Phase Modulation*). Es un efecto óptico no lineal en una longitud de onda de la luz puede afectar a la fase de otra longitud de onda de la luz a través de la óptica efecto *Kerr*.

## RESUMEN

Tradicionalmente las redes de comunicación han estado especializadas en un determinado tipo de servicio: telefonía, datos, tv, etc, y su estructura así como su modo de operación está determinada siempre por el tipo de servicio; es decir que son redes independientes que incluyen el acceso, el transporte y la conmutación. Estos son los tres elementos esenciales de cualquier red de telecomunicación. Hoy en día, la tendencia es construir redes únicas, integradas y de multiservicios, que soporten la conexión mediante diferentes medios, con una infraestructura común de transporte y de acceso.

La red de hoy podría modelarse con dos capas, la capa de infraestructura de servicios proporciona las funciones necesarias para brindar al usuario final los servicios de telecomunicación y la capa de infraestructura de transporte.

Durante los últimos años, *DWDM* ha sido una de las soluciones tecnológicas que más atención ha suscitado dentro del campo de las comunicaciones ópticas.

La madurez de esta tecnología y la explosión de la demanda de ancho de banda en las redes de acceso y metropolitanas han propiciado su adaptación desde entornos de largas distancias a entornos metropolitanos, presentándose como una de las alternativas más atractivas en cuanto a prestaciones-costo. La nueva capa *DWDM* le da a la infraestructura de transporte nuevas capacidades que no son posibles con *TDM*.

Los sistemas *DWDM* comercialmente disponibles para largas distancias soportan en la actualidad hasta 800 Gbps, superando el cuello de botella alcanzando en *SDH* en 10 Gbps correspondientes a un *STM-64 para TDM*.

*DWDM* (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) es *WDM* de banda angosta, que generalmente involucra ocho o más longitudes de onda de luz, adaptándose a las actuales redes de fibra óptica.

En el nuevo modelo de red, la capa de transporte incluye las funcionalidades de transmisión, conmutación y encaminamiento de paquetes en el seno de la red. En ella se distinguen tres subcapas, la convergencia de *IP* se ve ampliamente apoyada por el multiplexado denso por división de onda, la tecnología *DWDM*. Por lo tanto la integración de la capa *IP* directa en la capa *DWDM* es la elección natural para reducir los costos, simplificar la gestión y el control, y para reducir los gastos generales de señalización.

El operador de telecomunicaciones, interesado en evolucionar a las redes de nueva generación, cuenta actualmente con una red, desplegada con tecnología *SDH*, los trayectos en los que se requiere optimizar el ancho de banda dado por la fibra óptica instalada, recorre siete departamentos de Guatemala.

Desde la perspectiva económica, la posibilidad de suministrar potencialmente una capacidad de transmisión ilimitada es la ventaja más obvia de la tecnología *DWDM*. Tomando en cuenta los datos anteriores, el operador de telefonía tiene dos opciones instalar nuevas redes de fibra o aumentar eficazmente el ancho de banda de la fibra existente, se presentaran los datos de los estudios realizados, para el diseño que se llevo a cabo para la

implementación final de esta red basándonos en los criterios técnicos descritos por el operador.

En el diseño del proyecto se utiliza el modelo del equipo *DWDM Spectral-Wave*, el cual soporta sistemas, *full-open*, integrado, espalda - espalda, protegido, y sistemas *OADM*, cada uno habilitado en aplicaciones de dos-fibras. Para que se optimice la toma de la decisión de la factibilidad del proyecto se realiza un análisis de la recuperación de los costos del proyecto.



## OBJETIVOS

### General

Exponer el crecimiento e importancia de las redes de tecnología Multiplexión Densa por División de Onda y su tendencia a formar parte de las principales conexiones troncales de las redes de nueva generación *NGN*.

### Específicos

1. Establecer la razón de las altas demandas de ancho de banda, que actualmente está dejando obsoletas las redes de los operadores de telecomunicaciones.
2. Identificar las principales ventajas que influyen en la toma de decisión, para aplicar la tecnología de Multiplexion Densa por Longitud de Onda en los proyectos crecientes de Backbone en la actual década, a nivel nacional.
3. Exponer la simplicidad y requerimientos de los sistemas de Multiplexacion Densa por Longitud de Onda, para la expansión de la capacidad de la red.
4. Exponer los beneficios de la implementación de la tecnología Multiplexion Densa por Longitud de Onda instalado en la red del operador de mayor préstamo de servicios telefónicos en Guatemala.





## INTRODUCCIÓN

Con el inicio del proceso de liberación de las telecomunicaciones en el mundo en la década de los 80, las telecomunicaciones entraron en una fase de cambios graduales nunca antes vistos en este sector. Esta tendencia al parecer es imparable y los cambios revolucionarios que se proyectan en este sector están empezando a desplegarse paulatinamente ya en los mercados más desarrollados y en menor intensidad en los mercados emergentes.

Aspectos tecnológicos, de mercado y de competitividad están impulsando este acelerado cambio. Esta evolución cambiará definitivamente el destino y la estructura del sector de telecomunicaciones en todo el mundo. Empresas y servicios de telecomunicaciones que antes operaban de manera separadas podrán ya en términos tecnológicos unificarse y ofertar bajo una única infraestructura tecnológica de voz, video, datos, movilidad etc. A esta evolución se le conoce como convergencia y es la base de las redes de Nueva Generación (*NGN*).

Históricamente el desarrollo de los servicios de comunicaciones ha estado condicionado por la tecnología, conduciéndonos a una estructura vertical de provisión de servicios, de tal forma que cada tipo de servicio ha utilizado una infraestructura dedicada. Estas estructuras por su naturaleza fueron volviéndose en el tiempo redes muy especializadas, bajo este esquema han operado desde décadas atrás los operadores de corte tradicional siempre orientados hacia la red, su modelo de negocios ha sido muy rígido con pocas posibilidades de innovación.

Sin embargo con la apertura a la competencia, el despliegue intenso de internet y el explosivo desarrollo tecnológico experimentado por las industrias de informática y telecomunicaciones durante esta última década, el modelo de negocio tradicional integrado verticalmente ya no se puede sostener. La convergencia en todas sus dimensiones obliga a los operadores tradicionales a planificar posibles escenarios de migración presionados en parte por los márgenes, cada vez más exigentes, de su negocio principal -la voz-, y las amenazas, de sus nuevos competidores móviles, de cable y de los nuevos entrantes.

A medida que las empresas intentan extender las capacidades de sus redes *LAN gigabit ethernet* a sus propias *WAN*, la creciente necesidad de disponer de mayores anchos de banda está llegando también a las redes metropolitanas, creando uno de los mercados de más rápido crecimiento. Los proveedores de servicios que intentan dar respuesta a la creciente demanda en las redes de área metropolitana, se han dado cuenta de que las capacidades de *SDH/SONET* no permiten una escalabilidad suficientemente rápida.

Por lo general, esta tecnología no puede sobrepasar los 2,5 Gbps, y las corporaciones empiezan a demandar servicios de *gigabit ethernet* y velocidades superiores. Actualmente, y gracias a la aparición de amplificadores de fibra óptica y láseres de múltiples longitudes de onda, la multiplexación por división en longitud de onda es una de las tecnologías que más atención suscita dentro del campo de las comunicaciones ópticas, pues estos dispositivos permiten incrementar enormemente la capacidad de los sistemas de transmisión sin requerir de desarrollos tecnológicos significativos y sin alterar las arquitecturas de red implantadas, permitiendo una evolución flexible y económica de las presentes redes, respondiendo a la demanda de mayor ancho de banda de transmisión.

El presente trabajo de graduación está pensado para que el lector lo utilice como un instrumento que ayude a debatir la tecnología, multiplexión densa por división de onda, aplicada para dar solución de las necesidad de mayores anchos de banda en las redes de los proveedores de servicios de telecomunicación, permitiendo al lector familiarizarse con la tecnología y analizar las redes *DWDM* desde una perspectiva de aplicación real, evaluando los datos de diseño y mediciones ópticas que se incluyen en el reporte de instalación, realizada en la red de uno de los operadores telefónicos más grandes en Guatemala.



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
ADSS	Cable autoportado
VC	Contenedor Virtual
dB	Decibelio
ETH	Ethernet
Gbps	Gigabit por segundo
PDH	Jerarquía Digital Plesiócrona
SDH	Jerarquía Digital Síncrona
Km	Kilómetro
Mbps	Megabit por segundo
OSI	Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos
TDM	Multiplexación por división de tiempo
WDM	Multiplexación por longitud de onda
nm	Nanómetro
ns	Nanosegundo
%	Porcentaje
MAN	Red de Área Metropolitana
LAN	Red de Área Local
OTDR	Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo
DSL	Suscriptor de Línea Digital
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones



# **1. ACTUALIDAD Y FUTURO DE LAS REDES ÓPTICAS DE TRANSPORTE**

## **1.1. Evolución de la red**

Tradicionalmente las redes han estado especializadas en un determinado tipo de servicio: telefonía, datos, radio, tv, etc. y su estructura así como su modo de operación, está determinada siempre por el tipo de servicio, es decir que eran redes independientes que incluían el acceso, el transporte y la conmutación, estos son los tres elementos esenciales de cualquier red de telecomunicación.

Estas redes independientes disponían de un vínculo entre ellas mediante conexiones. De alguna manera, esto se ha debido a la utilización de tecnologías analógicas, pero con la digitalización de las señales y el empleo de redes digitales extremo a extremo que no distinguen la fuente de información. Esta limitación se rompe y las redes tienden a ser de otra manera para aprovechar al máximo los recursos disponibles y abaratar costos.

Hoy en día, la tendencia es construir redes únicas, integradas y multiservicios, que soporten la conexión mediante diferentes medios, con una infraestructura común de transporte y de acceso.

De esta manera se consigue una mayor eficacia en su funcionamiento y una reducción de costos, al mismo tiempo que se puede tener una gestión unificada.

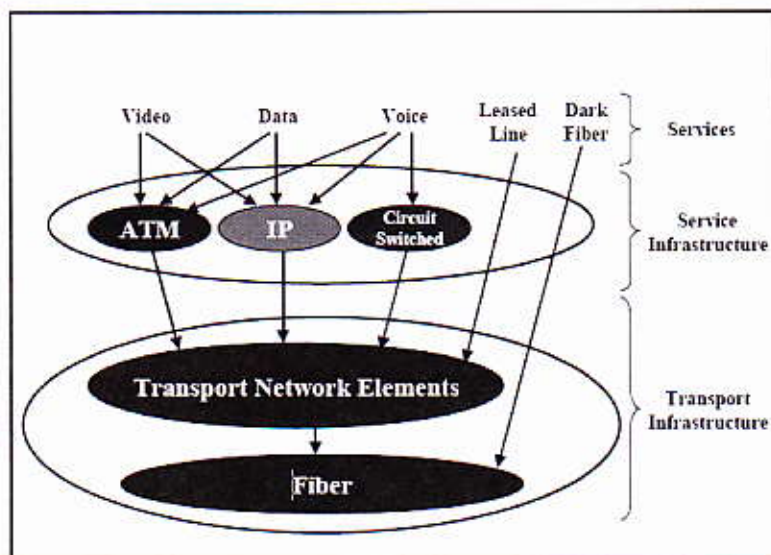


### 1.1.1. La red de hoy

Podría modelarse con dos capas como se ilustra en la figura 1. La capa de infraestructura de servicios, proporciona las funciones necesarias para brindar al usuario final los servicios de telecomunicación tales como:

- *On-demand (dial up-ruta)*, brindando conectividad con diferentes calidades de servicio.

Figura 1. Capa de red actual



Fuente: ALLEN, Brent; ROUSE, James. *Optical transport networks*, Nortel Networks, p.1.

Por ejemplo, el rápido crecimiento en los servicios de datos para los cajeros automáticos está causando un crecimiento explosivo en el despliegue de conmutadores y *routers IP*, mientras que en los servicios de voz se mantienen y es asumida por *switch* de banda estrecha *TDM* (64 Kb/s). Algunos servicios, como las líneas arrendadas, son tuberías de ancho de banda

fijo llevándose directamente por la capa de transporte, esencialmente sin pasar por la infraestructura de servicios.

La infraestructura de transporte proporciona conectividad entre los elementos de la red de servicios sobre los medios de comunicación físicos: fibra, radio y cobre. La fibra es un recurso de muy alta capacidad, mucho más elevada de la capacidad que se requiere para realizar una típica conexión entre dos elementos de la capa de servicio.

Para aprovechar plenamente la capacidad de la fibra, la capa de transporte proporciona elementos terminales de multiplexión, multiplexores de inserción/extracción, y *cross* conectores, de tal manera que muchas conexiones puedan compartir la misma fibra. Estas funciones se denominan colectivamente gestión del ancho de banda.

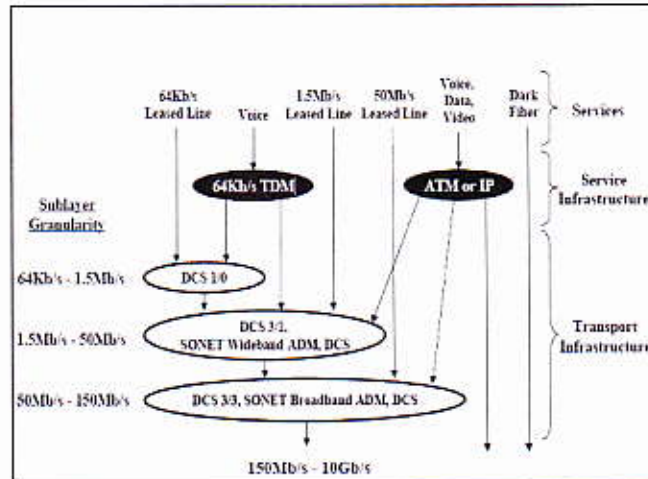
### **1.1.2. Evolución de la infraestructura del transporte**

La infraestructura de transporte está actualmente compuesta por subcapas como se ilustra en la figura 2. Estas subcapas se caracterizan por la cantidad de ancho de banda que administran y por trazar una historia de crecimiento y evolución, de las infraestructuras de transporte.

La gestión de la capacidad del ancho de banda de la figura 2, refleja la infraestructura de transporte.

Hay tres distintas subcapas en la infraestructura de transporte (sin incluir la fibra), que han evolucionado a través del tiempo dando respuesta al aumento de ancho de banda debido a una mayor demanda de servicios y se van presentando nuevos servicios que consumen y requieren más ancho de banda.

Figura 2. Esquema de capacidad de red



Fuente: ALLEN, Brent; ROUSE, James. Optical transport networks, Nortel Networks, p.2.

La subcapa de 1,5 Mb/s fue introducida debido a que el crecimiento de la red se hacía impráctica de manejar todo el ancho de banda con 64 Kb/s. Nuevos servicios son inicialmente introducidos con tasas más altas de información, y el transporte se permitió sobre las líneas de cobre existentes.

Similarmente la capa de 50 Mb/s se introdujo por el crecimiento de la red y esto hizo impráctico manejar todo el ancho de banda con 1,5 Mb/s, nuevos servicios fueron introducidos con tasas de información más altas y una tecnología que permitió hacer el transporte de esta tasa de información entre los elementos de servicio de la red fueron los cables de fibra óptica y multiplexores de fibra.

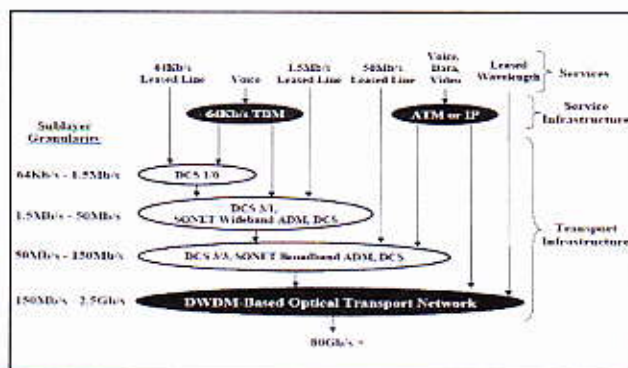
Hoy en día X 155 Mb/s no es una tubería suficientemente grande para comunicar una gran cantidad de elementos de servicio de la red con muchos otros. Swich ATM e IP ya están siendo introducidos a las interfaces troncales

con *gigabit/second*. Por otra parte, el crecimiento en general está haciendo que no resulte tan fácil gestionar el ancho de banda de todas las conexiones.

*DWDM* es la tecnología que permitirá proveer conexión entre la capa de elementos de servicio con gran velocidad sobre las plantas de fibra existentes, y por tanto el siguiente paso en la evolución de la infraestructura de transporte. La tecnología *DWDM* basada en *OTN* prevé alta capacidad por fibra, así como de alta capacidad por conexión. Cada longitud de onda *DWDM* proporciona un camino que puede transportar cualquier protocolo con un rango de tasa de bit desde 155 MB/s hasta 2,5 Gb/s y más. Estas longitudes de onda pueden multiplexarse con otras longitudes de onda y unirse, insertando y *cross*-conectando a nivel óptico, eliminando la necesidad de manejar el ancho de banda con una baja capacidad.

Cuando se adicione la nueva subcapa basada en *DWDM*, el diagrama encapsado de la red de transporte se verá como en la figura 3.

Figura 3. Capa de infraestructura de transporte- siguiente generación



Fuente: ALLEN, Brent; ROUSE, James. *Optical transport networks*, Nortel Networks, p.3.

La nueva capa *DWDM* le da a la infraestructura de transporte nuevas capacidades que no son posibles con *TDM*.

Una longitud de onda no está limitada por una tasa fija de tiempo dentro de un definido protocolo de multiplexión. Esta tecnología puede acarrear cualquier protocolo, tales como *SDH*, *SONET*, *ESCON*, *FDDI*, *Ethernet* y cualquier tasa de bits desde 155 Mb/s hasta 2,5 Gb/s.

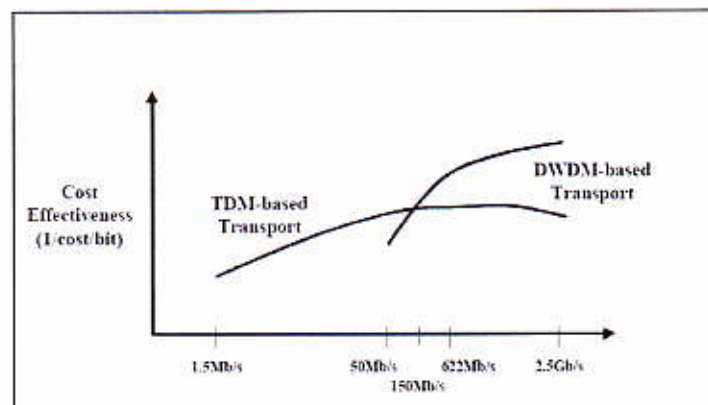
La decisión sobre que protocolo y tasa de bit será usada para una conexión entre elementos de capa de servicio, estará basada en el mejor interés de servicio, y no por la conveniencia de la capa de transporte. Por otra parte, el protocolo y la tasa de bit transportados en una determinada longitud de onda se puede cambiar en el instante sin alterar en nada la infraestructura del transporte, dando el proveedor de red, la capacidad de responder rápidamente a los cambios de servicio y crecimiento *DWDM* tiene mayor costo efectivo que la multiplexión basada en *TDM* (con ancho de banda entre 155 y 622 Mb/s).

Esto es ilustrado en la figura 4 y se basó en la fijación de precios de la tecnología hoy en día. Hay que tener en cuenta que esta figura no hace ninguna declaración sobre el total de ancho de banda alcanzado por la fibra, el que pasa a ser mucho mayor en el caso de *DWDM*, lo que se representa en la figura es la capacidad de gestión del ancho de banda, en la tecnología *DWDM* se vuelve más rentable que en la tecnología *TDM*. Si el valor de la fibra es también un factor a presentar, *DWDM* se hace aún más rentable económicamente.

Los proveedores de red están introduciendo una alta capacidad de datos optimizados en las tecnologías de la capa de servicios, para hacer frente al rápido crecimiento de los servicios de datos.

Las dos tecnologías en la vanguardia son el *ATM* e *IP*. Como la capacidad de red consumida por datos, sobrepasa la de voz, se espera que todos los servicios tarde o temprano emigraran en las nuevas infraestructuras de multiservicios creadas por estas tecnologías.

Figura 4. Capacidad de gestión de ancho de banda



Fuente: ALLEN, Brent; ROUSE, James. *Optical transport networks*, Nortel Networks, p.7.

Referente a los elementos de red *ATM* e *IP*, como se ha comentado con anterioridad, se espera que las redes ópticas adopten un esquema de arquitectura *IP* sobre *WDM* mucho más simple, en el cual se eliminen las capas *ATM* e incluso *SONET/SDH*, debido en gran parte al actual predominio de tráfico *IP*. Así, el primer paso consistiría en eliminar la capa *ATM* en favor de *POS* (packet over *SONET*), para posteriormente eliminar también la capa *SONET*.

Evidentemente, dada la inversión actual en tecnología *SONET/SDH* este proceso sería gradual y comenzaría en las áreas metropolitanas para extenderse posteriormente a los enlaces de largo alcance.

## 1.2. La visión de red

En la figura 5 se ilustra el objetivo de la visión de red, siendo ésta una sola infraestructura, con datos optimizados, multi-servicios interconectados sobre *DWDM* basado en OTN. La evolución de esta nueva visión de red no ocurrirá de la noche a la mañana, sin embargo la red *DWDM* basado en OTN provee un punto en común, habilitando el enlace entre la arquitectura de hoy y la visión de mañana.

La veloz eliminación de múltiples capas de servicio y aumento de capacidad en el medio de transporte, provoca una reducción en el número de tipos de elementos de red, dando como resultado una reducción en el capital de costos de operación en la red del operador. Interfaces de transporte de un protocolo específico y tasa de bits ya no serán requeridos, reduciendo costo del inventario en la red del proveedor he incrementado la flexibilidad de la red. Al mismo tiempo los datos optimizados para infraestructura de servicios permiten aumentar los ingresos mediante el apoyo a nuevos servicios de alto valor y rápido crecimiento.

Una alta capacidad es inherente en una solución *DWDM*. Cada longitud de onda puede soportar hasta 2,5 Gb/s y más, mientras que 32 o más longitudes de onda pueden ser multiplexadas en una fibra mono modo.

El resultado global sería la capacidad de 80 GB/s, agregando la solución de la necesidad de fibra óptica de los proveedores, y por último contribuyendo al apoyo de las troncales de gran capacidad situados entre la capa de servicio y elementos de red.

Un *DWDM* tiene la habilidad de enrutar longitudes de onda, y por tanto, tiene la misma capacidad que la actual *TDM* desplegados en una topología de anillo. De hecho, la *OTN* puede mejorar significativamente la vida útil de los elementos ópticos de la red evitando así una de las principales causas de fracaso en lo equipos. La flexibilidad del *DWDM* basado en *OTN* deriva de la independencia de tasa de bit y de las longitudes de onda que llevan el tráfico.

La independencia del protocolo y tasa de bit, son una ventaja clave de *DWDM* que permite a redes ópticas de transporte llevar diversos y diferentes tipos de tráfico sobre un canal óptico (*Gigabit Ethernet*, *ATM*, *SONET*, *FOTS* asincrónico, etc.) o la tasa de bit (150 Mb/s, 1,25 Gb/s, 2,5 Gb/s, etc.).

Esta independencia de protocolos y tasas de transmisión permiten a la red ser la mejor opción para elementos de interface con la red, y para responder rápidamente a nuevos requerimientos y necesidades de más ancho de banda.

Por ejemplo, interfaces de datos puros como *Gigabit Ethernet* o *ATM* puros, pueden ser conectados directamente a la capa de transporte sin un costo de adaptación. Requerimientos de usuario para incrementar ancho de banda o diferentes protocolos pueden ser solucionados rápidamente, sin la necesidad de aumentar la infraestructura de soporte.

### **1.2.1. Valor de la tecnología *DWDM* en el área metropolitana**

A medida que las empresas intentan extender las capacidades de sus redes LAN *Giga bit Ethernet* a sus propias WAN, la creciente necesidad de disponer de mayores anchos de banda está llegando también a las redes metropolitanas, creando uno de los mercados de más rápido crecimiento. En consecuencia, la tecnología *DWDM*, hasta hace poco enfocada exclusivamente



a las infraestructuras centrales de larga distancia, comienza a ser utilizada también en este tipo de redes.

Los proveedores de servicios que intentan dar respuesta a la creciente demanda en las redes del área metropolitana (*MAN*) se han dado cuenta de que las capacidades de *SDH/SONET* no permiten una escalabilidad suficientemente rápida. Por lo general, esta tecnología no puede sobrepasar los 2,5 Gbps, y las corporaciones empiezan a demandar servicios de *Gigabit Ethernet* y velocidades superiores.

Para satisfacer estas nuevas necesidades, muchos fabricantes se están apresurando a lanzar productos *DWDM* (*Dense Wavelength - Division Multiplexing*) para incrementar la capacidad de las redes metropolitanas.

Pero no todos siguen el camino correcto: algunos fabricantes se están limitando a reconfigurar para estos entornos los sistemas *WDM* de larga distancia de primera generación, no muy adecuados para los requerimientos peculiares del área metropolitana.

Generalmente grandes, incómodos y difíciles de instalar, estos sistemas ofrecen muy poco desde el punto de vista de la agregación de servicios por longitud y sub longitud de onda. Además, entre otras limitaciones, estos sistemas reconfigurados no fueron diseñados para inter-operar transparentemente con equipos de transporte óptico metropolitano, como los multiplexadores *add/drop* (*ADM*) *SONET/SDH* y los *routers* de última generación que predominan en las actuales *MAN*.

Durante los últimos años, *DWDM* ha sido una de las soluciones tecnológicas que más atención ha suscitado dentro del campo de las

comunicaciones ópticas. La madurez de esta tecnología y la explosión de la demanda de ancho de banda en las redes de acceso y metropolitanas han propiciado su adaptación desde entornos de largas distancias a entornos metropolitanos, presentándose como una de las alternativas más atractivas en cuanto a prestaciones-costo.

Hoy la única tecnología capaz de explotar todo el ancho de banda ofrecido por la fibra óptica es *DWDM* (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), que permite además una evolución flexible y económica de las redes actuales que dé respuesta a la demanda de mayor ancho de banda por parte de los nuevos servicios multimedia.

Pero como *DWDM* requiere componentes ópticos muy complejos y caros, desde su aparición se ha utilizado principalmente en enlaces punto a punto de larga distancia.

No obstante, la enorme demanda de ancho de banda y su madurez tecnológica ha permitido su introducción en las redes metropolitanas. La aplicación de *DWDM* a este entorno de cortas distancias se ha posibilitado por la búsqueda de un balance entre precio y rendimiento de los componentes ópticos, bastante más sencillos y baratos que los utilizados para entornos de largas distancias donde el principal reto actual reside en conseguir un mayor número de longitudes de onda sobre mayores distancias, forzando a los fabricantes a suministrar componentes aún más caros y de mayor rendimiento.

Los sistemas *DWDM*, comercialmente disponibles para largas distancias soportan en la actualidad hasta 800 Gbps (80 longitudes de onda a 10 Gbps), superando el cuello de botella alcanzando en *SDH/SONET* en 10 Gbps correspondientes a un STM-64/OC-192. El valor agregado de la tecnología

(*DWDM*) en el mercado metropolitano se extiende más allá de la capacidad de explotar el mayor ancho de banda en las fibras ópticas.

El valor agregado de la tecnología se basa en su destacada transparencia de transmisión, pues en cada una de las longitudes de onda se pueden ubicar diferentes tasas de bit y protocolos de las capas superiores, e incluso señales previamente multiplexadas por división en el tiempo o *TDM (Time Division Multiplexing)*.

Los sistemas instalados actualmente transportan, entre otras opciones, *PDH (140/565 Mbps)*, *SDH/SONET (155/622/2,500/10,000 Mbps)*, *Fast Ethernet*, *Gigabit Ethernet (1,250 Mbps)*, *Fibre Channel (100 Mbps)*, etc.

Por otro lado, aunque los sistemas *DWDM* son relativamente caros debido a la necesidad de componentes ópticos muy avanzados, la reducción en equipamiento y fibras supone una reducción de costes relativamente grande en sus inversiones y en su mantenimiento.

### **1.2.2. Requerimientos en el área metropolitana**

Las exigencias en el mercado metropolitano pueden ser diferentes en algunos puntos respecto al mercado en *Long-haul*, debido a que las redes metropolitanas son aún un segmento geográficamente distinguido de la red global. Las exigencias claves en las redes *MAN* incluyen las siguientes:

- Soporte de multiprotocolo
- Escalabilidad
- Fiabilidad y disponibilidad

- La apertura (interfaces, la gestión de la red, los tipos estándar de fibra, compatibilidad electromagnética)
- Facilidad de instalación y gestión
- Tamaño y consumo de energía
- Coste-efectividad

### 1.2.3. Demanda ancho de banda

Hoy en día ya es imposible imaginar el mundo contemporáneo sin telecomunicaciones.

El desarrollo altamente dinámico de esta tecnología esta transformando rápidamente la vida cotidiana. Las personas utilizan teléfonos, televisores y la internet en la vida privada y comercial.

Los sistemas de transmisión de datos forman parte de casi todo nuevo dispositivo inteligente. Las informaciones correctas en el lugar y en la hora correcta, constituyen la llave para el éxito. Pero en muchos de esos casos es importante mantener las informaciones confidenciales, por ejemplo, *eBanking*, *eGovernance*, *eProcurement* y otros.

Por eso la seguridad está comenzando a tener una función cada vez más esencial en esa área. Por lo tanto, los negocios *on-line* necesitan de identificación, sigilo, seguridad y confiabilidad.

El disparo en la demanda del ancho de banda de la red de los proveedores de servicio, es en gran parte debido al crecimiento del tráfico de datos, específicamente del protocolo de internet (*IP*) en estos se incluyen las aplicaciones comerciales antes mencionadas.

Los principales abastecedores de servicio divulgan que en su *back-bond*, el ancho de banda se está duplicando en el transcurso de seis y nueve meses.

Para hacerle frente a la dramática necesidad del aumento de capacidad en anchos de banda, el abastecedor de servicios se ve obligado a realizar gastos, teniendo como únicas dos opciones: instalar nuevas redes de fibra o aumentar eficazmente el ancho de banda de la fibra existente.

El trazado de la nueva fibra que hasta ahora es el medio tradicional utilizado por portadores para ampliar la capacidad de sus redes, es una proposición costosa. La mayor parte del desembolso es el coste de permisos y construcción más bien que la fibra misma. El trazado de la nueva fibra puede tener sentido sólo cuando es deseable ampliar la base integrada.

Para aumentar eficazmente el ancho de banda de la red de fibra existente, gracias al avance de la tecnología de comunicación, la tecnología *DWDM Dense Wavelength División Multiplexing*, cuyo significado traducido al castellano sería Multiplexión Densa por División de Onda. Se trata de una tecnología que permite introducir datos de diferentes fuentes en una fibra óptica, en la que la señal de cada fuente viaja en una frecuencia de onda distinta y separada de las demás.

Lo más importante de todo ello se basa en que, con el sistema *DWDM* se pueden usar hasta 80 (teóricamente más) canales virtuales que pueden ser multiplexados en rayos de luz que se transmiten por la misma fibra óptica. Por lo tanto el rendimiento de una sola fibra que contiene un cable ya instalado se puede multiplicar con muy bajo costo económico.

Este sistema permite que cada canal transporte 2,5 Gbps (2,500 millones de *bits* por segundo), y se pueden hacer circular por la misma fibra 80 canales diferentes y por tanto la transmisión será de 200 Gb por segundo.

En el extremo opuesto del cable, los canales son demultiplexados hasta adquirir sus características originales, por lo tanto se pueden transmitir simultáneamente diferentes tipos de datos y además con diferentes velocidades, según sea la necesidad de su empleo, es decir a datos (*IP*), datos (*SONET*), datos (*ATM*).

### **1.3. Ley de Edholm (crecimiento de ancho de banda)**

La omnipresencia de las tecnologías de la información y comunicaciones está llevando a un volumen creciente de datos y por eso, a mayores requisitos de desempeño, recursos y confiabilidad de los sistemas de comunicación.

Ese efecto fue descrito por la ley de *Edholm*. Las tasas de datos aumentan en curvas exponenciales semejantes en un factor de 10 a cada 5 años. Las tasas más lentas siguen a las más rápidas en un intervalo de tiempo predecible.

La recomendación de la ley del ancho de banda de *Edholm* dice; las tasas de datos de telecomunicación son tan previsibles tanto como la ley de *Moore*.

Las tres reglas de la tecnología que dan origen a la ley de predicción de *Edholm* son tres:

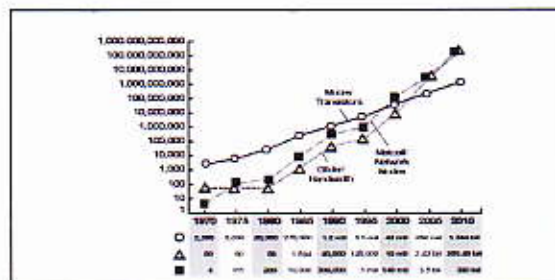
- Ley de *Moore*

El número de transistores en un chip se duplica cada 18-24 meses

- Ley de *Gilder*  
El ancho de banda agregado de los sistemas de comunicación se triplica cada año.
- Ley de *Metcalf*  
El valor de una red, es proporcional al cuadrado del número de nodos. Cuando una red crece, el valor crece exponencialmente mientras que el coste por usuario se mantiene o incluso se reduce.

La relación de estas tres leyes como se mencionó anteriormente da pie a la Ley de *Edholm*. El ancho de banda disponible se duplica cada 18 meses.

Figura 5. Reglas de la tecnología

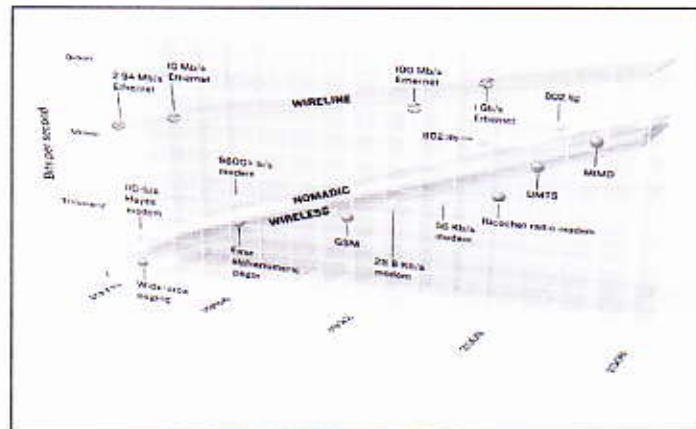


Fuente: Cambridge Energy Resource Associates.p.3.

Algunas tecnologías de telecomunicación al igual que las telefonías celulares, pueden ser usadas en circulación libre. Otros como *wi-fi*, se pueden utilizar mientras se desplazan de un lugar a otro pero no son completamente móviles, y una tercera categoría puede usarse únicamente con el equipo vinculado a una ubicación específica, como lo es el internet en la computadora de su oficina.

Por falta de mejores términos le llaman a estas tres categorías inalámbrica, nómadas y vía cable.

Figura 6. Ley de *Edholm*



Fuente: IEEE Spectrum | July 2004 | NA p.1.

Tal como muestra la figura 6, si se traza logarítmicamente, las tres leyes predictivas del crecimiento del ancho de banda según la ley de *Edholm*, a lo largo del tiempo encajan tres líneas, las tres mantienen más o menos la misma relación. Sin embargo extrapolando adelante en el tiempo indica una convergencia entre las tecnologías nómadas e inalámbricas en torno al 2030.

Tal vez eso no es demasiado sorprendente, ya que ambos se basan en la misma tecnología central, (microondas). Si se proyecta hacia adelante, la Ley de *Edholm* dice que en unos cinco años 3G (tercera generación), la tecnología inalámbrica ofrecerá rutinariamente 1Mb/s, *Wi-Fi* absorberá el acceso nómada a 10 Mb/s, computadores de escritorios y material de oficina se conectará un nivel de 1 giga bit por segundo.



#### 1.4. Fuerzas económicas (beneficios del *DWDM*)

La tecnología *WDM* ha plantado sus raíces en varias empresas de telecomunicación, tanto en las conexiones punto a punto como la comunicación en zonas metropolitanas. Esto es debido en gran parte a que *WDM* ha demostrado ser más rentable que colocar nuevas fibras cuando la demanda de ancho de banda en las fibras excede el nivel requerido.

Estudios recientes han examinado los beneficios económicos de *WDM*. En estos estudios los autores analizaron los costos de mejora de la capacidad de transmisión de OC-48 a OC-192, en enlaces punto a punto con tres posibles soluciones. A su juicio las tres opciones fueron las multi-fibras cuatro canales *WDM* y una mayor velocidad electrónica OC-192. Ellos demostraron que la opción de 4 canales *WDM* era la solución de menor coste para estancias de más de 50 kilómetros.

A pesar que estos productos ofrecen en la actualidad 80 canales de solución, el número de canales se espera aumente en un futuro próximo.

Otro estudio investigó las economías de *DWDM* y las redes síncronas de fibra óptica bajo los escenarios de bajo costo y demanda. Llegando a la conclusión que *DWDM* demuestra ser rentable en los siguientes casos:

- En las áreas metropolitanas saturadas de conductores llenos de cable.
- En las relativamente grandes redes metropolitanas, ahorrando en renegadores (se encontró que para las zonas de alta demanda se tiene hasta el 25% de ahorro).
- Utilizando arquitectura *DWDM* es de menor costo ya que se evitan las protecciones eléctricas.

- Eliminación de multiplexores *SDH*, por la comunicación de interfaz directa con los elementos de la red *DWDM*.
- En las redes de acceso, *WDM* se puede utilizar para añadir flexibilidad en tres áreas clave, como se muestra en la tabla I.

#### 1.4.1. El mercado *WDM*

Para ver la evolución del mercado de transmisión y como la tecnología *WDM* representa un peso considerable en él mismo, se muestran en las tablas II y III, los valores del mercado para *SDH/SONET* y *WDM* en años anteriores.

Tabla I. **Áreas clave de flexibilidad**

<b>ÁREAS CLAVES</b>	
<b>Servicios:</b>	• Múltiples tipos
	• Dedicado y los servicios compartidos
	• Los servicios existentes y futuros
<b>Topologías:</b>	• Anillos, de punto a punto, estrellas, árboles, lineal insertar / extraer
	• Fácil manejo de derechos de vía
	• La integración sin fisuras en las instalaciones existentes
<b>Capacidad:</b>	• Crecimiento inesperado
	• Ancho de banda en puntos de crecimiento
	• Concentración

Fuente: elaboración propia.

En ésta se aprecia que mientras *SDH/SONET* presenta cierto estancamiento e incluso cae al final del período considerado, *WDM* empieza a adquirir gran peso, llegando incluso al final del 2003 a niveles de la otra tecnología.

Según el estudio publicado en enero de 1999 por la consultora Ovum titulado *OVUM Forecast: Telecoms, the Internet and Digital TV*, el valor de los suministros (*SDH/SONET*) al mercado en el período 1999-2003 (en millones de dólares).

De estos, la distribución entre larga distancia, corta distancia, *Optical Cross-Connects* (OXC) y utilización en redes de empresa, es la mostrada en la tabla III.

Tabla II. **Mercado (1999-2003)**

	1999	2000	2001	2002	2003
<b>Latino América</b>	405	429	421	404	386
<b>EEUU &amp; Canadá</b>	4,847	4,915	4,800	4,599	4,032
<b>Europa del Este</b>	1,773	1,807	1,740	1,684	1,612
<b>Resto Europa</b>	185	215	213	212	212
<b>Asia &amp; Pacífico</b>	1,939	1,947	1,893	1,846	1,687
<b>Total</b>	9,149	9,313	9,067	8,745	7,929

Fuente: *OVUM Forecast Telecoms, the Internet and Digital TV*.

Tabla III. Utilización de redes

	1999	2000	2001	2002	2003
<b>Larga distancia</b>	1,546	2,155	2,839	3,518	4,033
<b>Corta distancia</b>	126	304	614	1,235	1,872
<b>OXC</b>	4	6	26	60	139
<b>Empresas</b>	30	51	76	111	139
<b>Total</b>	1,706	2,516	3,555	4,924	6,183

Fuente: OVUM Forecast Telecoms, the Internet and Digital TV.

### 1.5. Redes de nueva generación NGN

La evolución del sector hacia las redes convergentes o Redes de Nueva Generación – NGN – está ligada a la evolución del estado hacia la sociedad de la información, en la medida en que éstas redes constituyen la principal infraestructura para el transporte de la información y para la conectividad de las personas.

Esta evolución implica para los operadores la innovación continua de su oferta de servicios y redes, con el fin de satisfacer las necesidades de la sociedad. La convergencia de servicios, aplicaciones y dispositivos impulsa esta tendencia, para beneficio del cliente, pues obtiene cada vez más y mejores servicios a un costo competitivo. Las redes de nueva generación NGN (*New Generation Networks*) son una realidad que permite avanzar hacia la consecución de estos objetivos.

### **1.5.1. Definición y características de las redes de nueva generación**

La función principal del *backbone* de transporte es la de servir de interfaz entre las capas de acceso y la de servicios/aplicaciones. Entre sus cualidades básicas debe ser capaz de transportar paquetes *IP* en forma transparente, con *QoS*, en forma segura y ser económica y muy eficiente. Sin embargo la principal característica que debe destacar al *backbone* de nueva generación es la de no ser dependiente de la capa de servicios, esto quiere decir que la tecnología de transporte debe ser tal que no limite el desarrollo y la implementación de nuevos servicios, aportando total flexibilidad al desarrollo de servicios y tecnologías de acceso o borde.

Para destacar las características que debe poseer el *backbone* de una generación, se cita lo que se dice de ella en la recomendación *UIT-T Y 2,001 (SG13)* en general sobre la red de próxima generación (NGN).

Red basada en paquetes que permite prestar servicio de telecomunicaciones y en la que se puede utilizar múltiples tecnologías de transporte de banda ancha propiciadas por la *QoS*, en la que las funciones relacionadas con los servicios son independientes de las tecnologías subyacentes relacionadas con el transporte. Permite a los usuarios el acceso sin trabas a redes y a proveedores de servicios y/o servicios de su elección. Se soporta movilidad generalizada que permitirá la presentación coherente y ubica de servicios a los usuarios.

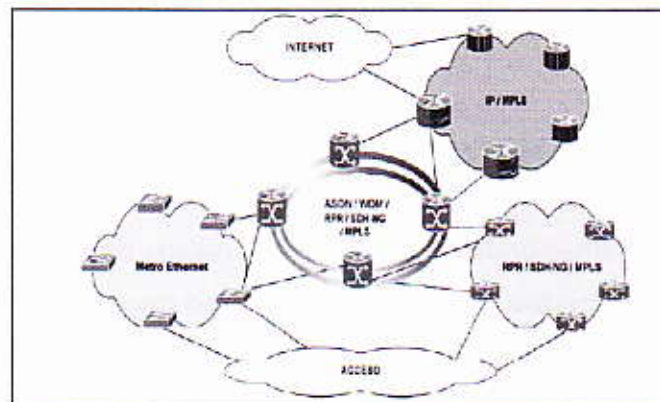
Estas características, las cuales son cumplidas en su totalidad por la tecnología densa por longitud de onda, colocan *DWDM* como una de las

principales aspirantes a introducirse en la capa de transmisión dentro del *backbone* de las redes de nueva generación.

En cuanto a la tecnología aplicada a las NGN, ésta se basa en una nueva arquitectura, donde los servicios ya no están integrados verticalmente. Esta plataforma es conocida como IMS (*International Protocol Multimedia System*), la cual permite la convergencia de servicios de texto, datos, video y multimedia.

Entre los beneficios para el usuario, se pueden destacar: una red básica de acceso independiente y una red para voz y datos que permite servicios multimedia integrados.

Figura 7. Red de nueva generación



Fuente: Instituto Tecnológico de Buenos Aires. Redes públicas de nueva generación, p.2.

Lo anterior evidencia que la convergencia de red y servicios, es un aspecto central de las NGN, que permite establecer redes de acceso al usuario final a gran escala, que exige la creación de una nueva gama de actividades en las cuales las empresas antes no tenían injerencia, y que crea una nueva cultura empresarial.

### 1.5.2. Arquitectura NGN

En una red clásica con tráfico de aplicaciones de datos y de valor agregado como la voz o el video, existe una frontera definida que separa dos dominios diferentes:

- Dominio de sistemas *TDM*
- Dominio de sistemas *IP*

Los sistemas *TDM* constituyen el grupo de centrales de conmutación que agregan tráfico desde los abonados hacia el resto de las etapas.

Los sistemas *IP* constituyen el grupo de centrales de conmutación que también agregan tráfico desde los abonados cuyo elemento básico es el paquete de datos hacia el resto de las etapas en lo que es conocido como capa de transporte.

Cuando ambos sistemas funcionan en forma simultánea y autónoma se tienen los sistemas independientes para los servicios digitales básicos de voz (o de voz y video digitalizados en las redes *IP*) y otro para los servicios digitales de datos. Cuando ambos sistemas interactúan mutuamente mediante dispositivos denominados *routers* con interfaces *PSTN* se tendrán los servicios de datos sobre redes conmutadas públicas.

En estas redes clásicas se tienen algunos servicios, pero cada sistema que lo compone maneja una arquitectura propia e independiente, que impide el tratamiento y administración global de la información de extremo a extremo.

Así mismo los sistemas de facturación, asignación y gestión de los servicios y los del manejo de la calidad de servicio, por lo general son esencialmente independientes y autónomos dentro de cada dominio.

Por el contrario en las NGN existe un único elemento básico que es el paquete de información y todo el sistema está diseñado para su administración, acceso, transporte y conmutación de extremo a extremo y basado en una única tecnología.

EL sistema NGN está concebido para tratar paquetes de voz, de datos o de video en forma totalmente transparente en una arquitectura única de extremo a extremo. Adicionalmente, la facturación, la asignación y gestión de servicios, el manejo de la calidad de servicio y la planificación de la red se realiza sobre un sistema completo único para el dominio.

#### **1.6. Comparación TDM vs. DWDM**

Para cubrir las necesidades de las redes *MAN*, las tecnologías competitivas son: *SDH/SONET*, *DWDM* metropolitano y Ethernet óptico. Estas tres tecnologías establecerán una intensa batalla para dominar este mercado y cada una tiene una serie de ventajas distintivas para los operadores y sus clientes.

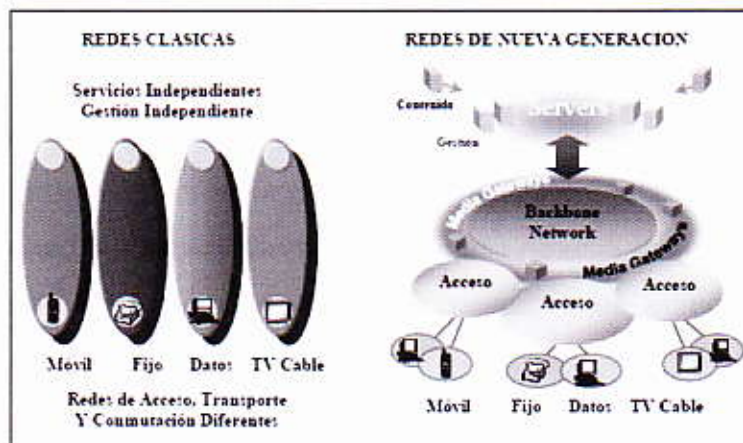
Otras tecnologías como *FDDI (Fiber Distributed Data Interface)* o *ATM (Asynchronous Transfer Mode)*, presentan grandes inconvenientes que producirán su declive paulatino en este mercado. La tecnología más utilizada en redes *MAN* en la actualidad, es *SONET (Synchronous Optical Network)* del ANSI en Norte América y *SDH (Synchronous Digital Hierarchy)* o *JDS (Jerarquía*



*Digital Síncrona*) del ITU-T en Europa. Se trata de dos estándares de transmisión digital en principio a larga distancia, que resuelven los problemas de compatibilidad entre equipos de distintos proveedores, la gestión y mantenimiento de los equipos, así como de la inserción y la extracción de las señales de jerarquías inferiores o de menor capacidad presentados por su predecesor, PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) o JDP (*Jerarquía Digital Plesiócrona*).

Tanto PDH, como *SONET* y *SDH*, son tecnologías de transmisión basadas en la multiplexación en el tiempo o *TDM (Time Division Multiplexing)*, que utilizan la fibra óptica como mero sistema de transmisión; pero que realizan las funciones de amplificación, encaminamiento, extracción e inserción de señales, etc. en el dominio eléctrico, a diferencia de la *DWDM*.

Figura 8. **Redes clásicas/ Redes nueva generación**



Fuente: Estudio integral de redes de nueva generación y convergencia. p.9.

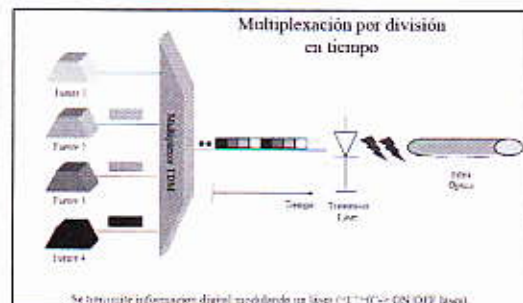
La tecnología de transporte *SDH* permite diferentes tasas de bit o STM (*Synchronous Transport Module*), desde STM-1 (155 Mbps) hasta STM-64 (10

Gbps), aunque en breve aparecerán sistemas a SMT-256 (40 Gbps); siendo un E1 (2 Mbps) o T1 (1,5) la tasa mínima susceptible de manejar.

La protección se ofrece a través de topologías en anillo, posibilitadas gracias a *ADMs (Add and Drop Multiplexers)* o multiplexores de extracción e inserción de señales, capaces de reconfigurarse del fallo de un enlace en menos de 50 metros. Otras características importantes de *SDH* son la compatibilidad con la tecnología de transporte precedente, es decir *PDH*, la posibilidad de transportar nuevos formatos de señales como *ATM (Asynchronous Transfer Mode)* o *IP (Internet Protocol)* utilizando *POS (Packet Over SONET)*, estandarización mundial, monitorización de errores o calidad de servicio y su potente funcionalidad de administración.

*Ethernet* óptico está tomando una importancia creciente en el entorno *MAN*. Se trata de incorporar las ventajas de la óptica respecto al par trenzado de cobre a las características de simplicidad de *Ethernet IEEE 802.2*.

Figura 9. **Multiplexión por división de tiempo**



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Introduction to dwdm technology, p.67

Aprovechando además el alto conocimiento técnico que se tiene de esta tecnología y su gran base instalada, constituyendo más del 95% de en redes de

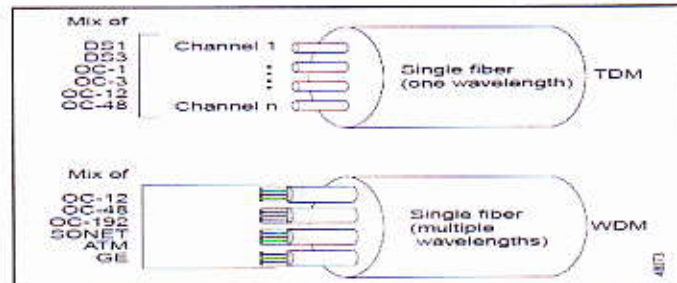
área local o LAN (*Local Area Networks*) en sus modalidades de 10 y 100 Mbps. Aunque la velocidad de Ethernet óptico en su estado actual en el mercado es de 1 Gbps, aparecerán las velocidades de 10 y de 40 Gbps a corto plazo.

El *Ethernet* óptico es escalable, ofrece grandes anchos de banda y es mucho más económico que *SDH/SONET* aunque también menos fiable y robusto. Los sistemas de *Ethernet* óptico son también capaces de utilizar eficientemente el ancho de banda; sin embargo, la calidad de servicio o la posibilidad de priorizar aplicaciones en función de su carácter crítico y tratar adecuadamente el tráfico multimedia que ofrecen, es muy limitada. Por otro lado, tampoco se adaptan demasiado bien a las arquitecturas típicas metropolitanas, los anillos y las distancias alcanzadas son menores que mediante el resto de tecnologías competitivas.

Las capacidades típicas al día de hoy de los sistemas *DWDM* son de 8, 16, 32 y 40 longitudes o canales hasta de 10 Gb/s. Con la ampliación de bandas se están desarrollando sistemas de 128, 160 e incluso hasta 240 longitudes de onda. Los protocolos que se puede transportar mediante *DWDM* pueden ser cualquier señal digital continua y óptica de entre 100 Mb/s y 10 Gb/s. Incluye vídeo, ESCOM, FICOM, ATM, GbE, PDH, SDH.

Hoy en día *DWDM* es la tecnología principal de la red de transporte. A pesar de que existen defensores y detractores de todas las tecnologías de niveles superiores (PDH, SDH, ATM, IP,...) en todos los foros se coincide en la necesidad de una Capa de Transporte Óptica que soporte al resto. El primer paso hacia esa capa de transporte es el *DWDM*, que con el tiempo ha de adquirir la flexibilidad, seguridad, control de calidad, etc., ya disponibles en *TDM*.

Figura 10. Protocolos y capacidades



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Introduction to dwdm technology, p.12.

### 1.6.1. Las principales ventajas de DWDM sobre TDM

- Con esta técnica se aprovecha mejor el ancho de banda de la fibra óptica.
- Las tasas de transmisión binaria de cada canal son más bajas que la de la señal multiplexada *TDM*, por lo que la distancia de transmisión límite impuesta por la dispersión cromática es mucho mayor que en un sistema *TDM*. De la misma manera la limitación que impone la *TDM* no es tan grave. Además, la distancia entre repetidores y amplificadores es mucho mayor al poder al emplearse *EDFA* por operar en la tercera ventana
- El sistema es más escalable. Es decir, la capacidad de transmisión se puede incrementar de forma modular añadiendo nuevas longitudes de onda
- El diseño de los sistemas *WDM* es transparente al formato y velocidad de transmisión de los datos. Lo cual es la principal ventaja de esta técnica

- En redes complejas es más sencillo emplear *WDM* frente a *TDM* porque la extracción y la inserción de canales es más sencilla gracias a los elementos ópticos como los *OADM*.

### 1.6.2. Los inconvenientes de *DWDM*

- Los sistemas *WDM* no son apropiados en fibras *DSF* debido a las consecuencias del efecto no lineal de *FWM* (*four-wave mixing*).
- Los amplificadores ópticos empleados en *WDM* requieren un perfil de la ganancia plano, además de proporcionar una ganancia independiente del número de longitudes de onda.
- *WDM* requiere disponer de un receptor y un láser para cada longitud de onda, lo cual incrementa su coste. Aunque en *TDM* basta con un único láser y receptor, la electrónica asociada a la multiplexación y demultiplexación es más cara.
- La transparencia de los sistemas *DWDM* es también un inconveniente a la hora de monitorear las señales pues no se desconoce el formato y la tasa binaria de cada canal. Lo que dificulta el monitoreo de la tasa de error de bit (*BER*, *bit error rate*).
- Los efectos no lineales y las diafonias aumentan, pues se están enviando muchas señales muy próximas en diferentes longitudes de onda y con elevada potencia. Así como la dispersión, ya que se transmiten señales a una elevada tasa de transmisión.

## 2. FUNDAMENTOS DE LA LUZ RELACIONADOS A LA FIBRA

### 2.1. Fundamentos de la luz

La luz posee dos componentes naturales, una onda natural y una partícula natural.

#### 2.1.1. La onda de luz

Al igual que las ondas de radio o rayos X, la luz es la radiación electromagnética que está sujeta a la reflexión, interferencia, polarización, desvanecimiento y pérdida. La luz de frecuencia única que se denomina monocromática, o de un solo color, descrita por la ecuación de onda plana en el vacío de *Maxwell*.

$$\nabla^2 \vec{E} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu g \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \nabla^2 \vec{B} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \mu g \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$
$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{y} \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0.$$

Donde  $\nabla$  es el operador Laplaciano,  $C$  es la velocidad de la onda en el vacío,  $E$  y  $H$  son los campos eléctrico y magnético, respectivamente,  $D$  es el vector de desplazamiento eléctrico,  $B$  es el vector de inducción magnética, y  $\rho$  es la densidad de carga. Los cuatro campos vectoriales están relacionados por la siguiente ecuación.

$$D = \epsilon_0 E + P \quad \text{y} \quad B = \mu_0 H + M$$

Donde  $\epsilon_0$  es la permitividad dieléctrica,  $\mu_0$  es la permeabilidad,  $P$  es la polarización eléctrica y  $M$  es la polarización magnética. Notemos que la ecuación de *Maxwell* se refiere a luz monocromática.

La luz como una onda se caracteriza por la frecuencia (y longitud de onda), fase y velocidad de propagación. Frecuencia es el número de ciclos en un segundo y *longitud de onda* es la distancia de una ciclo completo (distancia entre pico a pico) en un medio o en el vacío.

La frecuencia es descrita en ciclos por segundo o Hertzio, y la longitud de onda en nanómetros (nm) o en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ). Otra unidad ocasionalmente utilizada es el angstrom; un angstrom ( $\text{\AA}$ ) es  $10^{-10}$  metros. El espectro visible se encuentra entre 0,7 micrómetros y 0,4 micrómetros.

### 2.1.2. Partícula natural de la luz

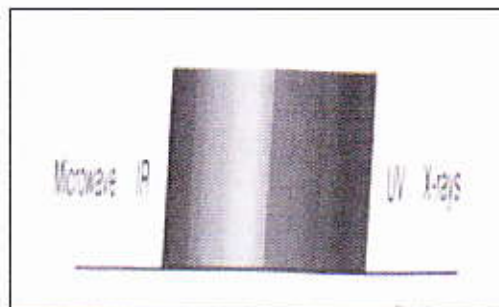
Como todas las partículas en movimiento, la luz también puede ejercer presión y causar movimiento circular (Experimento de *Compton*). Por lo tanto, la luz también puede ser descrita en número de partículas. La cantidad más pequeña de luz monocromática, la conocemos como *fotón*, y es descrita por la ecuación de energía ( $E$ ).

$$E = h\nu$$

Donde  $h$  es la constante de Planck  $0,6260755 \times 10^{-34}$  Joules por segundo, y  $\nu$  es la frecuencia de la luz.

La luz (de un tubo incandescente) consta de una continua serie longitudes de onda que atraviesa el espectro óptico completo de color rojo oscuro (700 nm) hasta azul violeta oscuro (400 nm), como se muestra en la figura 11.

Figura 11. **Espectro de luz**



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Introduction to dwdm technology p.8.

La luz no viaja con la misma velocidad en todo el medio. En el vacío, viaja en una trayectoria recta a una velocidad constante máxima definida por la ecuación de *Einstein*.

$$E=mc^2$$

Donde  $c=2,99792458 \times 10^8$  km/s o 30 cm/ns

La relación entre la frecuencia, velocidad de la luz y longitud de onda esta dado por;  $v= c/\lambda$ .

Al relacionar por último estas dos ecuaciones  $E=mc^2 =h\nu$ , obtenemos algunas interesantes relaciones, tales como la frecuencia en términos de fotón

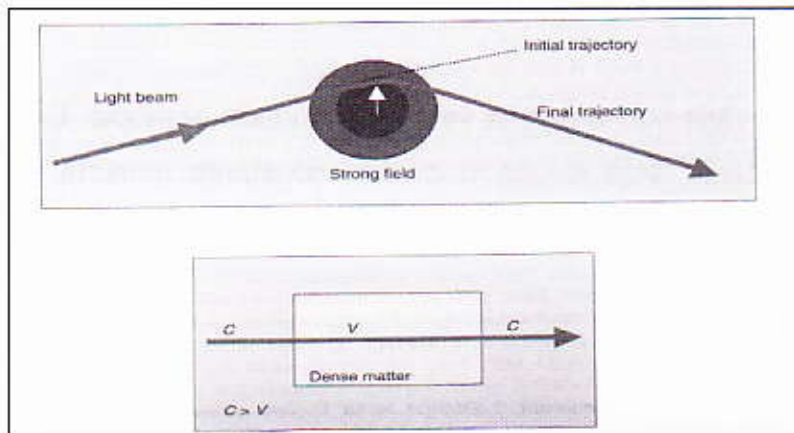


equivalente en masa y velocidad ( $v=mc^2/h$ ), y el equivalente en masa de un fotón ( $m=hv/c^2$ ).

Cuando la luz pasa por un campo gravitacional muy fuerte, el campo y la luz interactúan y el rayo de luz cambia de dirección. Entre más fuerte sea el campo mayor será el cambio como se aprecia en la figura 12.

Cuando la luz viaja dentro de un medio ópticamente denso (diferente al vacío) por ejemplo agua, vidrio, plástico transparente), entonces la velocidad en éstos disminuye.

Figura 12. Trayectoria de un haz de luz



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Introduction to dwdm technology p. 8.

## 2.2. Principio de propagación óptica

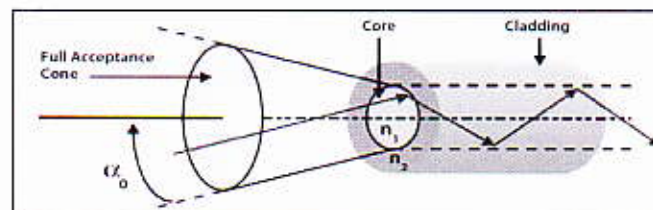
El principio de un sistema de comunicación óptica es la transmisión de una señal a través de una fibra óptica a una distancia de recepción.

La señal eléctrica es convertida al dominio óptico dentro del transmisor y es convertido de regreso a la señal eléctrica original en el receptor. La comunicación óptica tiene varias ventajas sobre otros métodos de transmisión, como son el cobre y los sistemas de radiocomunicación. Un rayo de luz entra a la fibra a un ángulo pequeño  $\alpha$ . La capacidad (máximo valor aceptable) del cable de fibra para recibir luz a través del núcleo es determinada por la apertura numérica (NA).

$$NA = \sin \alpha_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Donde  $\alpha_0$  es el máximo ángulo de aceptación (límite entre la reflexión y la refracción),  $n_1$  es el índice de refracción y  $n_2$  es el índice de refracción del revestimiento.

Figura 13. Ángulo de aceptación máximo



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.35.

### 2.2.1. Propagación de la luz

La propagación de un rayo de luz en la fibra óptica responde a la ley de *Snell Descartes*. Una porción de luz es guiada a través de la fibra óptica cuando se inyecta dentro del cono de aceptación de la fibra.

### 2.2.2. Ley de *Snell*

La ley de *Snell* es una fórmula simple utilizada para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de índice de refracción distinto.

La ley de Snell dice que el producto del índice de refracción por el seno del ángulo de incidencia es constante para cualquier rayo de luz incidiendo sobre la superficie que separa dos medios. Aunque la ley de *Snell* fue formulada para explicar los fenómenos de refracción de la luz se puede aplicar a todo tipo de ondas atravesando una superficie de separación entre dos medios en los que la velocidad de propagación la onda varíe.

### 2.2.3. Descripción óptica

Consideremos dos medios caracterizados por índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$  separados por una superficie S. Los rayos de luz que atraviesen los dos medios se refractarán en la superficie variando su dirección de propagación dependiendo del ratio entre los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ .

Para un rayo luminoso con un ángulo de incidencia  $\theta_1$  sobre el primer medio, ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de propagación del rayo, tendremos que el rayo se propaga en el segundo medio con un ángulo de refracción  $\theta_2$  cuyo valor se obtiene por medio de la ley de *Snell*.

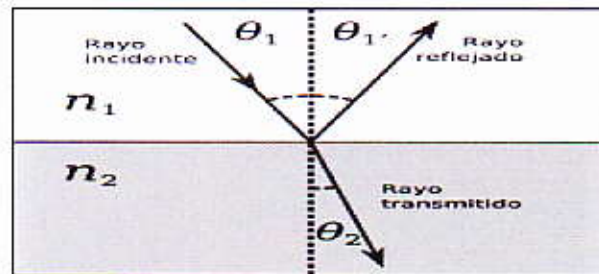
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Obsérvese que para el caso de  $\theta_1=0$  (rayos incidentes de forma perpendicular a la superficie) los rayos refractados emergen con un ángulo  $\theta_2=0$

para cualquier  $n_1$  y  $n_2$ . La simetría de la ley de *Snell* implica que las trayectorias de los rayos de luz son reversibles. Es decir, si un rayo incidente sobre la superficie de separación con un ángulo de incidencia  $\theta_1$  se refracta sobre el medio con un ángulo de refracción  $\theta_2$ , entonces un rayo incidente en la dirección opuesta desde el medio 2 con un ángulo de incidencia  $\theta_2$  se refracta sobre el medio 1 con un ángulo  $\theta_1$ .

Una regla cualitativa para determinar la dirección de la refracción es que el rayo en el medio de mayor índice de refracción se acerca siempre a la dirección de la normal a la superficie. La velocidad de la luz en el medio de mayor índice de refracción es siempre menor.

Figura 14. Reflexión de ángulo interno



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.12.

Un rayo de luz propagándose en un medio con índice de refracción  $n_1$  incidiendo sobre con un ángulo  $\theta_1$  con una superficie sobre un medio de índice  $n_2$  con  $n_1 > n_2$  puede reflejarse totalmente en el interior del medio de mayor índice de refracción. Este fenómeno se conoce como reflexión interna total o ángulo límite y se produce para ángulos de incidencia  $\theta_1$  mayores que un valor crítico.

El valor esta dado por:

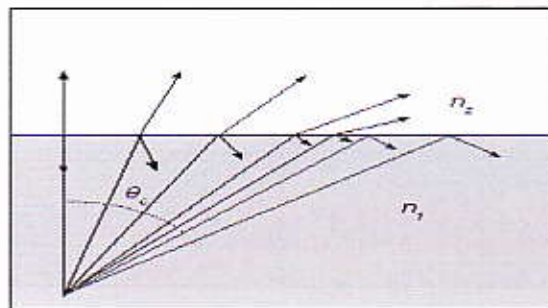
$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

La ley de *Snell*:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Si  $n_1 > n_2$ , entonces  $\theta_2 > \theta_1$ . Eso significa que cuando  $\theta_1$  aumenta,  $\theta_2$  llega a  $\frac{\pi}{2}$  radianes ( $90^\circ$ ) antes que  $\theta_1$ . Es decir que el rayo refractado (o transmitido) sale paralelo a la frontera. Si  $\theta_1$  aumenta aún más, como  $\theta_2$  no puede ser mayor que  $\frac{\pi}{2}$ , no hay transmisión al otro medio y la luz se refleja totalmente. La reflexión es realmente total (100%) y sin pérdidas. Es decir, mejor que los espejos metálicos (plata, aluminio) que solo reflejan 96% de la potencia luminosa incidente.

Figura 15. **Ángulo de reflexión total**



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p. 9.

#### 2.2.4. Propagación

Un rayo de luz entra a la fibra en diferentes ángulos y nos siguen los mismos caminos. El rayo de luz entra en el centro de el núcleo de la fibra con un ángulo sumamente bajo tomara relativamente un camino a través del centro de la fibra.

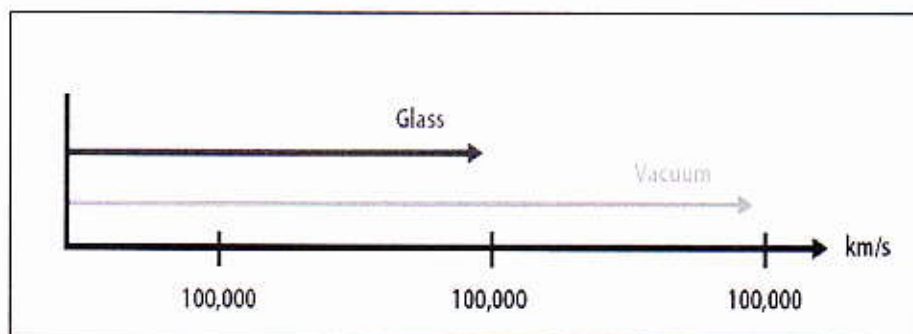
Los rayos de luz entren en el núcleo de fibra a un mayor ángulo de incidencia o cerca del borde exterior del núcleo de la fibra la trayectoria será menos directa, tomará una trayectoria más larga atravesando la fibra más lentamente. Cada ruta, es resultado de un determinado ángulo de incidencia y un punto de entrada. Dependiendo de los diferentes modos de viaje a través de la fibra, cada uno será atenuando en cierta forma.

### 2.2.5. Velocidad

La velocidad a la que viaja la luz a través del medio de transmisión es determinada por el índice de refracción del medio de transmisión. El índice de refracción ( $n$ ) es la unidad numérica, que representa la relación de la velocidad de la luz en el vacío con la velocidad de la luz en el medio de transmisión.

Los valores típicos de  $n$  para el vidrio (fibra óptica) son entre 1,45 y 1,55. Como regla general, cuanto más alto es el índice de refracción, más lenta la velocidad en el medio de transmisión.

Figura 16. Velocidad es típicas vidrio/vacío



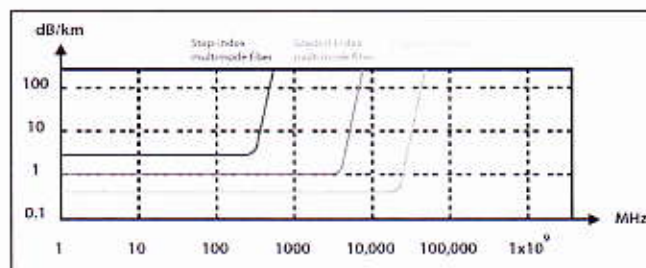
Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.15.

### 2.2.6. Ancho de banda

El ancho de banda es definido como el ancho del rango de la frecuencia que puede ser transmitido por una fibra óptica.

El ancho de banda determina la máxima transmisión de información en un canal, cuanta información puede transportar a lo largo de la fibra sobre una distancia dada. El ancho de banda es expresado en Mhz\*km. En la fibra multimodal, el ancho de banda es principalmente limitado por la dispersión modal; mientras que esta no es limitación en las fibras mono-modo.

Figura 17. Gráfico pérdidas por frecuencia en tipos de fibra



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.16.

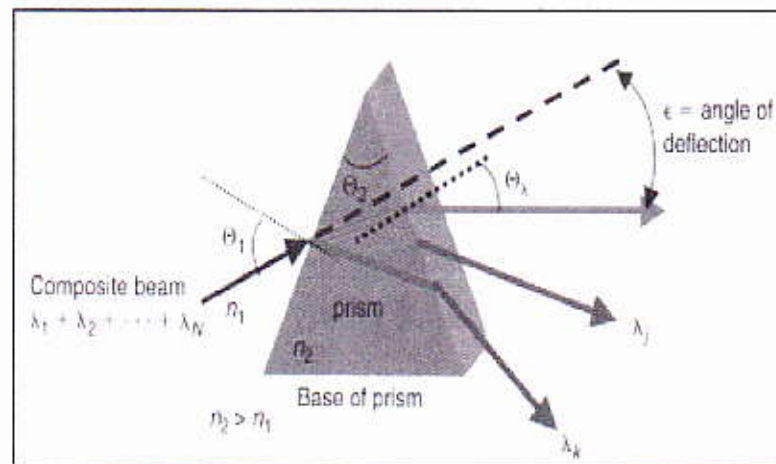
### 2.3. Prisma óptico

Considerando dos planos de una placa que se intersecan para dar forma a un *Prisma* con un ángulo  $\theta_2$ . Cuando un estrecho haz de luz poli-cromática afecta una superficie del prisma, cada componente de frecuencia es refractado diferentemente. Cuando cada frecuencia llega a la otra superficie, esta es refractada de nuevo.

La salida de luz de la segunda superficie del prisma consiste de las componentes de la frecuencia separadas por un pequeño ángulo, el ángulo de cada componente de la frecuencia respecto del haz original lo conocemos como el ángulo de deflexión  $\epsilon$ .

El ángulo de deflexión varía frecuentemente.

Figura 18. Bases del prisma



Fuente : SMATIOS V, Kartalopoulos. Introduction to dwdm technology p.131.

Asentando las leyes del prisma se puede decir:

- El ángulo  $\theta_\lambda$  incrementa como el índice de refracción aumenta
- El ángulo  $\theta_\lambda$  incrementa como el ángulo del prisma  $\theta_2$  incrementa
- El ángulo  $\theta_\lambda$  incrementa como el ángulo de incidencia  $\theta_1$  incrementa
- El ángulo  $\theta_\lambda$  incrementa como la frecuencia de la luz incrementa (o la longitud de onda decrece).



La variabilidad de cada componente de la frecuencia del prisma es conocido como dispersión angular y esta dado por:

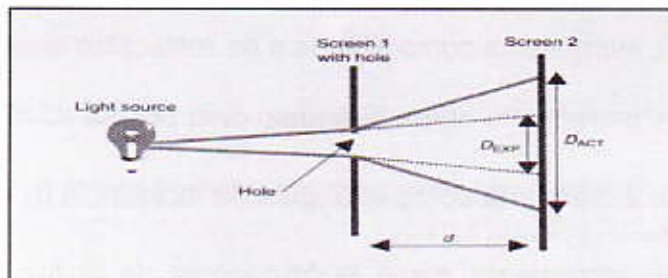
$$D\theta/d\lambda = (d\theta/dn)(dn/d\lambda),$$

Donde  $n$  es el índice de refracción y  $\lambda$  la longitud de onda. El primer término depende de la geometría del prisma, por lo que el segundo termino depende del material.

### 2.3.1. Difracción

Consideremos un haz paralelo de luz que afecta primero sobre la pantalla con un pequeño agujero con bordes afilados y entonces sobre una segunda pantalla frente a la primera a una distancia  $d$  (ver figura 19). Aunque la luz viaja en una línea recta y una pequeña circunferencia es esperada en la segunda pantalla,  $D_{exp}$ , en vez de esto se ve una proyección más amplia de lo esperado,  $D_{act}$ . Esta proyección circular esta rodeada por más círculos con disminución en la intensidad con forme nos alejamos del centro de la proyección. Este fenómeno se debe a los bordes del agujero que difracta la luz.

Figura 19. Efecto de la difracción



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Introduction to dwdm technology, p. 145.

Esto se conoce como difracción de luz o fenómeno de Fresnel. Cuanto más reducido sea el diámetro, más amplia será la proyección.

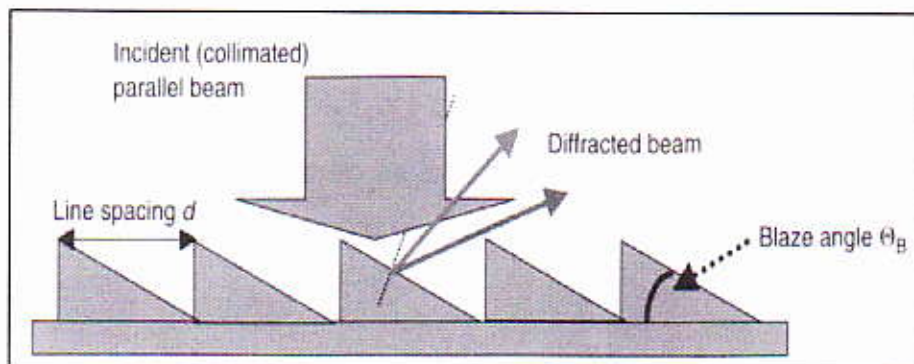
### 2.3.2. Difracción de rejilla

Una difracción de rejilla es dispositivo óptico pasivo que difracta la luz paralela, en direcciones específicas de acuerdo al ángulo de incidencia sobre la rejilla. La longitud de onda óptica de la luz incidente y el diseño de las características de la rejilla, dependen de la línea de espacio  $d$  y *blaze* ángulo  $\theta_B$  en la figura 20. El número de escalerones por unidad de longitud es un parámetro que conocemos como rejilla constante.

El ángulo *blaze*  $\theta_B$ , la longitud de onda  $\lambda$ , y la línea de espacio  $d$  están relacionadas por:

$$\theta_B = \text{Sen}^{-1}(\lambda/2d)$$

Figura 20. Difracción en una rejilla



Fuente : SMATIOS V, Kartalopoulos. Introduction to dwdm technology, p.134.

## 2.4. Interacción de la luz con la materia

En su mayor parte, en redes ópticas, es la física la que desempeña un papel crucial en la determinación de la heurística de la red y, por tanto, es de suma importancia. Algunos de los fenómenos básicos ópticos observados en el espacio libre, así como dentro de la fibra son la reflexión, refracción, birrefringencia, polarización y dispersión. Los dos primeros son simples efectos que son fáciles de entender y que los tres últimos son un poco complicados y son graves impedimentos para comunicaciones ópticas y los principales contribuyentes para atenuar la propagación de una señal o que distorsionan más allá del reconocimiento de un valor.

### 2.4.1. Refracción y reflexión

#### 2.4.1.1. Refracción

La refracción es la flexión de un rayo de luz en una interfaz entre dos distintos medios de transmisión. Si  $\alpha > \alpha_0$ , el rayo es completamente refractado y no es capturado por el núcleo.

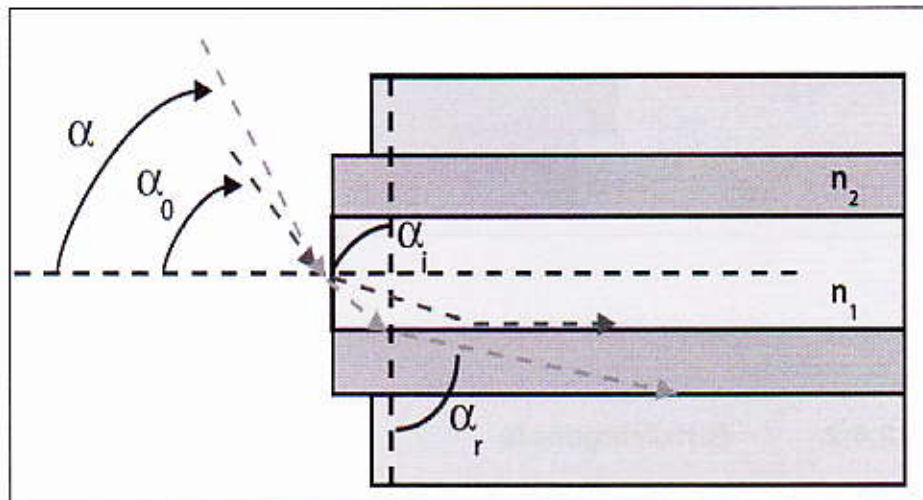
$$n_1 \sin \alpha_i = n_2 \sin \alpha_r$$

El índice de refracción de un medio en particular con respecto al vacío, esta dado por la relación de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad en el medio en particular.

$$n = c_0 / c_m$$

En esta ecuación,  $C_0$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $C_m$  es la velocidad en el medio concerniente.

Figura 21. Refracción



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.34.

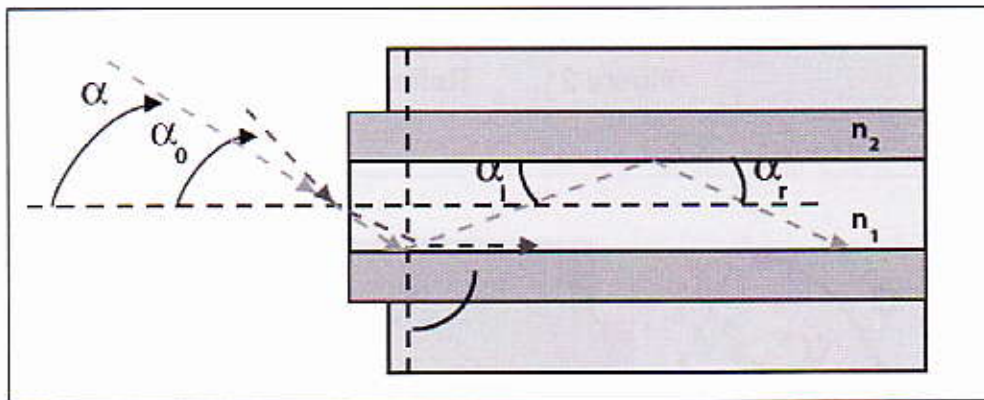
#### 2.4.1.2. Reflexión

La reflexión es un abrupto cambio de dirección de un rayo de luz a una interfaz entre dos distintos medios de transmisión.

En este caso el rayo de luz retorna al medio de donde es originado, Si  $\alpha < \alpha_0$  entonces el rayo es reflejado y sigue en el núcleo.

$$\alpha_i = \alpha_r$$

Figura 22. Reflexión



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.34.

#### 2.4.2. Birrefringencia

En algunos materiales transparentes, un índice de refracción varía en función de la dirección de la rayo incidente y la polarización. Birrefringencia literalmente significa; doble refracción. Cuando la luz no polarizada cae sobre un material birrefringente, este refracta el rayo de luz no polarizado en dos rayos ortogonales polarizados.

Estos rayos son horizontal y verticalmente polarizados. De estos dos rayos, uno se llama rayo ordinario de rayos "O", que obedece a la ley de *Snell*, y el otro es de rayos llamado extraordinario de rayos "E", y no obedece la ley de *Snell*.

El fenómeno de la birrefringencia en la fibra óptica de comunicaciones causa que el pulso se propague. En un caso ideal, la fibra óptica sería un medio uniforme perfectamente cilíndrico y libre de tensión mecánica.

Una simple longitud de onda de luz podría propagarse en una fibra sin ningún cambio en el estado de su polarización. Prácticamente, el núcleo de la fibra no es perfectamente cilíndrico, debido a que sufre estrés mecánico no uniforme y entonces podría deformarse.

Este defecto usualmente podría dar lugar a la birrefringencia en la fibra esto causa que el rayo no polarizado, se polarice dentro en forma horizontal y vertical y haciendo que se polaricen los pulsos.

Debido a la diferencia de retardo grupal (DGD) entre pulsos verticales y horizontales, el pulso viaja distorsionado durante la transmisión en la fibra. DGD tiene un significativo impacto en la máxima tasa de bits posible en una fibra óptica.

El retardo de grupo es el resultado de la birrefringencia en la fibra, para toda la longitud y también depende de la temperatura y la tensión mecánica de la fibra. Una forma para caracterizar el retardo de grupo es utilizando modo de polarización y dispersión (PMD). DGD produce y afecta a las señales ópticas en toda la transmisión de espectros y no hace ninguna excepción con longitud de onda de la señal. Siendo un fenómeno universal puede tratarse con técnicas de compensación.

### **2.4.3. Polarización**

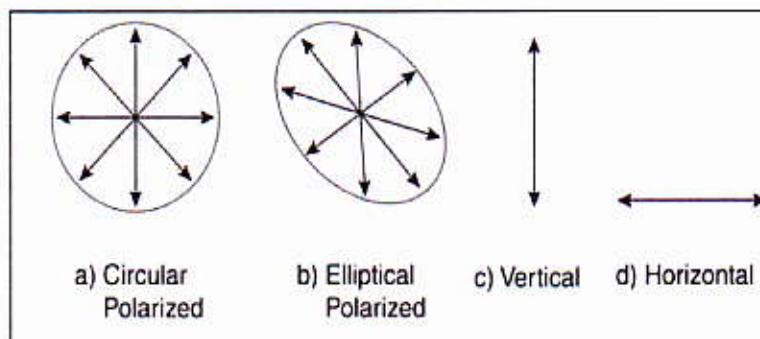
La luz es una forma de radiación electromagnética; ésta está constituida tanto por campo eléctrico (E) como por campo magnético (H) estos son ortogonales entre sí, así como sus componentes elementales.

Estos campos de la onda electromagnética, son variables en el tiempo (E) y (H) y se dice que están linealmente polarizados si la dirección de sus magnitudes y componentes es constante en el tiempo. La condición de polarización circular se da cuando existe una constante proliferación de las axiales (X,Y,Z). Con la luz propagándose a través de la fibra óptica, las ondas constantemente interactúan con el medio.

Esta interacción lleva a una condición cambio en el momento dipolo eléctrico por unidad de volumen, o la polarización, lo que produce polarizaciones elípticas de campos.

$$p = \frac{I_{pol}}{I_{pol} + I_{unpol}}$$

Figura 23. Polarización



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.245.

En la ecuación  $I_{pol}$  representa la corriente de componentes no polarizadas donde  $I_{unpol}$  representa la corriente de componentes polarizadas.

La polarización de una componente resulta de la reflexión, refracción o dispersión. Un rayo incidente que se somete a la reflexión, la refracción o la polarización y a la interacción con el medio o con ella misma se polariza. El grado de la polarización de la componente, depende del ángulo de incidencia, el índice de refracción y el perfil de dispersión de los medios.

## **2.5. Atenuación espectral en la fibra**

Como la señal de la luz atraviesa la fibra, esta señal decrece en nivel de potencia, este decrecimiento en el nivel de potencia es expresado en dB o como un rango de pérdida por unidad de distancia (dB/km).

Las dos principales pérdidas mecánicas de la transmisión de la luz en la fibra óptica son la absorción de la luz y la dispersión.

La luz es absorbida en el material de la fibra, como esta energía es convertida en calor debido a la resonancia magnética e impurezas en la longitud de onda. Por ejemplo, el hidrógeno y el hidróxido entran en resonancia aproximadamente a 1,244 nm y 1,383 nm.

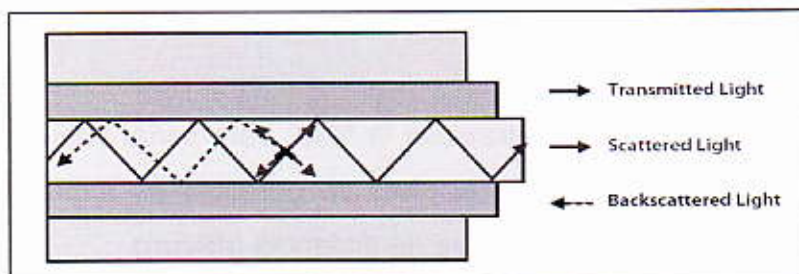
### **2.5.1. Espaciamento (*scattering*) de Rayleigh**

Espaciamento (*scattering*), primariamente dispersión de *Rayleigh*, también contribuye a la atenuación. *Scattering* causa la dispersión de la energía de la luz en todas direcciones, incluso algo de luz escapándose del núcleo de la fibra. Una pequeña porción de esta energía de luz es retornada al centro y es denominado retro dispersión.



La dispersión de la luz hacia adelante se denomina *Ramman Scattering* y a la dispersión hacia atrás se le denomina *Brilluin Scattering*. Estas son dos fenómenos de dispersión que pueden ocurrir en materiales ópticos bajo altas condiciones de potencia.

Figura 24. Tipos de dispersión

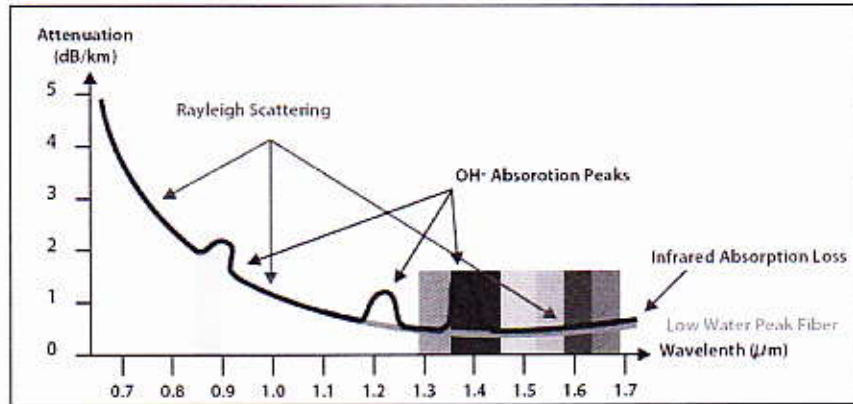


Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.17.

La atenuación depende del tipo de fibra y la longitud de onda. Por ejemplo, la dispersión de *Rayleigh* es inversamente proporcional a la sucesiva potencia de a longitud de onda. Si la absorción espectral de la fibra es graficada contra la longitud de onda del laser. Ciertas características de la fibra pueden ser identificadas. Las siguiente gráfica ilustra la relación entre la longitud de onda de la luz inyectada y la total atenuación de la fibra.

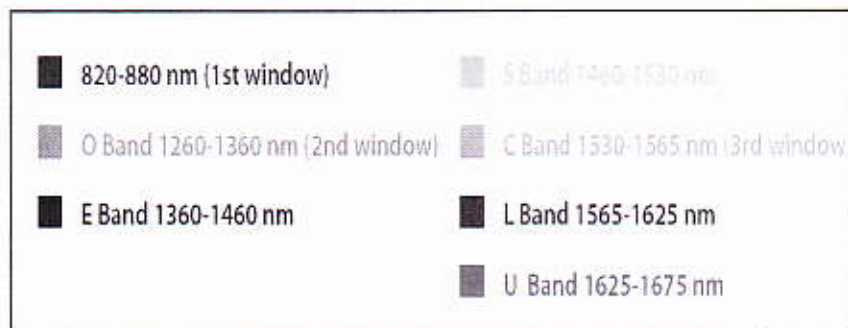
Las principales longitudes de onda de las transmisiones de telecomunicación corresponden a los puntos sobre la gráfica donde la atenuación es mínima. Estas longitudes de onda son conocidas como la ventana de comunicaciones. La ITU-T G.692 a definido como estándar ventanas adicionales llamadas bandas, las cuales son dedicadas a sistemas de transmisión *DWDM*.

Figura 25. Longitud de onda vs. atenuación



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p. 17.

Figura 26. Bandas definidas ITU-T



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p. 18.

El símbolo OH identificadas en la gráfica indica en la longitud de onda de 950nm, 1,244 nm, y 1,383 nm, la presencia de iones de hidróxido e hidrógeno en el material de la fibra óptica lo cual causa incremento en la atenuación.

Estos iones resultan de la presencia de agua que entra en el material del cable a través, ya sea de una reacción química en el proceso de

manufacturación o humedad en el ambiente. La variación de atenuación con respecto a la longitud de onda debido al pico de agua para los cables de fibra estándar mono-modo existe generalmente alrededor de 1,383 nm. Recientemente un avance en el proceso de manufacturación del cable de fibra óptica han superado los 1,383 nm y un pico el pico de agua se ha trasladado a bajos picos de agua en la fibra. Por ejemplo un tipo de fibra incluye *SMF28e de Corning OFS ALLWave*.

### **2.5.2. Dispersión**

La velocidad de propagación de la luz depende de la longitud de onda. La degradación de la onda de luz es causada por los distintos componentes espectrales presentes en la onda, cada uno viaja por su propia velocidad, a este fenómeno es llamado dispersión.

La dispersión reduce efectivamente el ancho de banda disponible para la transmisión. Hay tres importantes tipo de dispersión, la dispersión modal la dispersión cromática y la dispersión por modo de polarización.

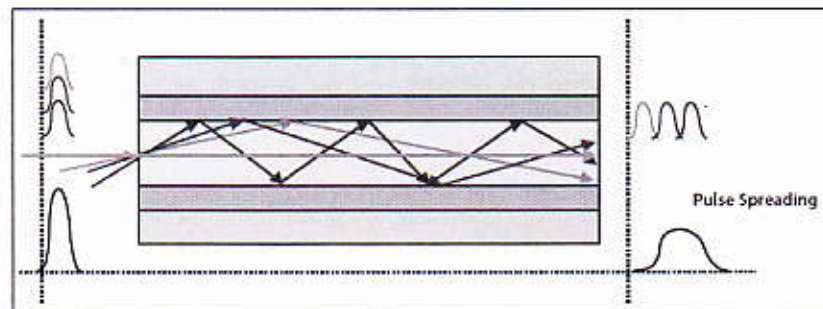
### **2.5.3. Dispersión modal**

Típicamente la dispersión modal ocurre en la fibra multimodal. Cuando un muy corto salto de pulso de luz es inyectado dentro de la fibra en dentro de la apertura numérica, todo la energía no llegara a el final de la fibra al mismo tiempo.

Diferentes modos de oscilación transportan la energía dentro de la fibra usando recorridos de diferentes longitudes. Por ejemplo, el núcleo de la fibra de 50 $\mu$ m puede tener varios miles de modos.

La difusión de este pulso en virtud de la luz en diferentes longitudes se llama dispersión modal o simplemente dispersión multimodal.

Figura 27. **Dispersión modal**



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.22.

#### 2.5.4. **Dispersión cromática**

La dispersión cromática ocurre porque un pulso de luz es creado de diferentes longitudes de onda. Cada longitud viaja a diferente velocidad dentro de la fibra. Esta diferencia de velocidades de propagación amplía el pulso de luz cuando llega al receptor, reduciendo la señal relación a ruido e incrementando los bits de error.

La dispersión cromática es definida por tres principales parámetros:

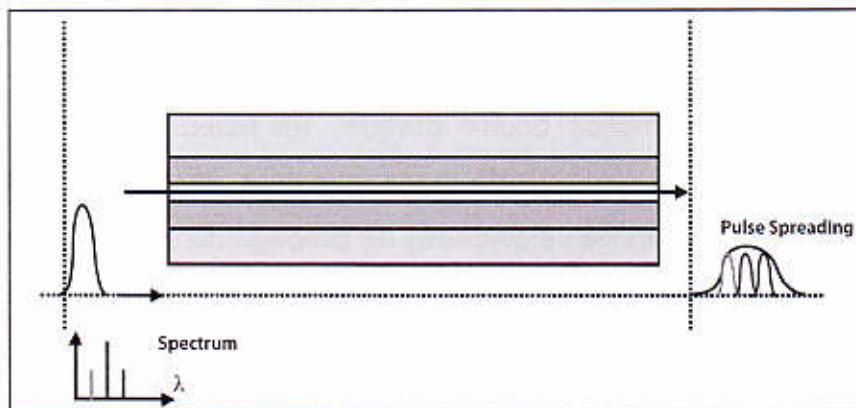
- El retardo dado en la longitud de onda es expresado en ps
- El coeficiente de dispersión (D) expresado en ps/nm. Este corresponde al retardo en la operación como una función de la longitud de onda (o por la pendiente de la curva que representa el retardo como una función de la

distancia en una determinada longitud de onda), esto es expresando en  $\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  si es estandarizado a un kilómetro.

- La pendiente  $S$  expresada en  $\text{ps}/(\text{n}^2\cdot\text{km})$ , esta operación corresponde a el retardo como una función de longitud de onda (o a la pendiente de la curva representando la dispersión como un función de la distancia que está dada por la longitud de onda)

Ambos el coeficiente de dispersión (estandarizado en kilómetro) y la pendiente dependen del largo de la fibra. La dispersión cromática primariamente depende del proceso de manufacturación.

Figura 28. **Dispersión cromática**



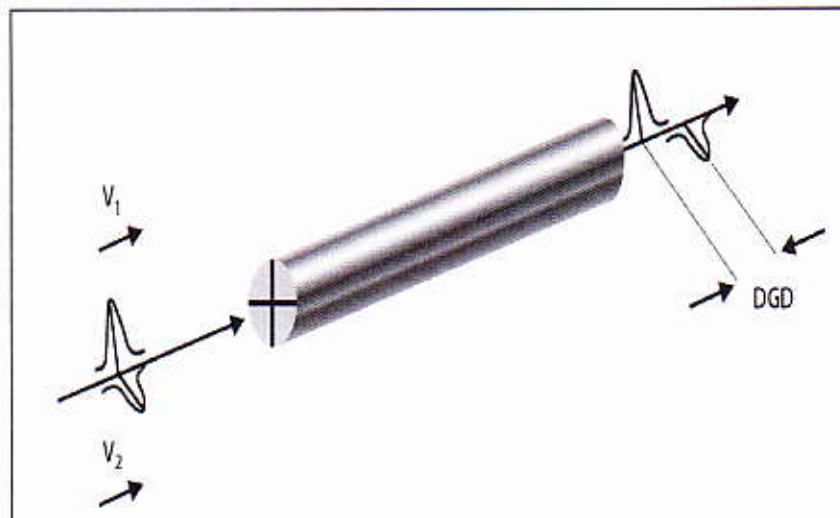
Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.22.

### 2.5.5. **Dispersión de modo de polarización *PMD***

Modo de dispersión de polarización (*PMD*) es una propiedad básica de la fibra mono modo. Esta afecta a la magnitud de la tasa de transmisión.

*PMD* resulta de la diferencia en la velocidad de propagación de la energía de una longitud de onda dada, cuando esta es dividida en dos ejes de polarización que se encuentran en ángulos rectos uno de otro (como se muestra en el siguiente diagrama). La principal causa de *PMD* son la no circularidad del diseño de la fibra y externamente la aplicación de estrés en la fibra (macro curvas, micro curvas, remolinos, y variaciones de la temperatura).

Figura 29. *PMD*



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.24.

El *PMD* hace también referencia al valor medio de todos los retardos diferenciales de grupo (DGD) y es expresado en (ps). Este también puede ser declarado como el coeficiente de *PMD* que está relacionado con la raíz cuadrada de la distancia y es expresada en  $\text{ps}\sqrt{\text{km}}$ .

El *PMD* causa la ampliación del pulso cuando este transmitido a lo largo de la fibra. Este fenómeno genera distorsión, incrementado la tasa de error (*BER*) del sistema óptico. La consecuencia del *PMD* es que este limita la

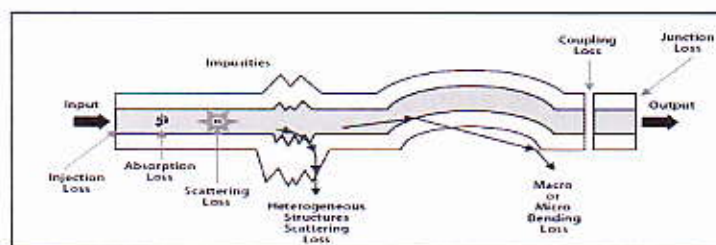
máxima tasa de de transmisión. Por tanto es importante conocer el valor *PMD* de la fibra para calcular el límite de la tasa de bit del enlace de fibra óptica.

## 2.6. Efectos en casos de impureza en la fibra

Una impureza es la presencia de elementos no deseados o componentes en la materia. Durante el proceso de purificación de la materia (ej. Silica) ciertos elementos no pueden ser removidos en su totalidad y algunos restos se mantendrán remanente. Estos elementos inestables o compuestos alteran las características ópticas del material transparente (ej. Fibra) y esto tiene un efecto de absorción y tiene un resultado de pérdidas de dispersión por fotones en otra dirección.

Para los tendidos de fibra óptica los efectos de los componentes pasivos y las pérdidas de conexiones se suman a la inherente atenuación de la fibra para obtener la señal de atenuación total. Esta atenuación (o pérdida), para una longitud de onda, es definida como la relación entre la entrada de potencia y la salida de potencia de la fibra. Este es expresado generalmente en decibeles (dB).

Figura 30. Pérdida de enlace mecánico



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.19.

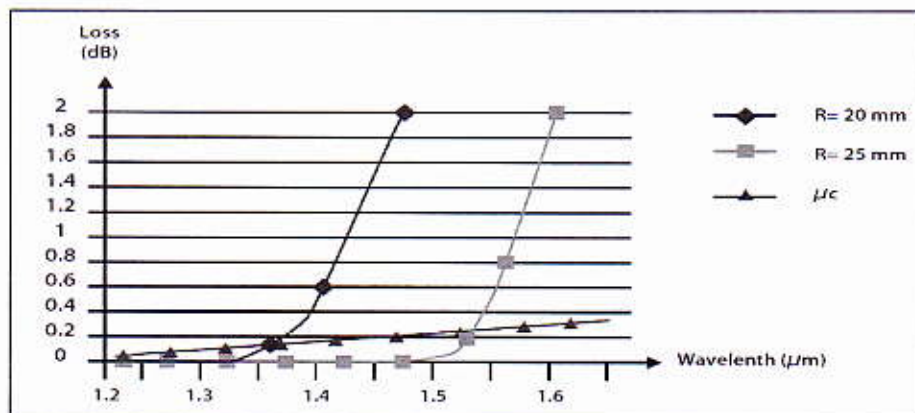
### 2.6.1. Micro curvas y macro curvas

El micro y macro curvas son un problema común en instalación de sistemas de cable por que estos pueden incidir pérdidas de potencia en la señal.

Las micro-curvas ocurren cuando el núcleo de la fibra se aparta de el eje y esto puede ser causado por defectos de fabricación, tales como limitaciones mecánicas durante el proceso de colocación de fibras, y las variaciones del medio ambiente (temperatura, humedad o presión) durante el tiempo de vida de la fibra.

Las macro-curvas hacen referencia a una larga curva en la fibra (con más de unos 2mm de radio). La figura 31, muestra la influencia de los radios (R) de las curvas sobre la pérdida de señales como una función de la longitud de onda. La traza "μc" se refieren a una fibra ideal sin curvaturas.

Figura 31. Fibra ideal sin curvaturas

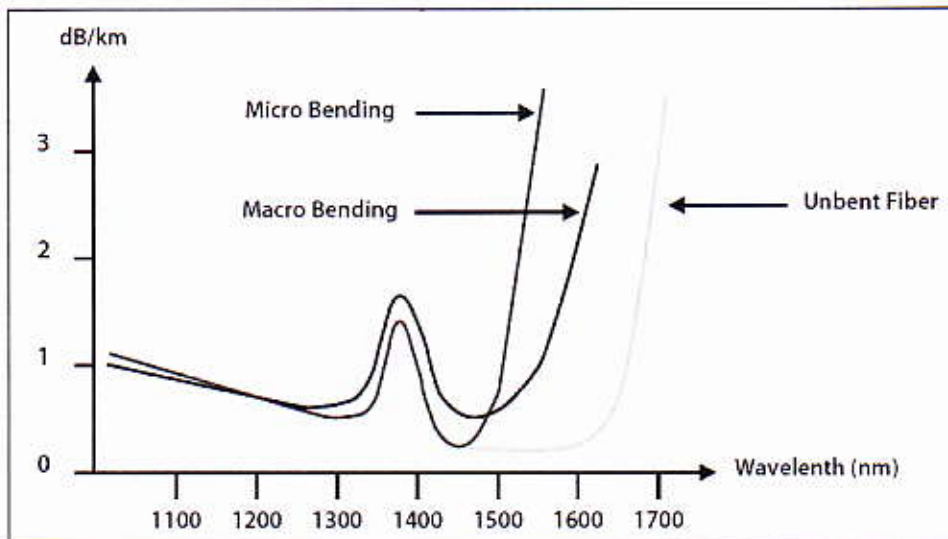


Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.20.



Por ejemplo la pérdida de señal para una fibra que tiene 25 mm de radio de macro curvas tendrá 2 dB en 1,625 nm, pero sólo 0,4 dB en 1,550 nm. Otra manera de calcular la señal de pérdida es sumando el típico coeficiente de atenuación (de acuerdo a longitudes de onda como lo indica la figura 32) sobre la pérdida de curvatura.

Figura 32. **Coeficiente de atenuación con curvas y sin curvas**



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.20.

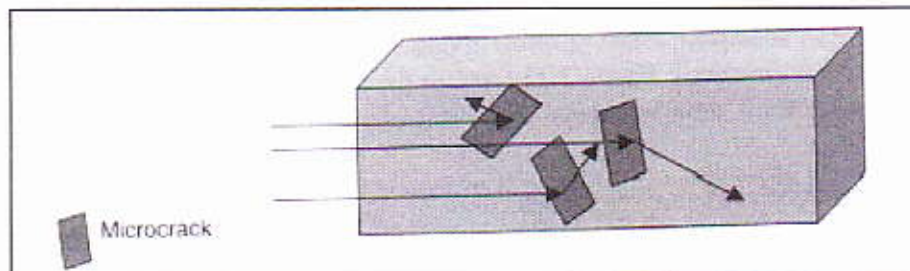
Como se muestra por encima de la gráfica, si la banda L (1 565/1 625 nm) o la banda U (1 625-1 675 nm) son utilizadas, la medición de las pérdidas son necesarias para la transmisión de longitudes de onda hasta el límite superior de la banda. Por esta razón, nuevos equipos de medición están desarrollándose con capacidades de 1 625 nm. Entonces el parámetro más importante de la fibra para la instalación de la red son las pérdidas por empalme, pérdidas de enlace, y la pérdida de retorno óptico (ORL).

### 2.6.2. Efecto de micro cortes

Las grietas pueden ser vistas como discontinuidades en el índice de refracción de la materia con planos que no son necesariamente moderados. Las micro grietas en la matriz cristalizada de la materia, son generadas por estrés (mecánicamente o térmico) o envejecimiento del material.

Las micro grietas son invisibles a simple vista y se vuelven visibles solo bajo un buen microscopio o con especiales técnicas de interferómetro. Como la luz viaja a través de la materia en la que hay micro grietas, esta propagación es perturbada o alterada.

Figura 33. **Materia con micro cortes**



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Introduction to dwdm technology, p. 134.

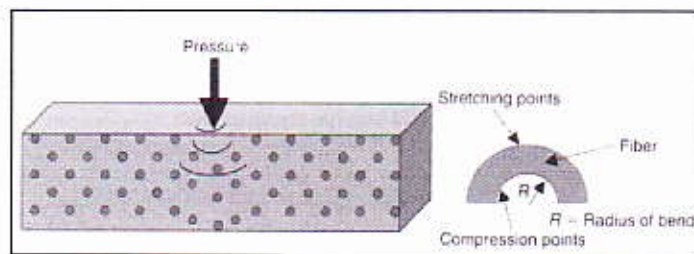
### 2.6.3. Efectos de presión mecánica

Cuando la presión mecánica es aplicada, la micro estructura interna de la materia es perturbada.

Como uno de los resultados, se tiene una variación en el índice de refracción determinado por la presión en la distribución del material. La presión

mecánica solo ejerce sobre la fibra cuando éstas son estiradas o dobladas. La presión y el estiramiento son claramente puntos de perturbación que son generalmente indeseables en las telecomunicaciones. Las curvas recomendadas por ITU-T es el radio ampliamente aceptable de 37,5 mm (ITU-T G.652, ara 5,5, note2).

Figura 34. Efectos de presión mecánica



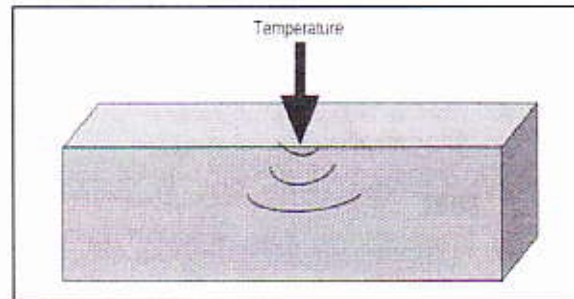
Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Introduction to dwdm technology, p.134.

#### 2.6.4. Efectos de las variaciones en temperatura

Las propiedades de la materia varían con forme las variaciones de la temperatura. Además de cambiar sus propiedades físicas, eléctricas, magnéticas y propiedades químicas también cambia la temperatura. Como un resultado de esto, el índice de refracción es afectado.

Claramente, en las comunicaciones ópticas, la variación de la temperatura es indecible, aunque en algunos casos la temperatura controlada se utiliza productivamente en la variación del índice de refracción de los dispositivos ópticos.

**Figura 35. Efectos de temperatura**



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Introduction to dwdm technology. p.138.

## **2.7. Codificación y decodificación óptica**

### **2.7.1. Codificando información óptica**

Una fuente óptica es un requerimiento para generar datos ópticos, que son transportados sobre fibra. Las fuentes son moduladas por la señal de modo que cuando la modulación de la luz incide en la foto detector, los datos originales son recreados. Los métodos de modulación en la modulación óptica juegan un rol importante en la potencia de la señal cuando ésta dentro de la fibra.

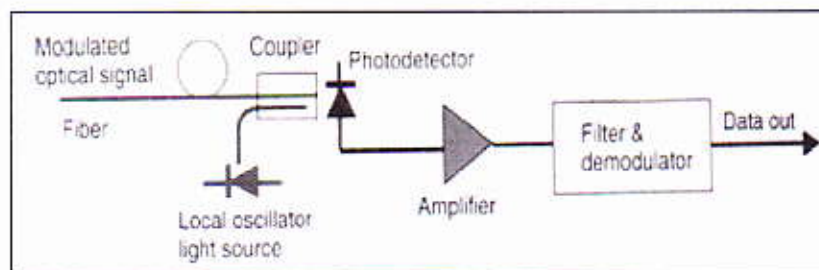
Las técnicas de detección heterodina y homodina se han desarrollado para la transmisión de radio, esto también se conoce como coherente, se utiliza en óptica de transmisión. Sin embargo en la transmisión óptica el término "Coherente" indica que otra fuente de luz se usa como oscilador local en el receptor.

En el caso de los sistemas de comunicación digital la fase la frecuencia y la amplitud de una señal portadora pueden ser moduladas.

Cuando la fase es modulada el método es llamado *phase-shift keying* (PSK); cuando la frecuencia es modulada esto es llamado *frequency-shift keying* (FSK); cuando la amplitud es modulada, esta es llamada *amplitude-shift keying* (ASK).

Cada método de modulación tiene sus ventajas y desventajas. Otros métodos como lo son la intensidad de una fuente de luz es modulada y solo detectada por un fotodetector conocido como intensidad de modulación con detección directa (IM/DD).

Figura 36. **Detección coherente**



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Introduction to dwdm technology, p.234.

### 2.7.1.1. Señales Unipolar y Bipolar

Una señal bipolar es un voltaje de tres niveles que típicamente cambia entre un voltaje positivo y un voltaje negativo. La señal bipolar puede ser RZ o NRZ. En una señal digital bipolar, se alternan entre los dos voltajes, positivo y negativo. Esto da como resultado una componente cero-dc en la línea de transmisión.

Una señal unipolar es una señal de dos niveles los cuales típicamente cambian entre cero y un nivel positivo. Una señal unipolar es considerada como una señal *on-off* que puede ser ampliada a cualquier señal eléctrica y óptica.

En la transmisión eléctrica se asume estadísticamente que es un número igual de ceros y unos, entonces el componente de dc podría llegar a ser la mitad del voltaje pico positivo. Para transmisiones sobre largas distancias, esta componente de dc es indeseable. En transmisión óptica, una señal unipolar es algo conocido como *on-off keying*.

Otra categoría es la señal multinivel, en este caso varios niveles de voltaje pueden ser usados, cada nivel correspondientemente a un código de 8 bits. Aunque las señales de multinivel son atractivas por las propiedades de compresión del código inherentes. No obstante esta no se usa para transmisión en las redes de comunicación. En la transmisión óptica las señales de multinivel no existen.

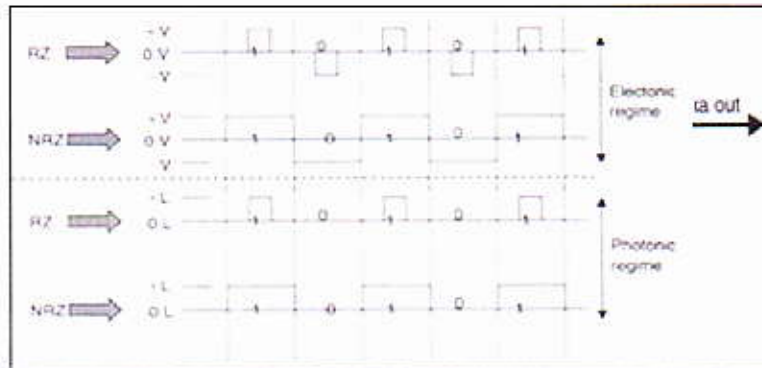
### **2.7.2. Formato ASK**

Codificación maestra por amplitud (ASK) es una técnica que usa cadena eléctrica de bit, que modula la intensidad de una onda de luz (portadora) directamente. La portadora tiene una máxima amplitud del valor "1" y una mínima amplitud para los bits que tengan valor "0". Esta evaluación al caso de señal unipolar es conocido como *on-off key*(OOK). Hay dos variaciones de ASK, RZ cuando la señal retorna a cero en cada símbolo (1, 0), y NRZ no retorna a cero.

El formato ASK puede ser usado en sistemas coherentes o en IM/DD. Sin embargo cuando un semiconductor laser es directamente modulado, la fase de

la señal también sufre cambios. En la detección IM/DD, el cambio en las fase no es importante.

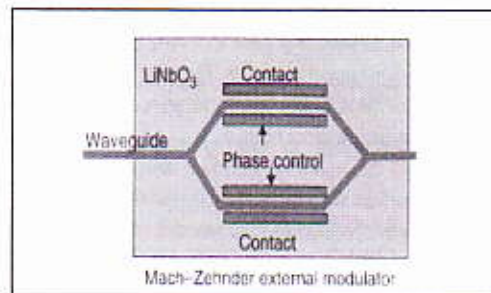
Figura 37. **Modulación bipolar**



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.134.

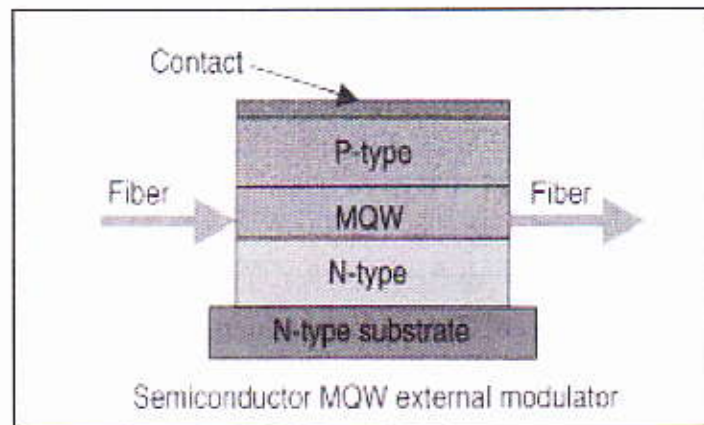
La detección coherente, sin embargo requiere de una fase constante, y así la amplitud exactamente modulada por una difusa de titanio  $\text{LiNbO}_3$  guía de onda en una configuración *Mach-Zenheder* o un acople direccional semiconductor basado en propiedades electro absorción cuántica múltiple.

Figura 38. **Modulador Mach Zenheder**



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.147.

Figura 39. **Modulador externo**



Fuente: JDSU. Guide to fiber optic testing, p.147.

### 2.7.3. **Demodulador ASK**

Los demoduladores *ASK* usan foto detectores que directamente detectan ampliación de incidencia fotónica. Basándonos en el nivel de umbral, la amplitud incidente estará interpretada como un 1 lógico y por debajo como un 0 lógico.

Cuando la amplitud incidente es ambigua es debido al ruido fotónico de la fuente, que producirá entonces un error uno o cero. Para reducir el ruido de la señal, la señal obtenida pasa por un filtro pasa-bajo y es muestreado por un PLL (fase de lazo cerrado) en espera de la tasa de bit deseada.

Cabe señalar que para largas distancias de fibra la señal se debilita y la luz incidente reduce considerablemente. Esta cantidad es conocida como límite de conteo del receptor.



#### 2.7.4. Formato PSK

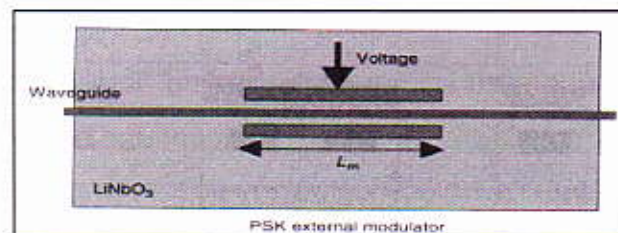
Codificación maestra por fase (PSK) es una técnica de modulación de fase a una onda de luz (la portadora), mientras que la frecuencia y la amplitud se mantienen constantes durante todos los bits, así se logra la aparición continua de la onda de luz. Para PSK binario, la fase es  $0^\circ$  ó  $180^\circ$ . Para PSK de múltiples niveles, el cambio podría ser un incremento, por ejemplo 8 niveles de  $45^\circ$ . PSK es una técnica coherente.

PSK es implementado externamente para que pase el haz de la luz a través de un dispositivo conocido como modulador de electro refracción; cuando un voltaje es aplicado al haz, el índice de refracción cambia. Estos dispositivos son hechos con cristales electro-ópticos con adecuada orientación. Tal como  $\text{LiNbO}_3$ . La fase diferencia de fase es expresado por

$$\delta\phi=(2\pi/\lambda)(\delta n)L_m$$

Donde el cambio de índice  $\delta\phi$ , es proporcional a la amplitud del voltaje y  $L_m$  es la longitud, sobre el cual el cambio de índice para la aplicación del voltaje.

Figura 40. Modulador PSK



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Introduction to dwdm technology. p.265.

### 2.7.5. Formato FSK

Codificación maestra por frecuencia (FSK) es una técnica que modula la frecuencia  $w$  de un haz de luz.

La frecuencia de la longitud de onda cambia por  $\Delta f$  para lógica "1" y  $f - \Delta f$  para lógica "0". FSK es una técnica coherente dos-estados (on-off) FM. Típicamente las frecuencias cambian cerca de 1Ghz.

El ancho de banda total de una técnica FSK es aproximadamente  $2\Delta f + 2B$ , donde  $B$  es la tasa de bit y  $\Delta f$  la desviación de frecuencia.

- Cuando la desviación es grande ( $\Delta f \gg B$ ), el ancho de banda será  $2\Delta f$ . Este caso será conocido como FSK de banda ancha
- Cuando la desviación es angosta ( $\Delta f \ll B$ ), el ancho de banda será  $2B$ . Este caso es conocido como banda angosta FSK.

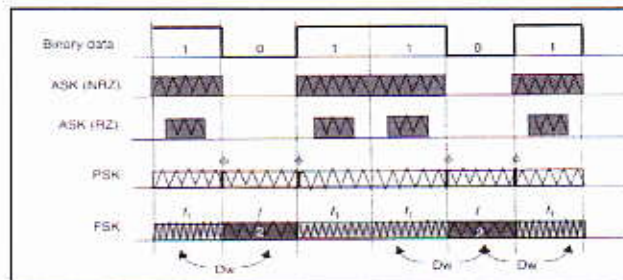
Ambos casos son distinguidos por la frecuencia de modulación  $\Delta f/B = \beta_{FM}$ . Claramente, el índice de frecuencia de modulación es  $\beta_{FM} \gg 1$  or  $\beta_{FM} \ll 1$ .

La implementación de dispositivos FSK es basada en modulador electro acústico *Bragg* o sobre distribución de retorno (DFB) semiconductor laser. Los semiconductores láser exhiben una frecuencia maestra cuando la corriente de operación cambia. Un pequeño cambio en la corriente (1 mA) cambiará la frecuencia por 1 Ghz. Cuando el cambio de corriente es pequeño, el cambio de intensidad (amplitud) es muy pequeño. Por lo tanto los laser semiconductores DFB son muy bueno y de rápida coherencia para las fuentes de modulación de alta frecuencia.

### 2.7.6. Demoduladores PSK y FSK

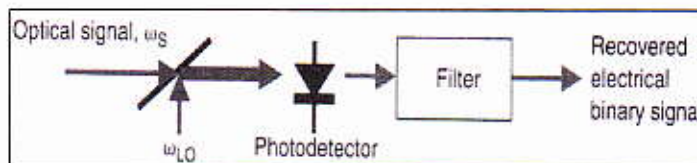
Los demoduladores PSK y FSK están basados en principio de detección coherente (homodino y heterodino) . Esto significa que además de la señal óptica recibida de la fibra, el receptor debe tener uno o dos osciladores locales (fuentes ópticas), para interactuar con la señal óptica recibida y para extraer la información binaria. Los principios básicos de un demodulador homodino PSK (sin ruido) es la figura 42:

Figura 41. Codificación y decodificación óptica



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Introduction to dwdm technology, p.267.

Figura 42. Principio básico Demodulador heterodino



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Introduction to dwdm technology, p.249.

El receptor óptico recibe una señal modulada con  $\omega_s$  es mezclada con una señal localmente generada con  $\omega_{LO}$ . Estas frecuencias son similares, y ellas interactúan interferométricamente.

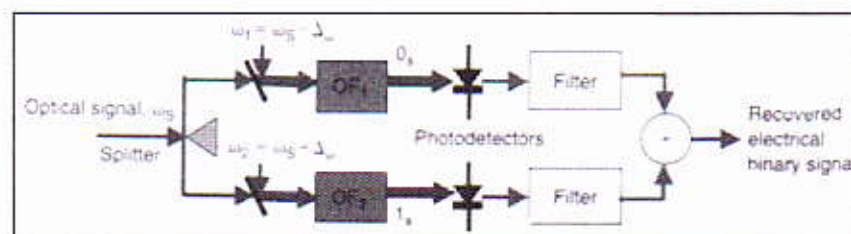
Claramente, cuando ambas frecuencias en fase, se dará la máxima contribución óptica, de lo contrario, ellas se cancelarán una con otra. Porque estos arreglos son basados sobre interferencia óptica, la estabilidad de fase es importante.

La señal óptica mezclada es detectada por una foto-detectora que provee de salida eléctrica de 1 ó 0 lógico. Claramente la demodulación pasa a ser más complicada cuando el ruido es incluido.

El principio básico del demodulador homodino (sin ruido) se ve en la figura 43. El receptor de modulación óptica recibe la señal modulada en  $\omega_s$  es dividida en dos partes iguales. Entonces cada parte interactúa interferométricamente con una frecuencia localmente generada. Una parte con  $\omega_1 = \omega_s - \Delta\omega$  y la otra con  $\omega_2 = \omega_s + \Delta\omega$ . Porque cada frecuencia local coincide con la frecuencia de un 0 lógico o un 1 lógico, es obvio que si dos filtros ópticos, OF1 y OF2 son usados, cada uno centrado en el doble de la frecuencia respectivamente, los bits temporales 1 y 0 son reconocidos.

Luego se re combinan las dos mitades en el dominio del tiempo, la cadena completa de datos será recuperada.

Figura 43. Principio básico demodulador homodino FSK



Fuente : SMATIOS V, Kartalopulos. Introduction to dwdm technology. p.267.



### 3. FUNDAMENTOS DEL DWDM

#### 3.1. Sistemas ópticos de comunicación

Se sabe que la energía de la luz viaja entre dos puntos en el espacio. Se usa este hecho como idea base, para la comunicación de dos puntos con un haz de luz. Un sistema básico de transmisión óptico consiste de tres elementos: transmisor óptico, cable de fibra óptica o canal óptico y receptor óptico.

Tabla IV. Sistema básico de transmisión óptica

<b>Transmisor óptico</b>	<b>Canal óptico (cable de fibra óptica)</b>	<b>Receptor óptico</b>
Convierte señales eléctricas en luz modulada para su transmisión a través de fibra óptica.	Consiste en una o más fibras ópticas que sirven de guía de onda que canalizan a las señales ópticas.	Convierte la señal óptica en una copia exacta de señal eléctrica original.

Fuente: elaboración propia.

Otro dispositivo frecuentemente utilizado es el regenerador. Un regenerador puede ser usado sólo en sistemas digitales de comunicación.

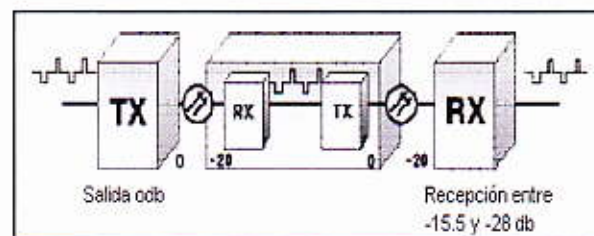
Estos dispositivos convierten las señales ópticas débiles y alteradas, en señales electrónicas, y después se regeneran los trenes de pulsos digitales para su transmisión.

Los pulsos de luz deben ir lo más lejos posible a través de la fibra para minimizar el costo del enlace. La luz típicamente puede viajar de 40 a 80 km. antes que se atenúe o se disperse demasiado.

Entre más lejos pueda viajar una señal sin tener un equipo para darle más potencia, la red resultará más barata. La forma típica para hacer que la luz llegue más lejos, es terminar el enlace de fibra y empezar de nuevo usando un regenerador.

Este proceso es simple y limpio, desafortunadamente el costo es alto, ya que se recibe la señal óptica, de la cual se genera una señal eléctrica, para obtener una nueva señal óptica idéntica a la señal original, como se muestra en la figura 44.

Figura 44. Diagrama de regenerador

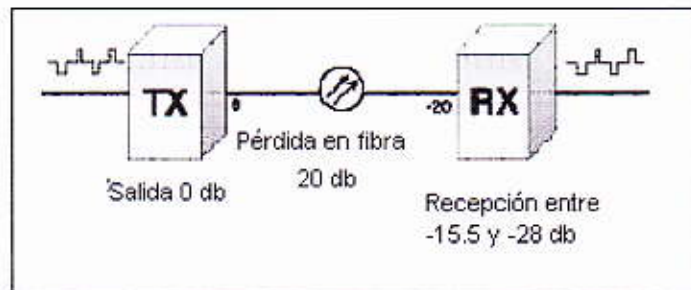


Fuente: IEC. Fundamentos y equipo óptico, p.2.

Una alternativa para evitar la regeneración es simplemente dar más energía a la señal óptica. La regeneración resulta cara ya que se tiene que regenerar la señal para cada longitud de onda, aquí es donde la amplificación resulta ser más atractiva ya que le inyecta energía a la señal completa y no se necesita amplificar cada longitud de onda. De ésta manera el costo es compartido entre todos los canales.

La función de los amplificadores ópticos, es aumentar los niveles de potencia a señales débiles. Para enlaces muy largos (cientos y miles de kilómetros) se necesitan amplificadores para proveer suficiente potencia y asegurar la entrega de una señal que pueda entender el receptor, ya que los amplificadores ópticos no pueden compensar una señal. Una señal deja al transmisor en 0db. Al viajar la señal por la fibra, ésta va perdiendo potencia. Al momento de llegar al receptor, la señal lleva una pérdida de -20db si esto está en el rango operativo del receptor se tiene un sistema en buenas condiciones.

Figura 45. Pérdida en fibra



Fuente: IEC. Fundamentos y equipo óptico, p.3.

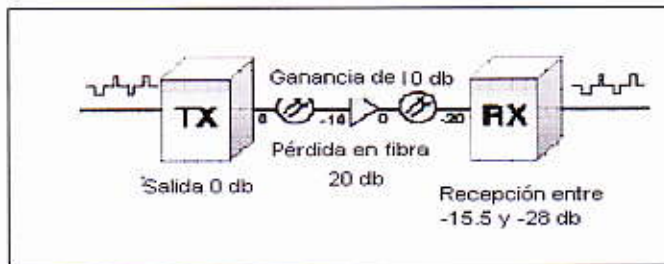
Para compensar la pérdida de potencia en una señal se añade un amplificador al sistema. Una señal deja el transmisor a 0db. Cuando alcanza una pérdida de -10db un amplificador se añade para aumentar potencia a la señal, y así llegar a -20db.

*DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)* es una técnica usada para incrementar la capacidad de transmisión de una fibra óptica, esto se logra transmitiendo múltiples señales en diferentes longitudes de onda a través de una sola fibra. Cada señal obtiene una única longitud de onda, o color en el



espectro de colores de la luz. Después todas las señales son transmitidas juntas y combinadas como una sola señal.

Figura 46. **Compensación de pérdida**



Fuente: IEC, Fundamentos y equipo óptico, p.3.

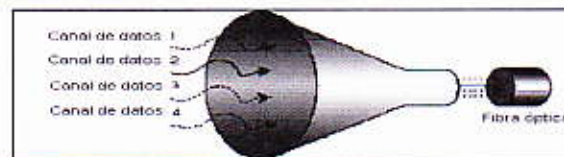
*WDM (Wave Division Multiplexing)*, es una solución ideal para rutas críticas con un alto crecimiento que tienen una necesidad inmediata de más ancho de banda, o incorporar nuevos servicios a la red existente. *WDM* ayuda a disminuir la inversión del capital y los largos tiempos asociados a añadir más fibra.

*WDM* y *TDM (Time Division Multiplexing)* trabajan en conjunto para optimizar la capacidad de la fibra. *TDM* genera los flujos de bits de la forma más rápida. Este tren de bits, ya sea síncrono o asíncrono, es ingresado a un sistema de *WDM*, en conjunto con otros flujos multiplexados. Estos flujos que provienen de un sistema *TDM* son multiplexados a longitudes de onda asignados para ser transportados sobre una fibra óptica. Cada proceso incrementa el total de la capacidad del enlace.

*WDM* y *TDM (Time Division Multiplexing)* trabajan en conjunto para optimizar la capacidad de la fibra. *TDM* genera los flujos de bits de la forma más

rápida. Este tren de bits, ya sea síncrono o asíncrono, es ingresado a un sistema de *WDM*, en conjunto con otros flujos multiplexados. Estos flujos que provienen de un sistema *TDM* son multiplexados a longitudes de onda asignados para ser transportados sobre una fibra óptica. Cada proceso incrementa el total de la capacidad del enlace.

Figura 47. Técnica DWDM

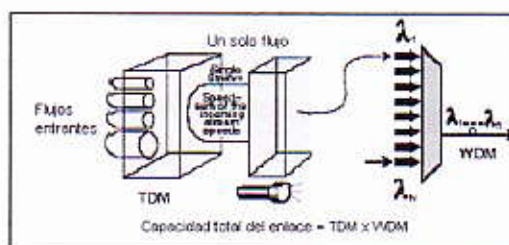


Fuente: IEC. Fundamentos y equipo óptico, p.4.

La tecnología de *WDM* puede ser clasificada en banda ancha y banda angosta:

- En banda amplia los canales de las longitudes de onda están ampliamente espaciados
- En banda angosta los espacios entre las longitudes de onda de los canales son más reducidos.

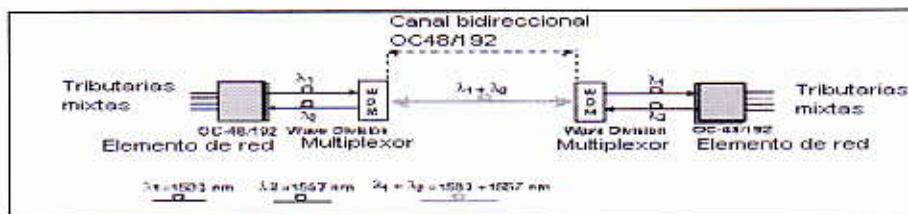
Figura 48. Unión TDM / DWDM



Fuente: IEC, Fundamentos y equipo óptico, p.4.

*WDM* de banda amplia es una solución para aplicaciones con un alcance limitado, sus capacidades de mantenimiento son limitadas ya que usualmente el sistema consta sólo de un acoplador óptico y un filtro. Así como *WDM* de banda amplia, así mismo *WDM* duplica la capacidad de la fibra. Utiliza dos lambdas de baja pérdida típicamente 1 533 y 1 557 nm como se muestra en la siguiente ilustración.

Figura 49. **Ampliación capacidad**



Fuente: IEC. Fundamentos y equipo óptico. p.5.

### 3.2. Componentes de un sistema *DWDM*

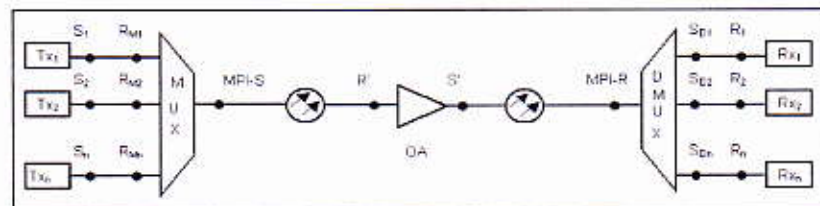
- Transponedor
- Multiplexor óptico
- Demultiplexor óptico
- Amplificador óptico (*Booster* o Preamplificador).

*DWDM* (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) es *WDM* de banda angosta, que generalmente involucra ocho o más longitudes de onda de luz.

El primer sistema *DWDM* fue diseñado para aplicaciones de intercambio de una red *long-haul*. Por *long-haul* se hace referencia a distancias arriba de los 100 kilómetros. Sistemas contemporáneos de uso comercial utilizan hasta

ochenta longitudes de onda, y en equipos de próximos a ser lanzados soportan hasta 160 longitudes de onda, y con una mayor capacidad han sido demostrados en laboratorio.

Figura 50. Componentes de un sistema DWDM



Fuente: IEC. Fundamentos y equipo óptico, p.7.

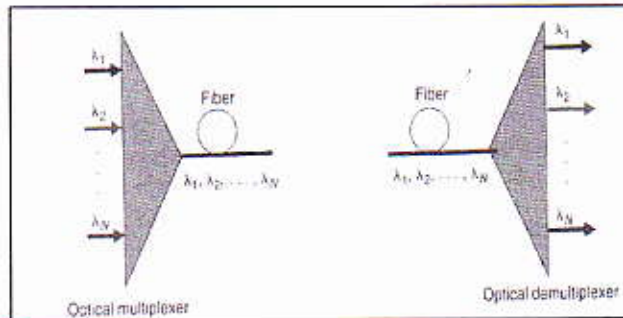
Las longitudes de onda utilizadas se ubican en el rango de los 1 550 nm, este rango permite el uso de la tecnología de amplificadores de erbio dopado por sus siglas en inglés (*EDFA*). El multiplexor óptico (también llamado acoplador óptico) multiplexa múltiples longitudes de onda en una misma fibra común. El demultiplexor óptico (también llamado filtro o *splitter*) divide las longitudes de onda en señales individuales iguales a las de la estación receptora.

### 3.2.1. Multiplexor/Demultiplexor OADM

#### 3.2.1.1. Multiplexor óptico Add/Drop

Los multiplexores son componentes específicamente diseñados para sistemas de multiplexión por longitud de onda. El demultiplexor por su lado hace lo contrario a lo que el multiplexor, este separa una multiplicidad de longitudes de onda y las direcciona a muchas fibras.

Figura 51. **Multiplexor óptico**



Fuente: SMATIO V, Kartalopoulos. Optical components, p.151.

### 3.2.1.2. **Función OADM**

La principal función de un multiplexor óptico es acoplar dos o más longitudes de onda en una misma fibra.

Si un demultiplexor es colocado y correctamente alineado espalda con espalda con un multiplexor, es evidente que en la zona entre ellos existen dos longitudes de onda individuales. Esto presenta una mayor oportunidad para una mayor función, en la que una longitud de onda individual puede ser removida o incorporada.

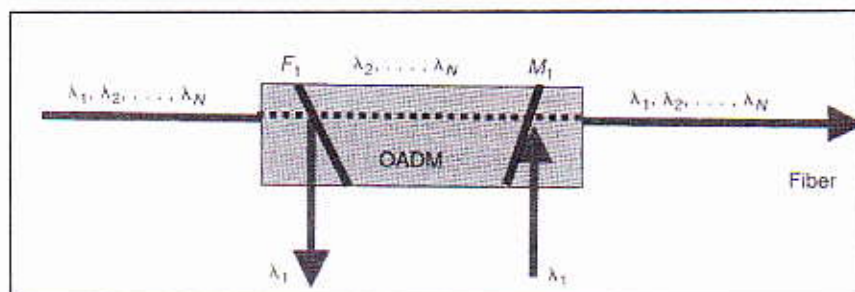
Esta función es conocida como multiplexión / demultiplexión con inserción y extracción de longitud de onda, por sus siglas en inglés denominada *OADM*, esto sigue evolucionando, y aunque estos componentes son relativamente pequeños, en el futuro, la integración de estos jugará un papel clave en la producción compacta, monolítica y dispositivos costo-efectivos.

### 3.2.1.3. OADM

Los *OADM* selectivamente remueven (*drop*) una longitud de onda de una multiplicidad de longitudes en la fibra, y por tanto el tráfico en el canal seleccionado, a continuación añade en la misma dirección de flujo de datos de la misma longitud de onda, pero con diferente contenido. El modelo de un *OADM*, para longitud de onda  $\lambda_1$ , es esquemáticamente mostrada en la figura 52, donde  $F_1$  significa un filtro seleccionando la longitud de onda  $\lambda_1$ , dejando pasar todas las otras longitudes de onda, y  $M_1$  significa un multiplexor que multiplexa todas las longitudes de onda.

Una mejor observación de la función *OADM* es mostrada en la figura 53. Esta función es especialmente usada en sistemas de anillos *WDM* como también en recorridos largos con características inserción-extracción. Una posible estructura de la función *AD* usando un *switch* 2 X 2 es ilustrado para una longitud de onda en la figura 52, agregando más *switch* ópticos entre multiplexor y demultiplexor podrían soportar más inserción y extracción de longitudes de onda.

Figura 52. *OADM*



Fuente: SMATIOS V, Kartalopulos. Optical components, p.152.

*OADM* son clasificados como longitud de onda exacta y dinámicamente seleccionable. *En los OADM fijos*, la longitud de onda ha sido seleccionada y sigue siendo la misma hasta la intervención humana. En los *OADM* dinámicos, la longitud de onda entre los multiplexores y demultiplexores ópticos puede ser dinámicamente direccionada de la salida de un demultiplexor a cualquiera de las entradas del multiplexor. Este puede ser realizado por ejemplo, por un arreglo de micro espejos (ver 2.3.4.).

### **3.2.2. Técnicas de multiplexión y demultiplexión**

Una simple multiplicación o desmultiplicación de la luz puede hacerse usando un prisma, la 53 demuestra el caso de la desmultiplicación. Un haz paralelo de luz poli-cromática impacta sobre una cara de la superficie de un prisma, cada componente de la longitud de onda es refractado diferentemente, este es el efecto arcoíris.

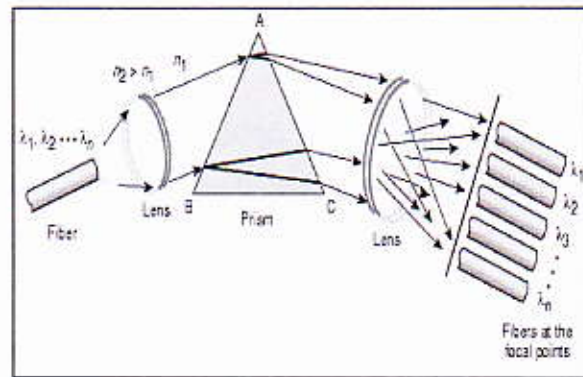
En la salida de la luz cada longitud de onda es separada de la siguiente por un ángulo. Una lente centra cada longitud de onda en el punto donde es necesario para entrar en la fibra. Los mismos componentes deben utilizarse en reversa para multiplexar diferentes longitudes de onda en una sola fibra óptica.

Otras tecnologías son basadas sobre principios de refracción y de interferencia óptica.

Cuando una fuente de luz poli-cromática impacta sobre una rejilla de difracción (ver la figura 54) cada longitud de onda es difractada a un diferente ángulo, y por lo tanto a un diferente punto en el espacio.

Usando un lente se enfoca cada longitud de onda dentro de una fibra óptica.

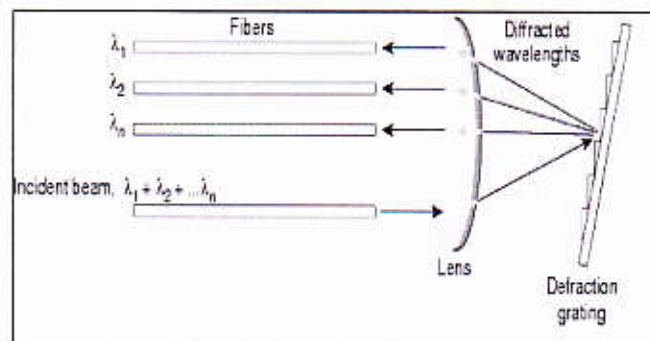
Figura 53. Técnicas de Multiplexión



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Optical components, p.160.

Una rejilla de longitud de onda (*Arrayed waveguide gratings*) está basada en los principios de difracción. Al dispositivo AWG, algunas veces es llamado ruteador óptico guía de onda.

Figura 54. Principios de refracción



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Optical components, p.161.



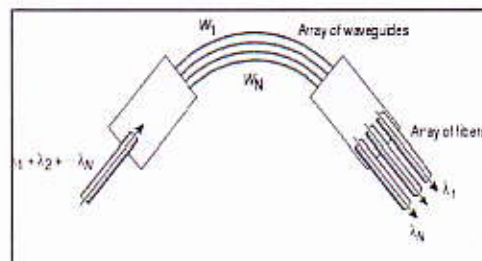
Consiste en un arreglo de canales curvos de guía de onda con una diferencia fija en lo largo del trayecto entre canales adyacentes (ver la figura 55).

Las guías de onda están conectadas con cavidades, donde una variedad de fibras se acoplan. Cuando la luz entra a la cavidad de entrada, ésta es difractada y entra en el arreglo de longitudes de onda.

Entonces la diferencia de longitud óptica de cada guía de onda, introduce retardos de fase en la salida de la cavidad, donde un arreglo de fibras es acoplado.

El resultado del proceso en diferentes longitudes tiene injerencia máxima en distintos lugares. Que corresponden a los puertos de salida.

Figura 55. Principios de difracción



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Interferómetro Mach-Zehnder p.161.

Una tecnología diferente usa filtros de interferencia en dispositivos llamados filtros de película delgada o filtros de interferencia multicapa. Cada posición de los filtros consiste de una delgada película, en la trayectoria óptica. Longitudes de onda pueden ser ordenadas en la salida (demultiplexadas). La propiedad de cada filtro es tal que es transmitida una longitud de onda y

reflectadas otras. Mediante estos dispositivos en cascada muchas longitudes de onda pueden ser demultiplexadas.

### 3.2.2.1. Demultiplexor *Mach Zehnder*

Los dispositivos *Mach-Zehnder* (MZ) están basados en la interferencia entre dos haces de luz con un recorrido distinto  $n \Delta L$  entre ambos brazos. El interferómetro consiste de dos fibras con diferentes trayectorias con acoples de -3dB de diferencia. O pueden ser preferentemente construidas preferentemente con dos guías de onda y acopladores en un chip óptico.

La función de longitud de onda que son transmitidas por cada dispositivo son periódicas, 90 grados fuera de fase una respecto de la otra sobre dos ramas de la salida del acople.

En los dos primeros chips de la figura 56, cuando la diferencia de longitud entre los dos trayectos es  $\Delta L$ , el índice es  $n$ , la función de transmisión es:

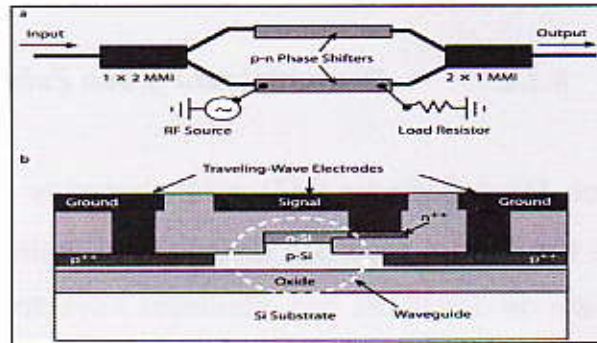
$$T(\lambda) = \cos^2(\pi n \Delta L / \lambda)$$

Se tiene un filtro periódico en frecuencia  $\nu$ :

$$T(\nu) = \cos^2(\pi \nu \tau)$$

Donde  $\tau$  es la diferencia de tiempo entre los dos brazos  $n \Delta L / c$ .

Figura 56. Interferómetro *Mach-Zehnder*



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Interferómetro Mach-Zehnder, p.164.

A medida que se tengan filtros pasa bandas angostas, el interferómetro MZ con recorridos ópticos, se podrá tener  $n \Delta L, 2 n \Delta L, 4 n \Delta L, \dots, M n \Delta L$ . Para M estados se puede aislar una canal entre N canales con  $N=2^M-1$  canales equidistantes, con un espacio  $\Delta v$ .

La función de transmisión es:

$$T(f) = [(\sin(\pi v n \Delta L \Delta v)) / (N \sin(N \pi v n \Delta \Delta v))]^2$$

Conforme el número de etapas incrementa la función de transmisión, se aproxima a la función de un filtro pasa bajos (FB). Para demultiplexar simultáneamente los N canales, el demultiplexor requiere  $(2^M-1)$  unidades MZ. Por lo tanto el dispositivo generalmente se usa con pocos canales, o como filtros sintonizables. Los interferómetros MZ se componen de sustrato de silicio junto a otros componentes, una forma para lograr la integración es combinar la llamada hidrólisis y la deposición de fotolitografía seguida de grabado de ion. Los filtros AWG y WGR son del tipo *Mach-Zehnder*.

### 3.2.2.2. Transponder

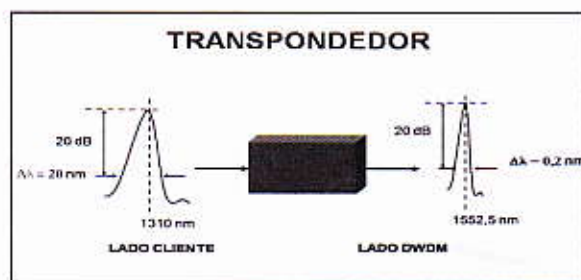
*Transpondedor* es una interfaz clave en sistemas *DWDM*. Dentro de un sistema *DWDM*, un transpondedor convierte la señal óptica del equipo terminal en señal eléctrica y desempeña la función 3R ver figura 57.

- *Re – timing*
- *Re – shaping*
- *Re – generation*

Son específicos para cada velocidad (STM-16, STM-64)

Esta señal eléctrica es, por consiguiente, usada para dirigir un láser *WDM*. Cada transpondedor dentro de un sistema *WDM*, convierte está señal "cliente" en una longitud de onda levemente diferente. Las longitudes de onda provenientes desde todos los transpondedores de un sistema son entonces multiplexadas ópticamente.

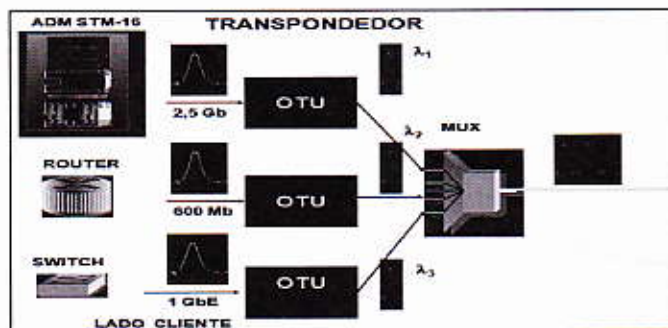
Figura 57. *Transponder*



Fuente: SMATIOS V. Kartalopoulos. Interferómetro Mach-Zehnder, p.162.

En la dirección del receptor se efectúa el proceso inverso. Las longitudes de onda individuales son filtradas desde la fibra multiplexada y alimentan a un transpondedor individual, el cual convierte la señal óptica en eléctrica y conduce una interfaz estándar hacia el cliente.

Figura 58. **Aplicación *transponder***



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Interferómetro Mach-Zehnder, p.163.

### 3.2.2.3. La función de un transpondedor

Diseños futuros incluyen interfaces pasivas, las cuales aceptan los estándares de luz de la ITU directamente de un switch o router incluido, con una interfaz óptica. La operación de un sistema basado en transpondedores se puede resumir en los siguientes ítems:

- Adapta la señal cliente a la grilla de frecuencias G 694.1 del ITU
- Disminuye el ancho espectral
- Mejora la tolerancia a la dispersión cromática
- Efectúa corrección de errores (FEC)
- En recepción efectúa regeneración 3R

El transpondedor acepta entradas en la forma estándar de láser mono-modo o multi-modo. La entrada puede llegar desde diferentes medios físicos, de distintos protocolos y tipos de tráfico. La longitud de onda de cada señal de entrada es identificada a una longitud de onda *DWDM*.

Las longitudes de onda *DWDM* provenientes del transpondedor son multiplexadas dentro de una sola señal óptica y lanzadas dentro de la fibra.

El sistema puede e incluye la habilidad de aceptar señales ópticas directas para ser multiplexadas; tales señales podrían llegar, por ejemplo, de un nodo satelital. Un post-amplificador amplifica la potencia de la señal óptica, del mismo modo que emigra el sistema (opcional).

#### **3.2.2.4. Cross conector óptico OXC**

Las *cross* conexiones son una clave fundamental en la mayoría de sistemas de comunicación, en los sistemas electrónicos, los *cross*-conectores electrónicos son fabricados masivamente con circuitos integrados y es capaz de interconectar miles de entradas con miles de salidas.

La misma función de interconexión es requerida en muchos sistemas ópticos de comunicación.

La *cross* conexión óptica (canal), puede lograrse en dos maneras; la primera, convertir los datos ópticos en datos electrónicos, usando tecnología de *cross* conexión, y viceversa convertir datos electrónicos en datos ópticos, esto es conocido como enfoque híbrido. La segunda forma, canales de *cross* conexión óptica dominan directamente en la fotónica. Esto se conoce como conmutación total óptica.

El enfoque híbrido es actualmente más popular por que en este existe experiencia en diseño de gran ancho de banda multicanal ( $N \times N$ ). La conmutación total óptica es usada en alto-ancho de banda, de estos se fabrican en poco canales de *cross* conexión.  $N$  en este caso va de 2 hasta quizá 32, pero las *cross* conexiones con  $N$  en un rango por encima de 1 000 están en experimentación y en fase de planificación.

### 3.2.2.5. Modelo óptico de *cross* conexión

Los dispositivos de *cross*-conexión son modelados de varios puertos, pudiendo tener diferentes números de puertos de entrada y salida, con una tabla que define la conectividad entre entradas y una o más salidas. Matemáticamente este modelo podría representarse por la relación de una matriz.

La figura 59 ilustra el modelo y matriz de un dispositivo de *cross* conexión, donde  $L_k$  es la amplitud de luz como entrada al puerto  $K$ ,  $O_l$  es la amplitud de la luz en el puerto de salida  $L$  y  $[T_{ij}]$  es la matriz de transmisión. En general los términos de transmisión  $T_{ij}$  son funciones de las características de absorción y dispersión de la ruta de transmisión. Idealmente, los términos  $T_{ij}$  son 1 ó 0, significando conexión o no conexión, respectivamente, con cero pérdidas de conectividad y cero dispersiones.

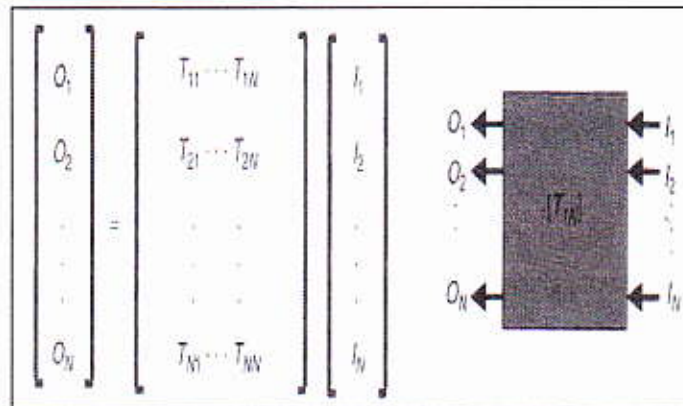
La *cross* conexión óptica total, son basadas en los siguientes tres métodos:

- Conmutación de espacio libre [red de ruteo por guía de onda, *Mach zehnder* interferómetro]
- Dispositivos de estado sólido (acoplador electro óptico)

- Dispositivos basados en espejos electromecánicos

Otros métodos son basados en las propiedades de polarización del cristal líquido y otras propiedades de materiales. La conmutación óptica basada en tecnología de cristal líquido ofrece alto aislamiento, bajo inserción de pérdida, y por encima de 40 canales.

Figura 59. **Matriz cross conexión**



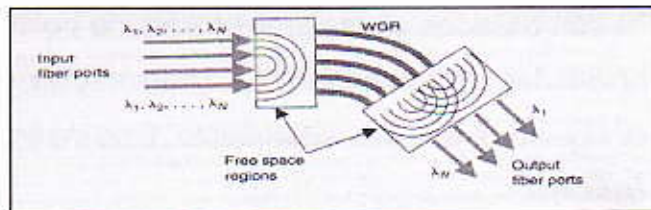
Fuente: SMATIOS V, Kartalopulos. Óptic components, p.142.

### 3.2.2.6. Conmutación óptica de espacio libre

Entre los más prometedores conmutadores, con muchos puertos de entrada es el generalizado *Mach-Zehnder* WGR, una determinada longitud de onda en cualquier puerto aparece en un determinado puerto de salida especificada (ver figura 60). Así se tiene un mapeo de conexión de entrada a salida que es un conmutador. Este tipo de conmutador óptico de espacio libre es también conocido como *Wavelength routing*.



Figura 60. **WGR**



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Optical components, p.143.

En otro tipo de conmutadores ópticos de espacio libre, un rayo de luz es dirigido mecánicamente a una de muchas fibras. En una matriz de ases enfrenta una matriz de fibras, por ejemplo, uno de los ases de la fuente y la recepción de la fibra y una fibra de recepción tienen que alinearse hasta que queden cara contra cara, para lograr comunicación en el espacio. Tras la reorientación de la fuente (por un pequeño grado) frente a la cara de la otra fibra a través del espacio, la conmutación se realiza.

### 3.2.2.7. **Cross conectores de estado sólido**

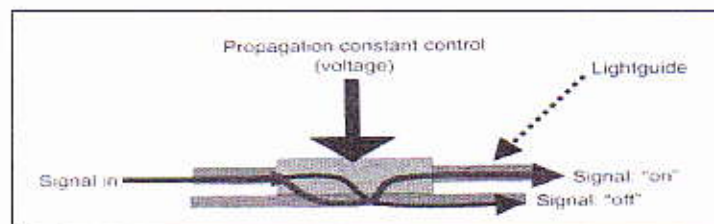
Los dispositivos de *cross* conexión de estado sólido son semiconductores de acople bidireccional. Estos dispositivos pueden selectivamente cambiar una de sus propiedades ópticas en el camino a la aplicación de una señal de control (figura 61).

Las propiedades ópticas pueden ser, polarización, propagación constante, absorción, o índice de refracción. Dependiendo del tipo de material, las propiedades ópticas pueden cambiar sobre aplicación de calor, luz, presión mecánica, corriente eléctrica o sobre campos eléctricos (voltaje).

Por ejemplo, la inyección de corriente controla el índice de refracción de un semiconductor, mientras que la aplicación de campo eléctrico controla el índice de refracción del cristal fotométrico LiNbO<sub>3</sub>. La aplicación de calor puede controlar el índice de refracción. El tipo de material, el mecanismo de control, y la propiedad controlada impacta la velocidad de conmutación del dispositivo así como el número de puertos del conmutador.

Por ejemplo, el conmutador hecho con cristal LiNbO<sub>3</sub> exhiben conmutaciones de velocidades en el orden de nanosegundos, mientras que los que están hechos con SiO<sub>2</sub> o Si exhiben velocidades por debajo de 1 ms.

Figura 61. **Cross conector estado solido**



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Optical components, p.143.

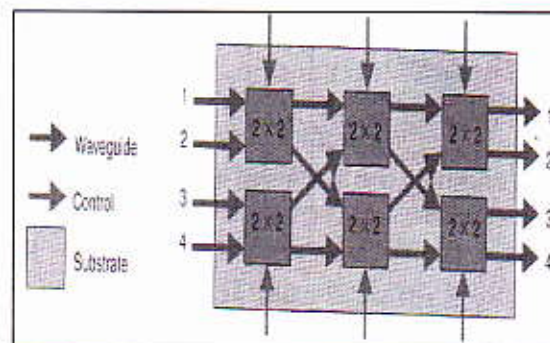
Un conmutador multi-puerto, también conocido como acoplador estrella, es construido empleando varios acopladores de 2X2 direccionales. Por ejemplo, para construir a uno de 4X4 conmutadores, seis 2X2 acopladores direccionales son integrados sobre el mismo sustrato ver figura 62.

Debe ser notado que a pérdida total de potencia de cada entrada-salida de conectividad, depende del número de acopladores en el recorrido. En el arreglo 4x4, cada recorrido contiene tres acopladores.

Aunque el número de puertos pueden alargarse (ej. 128 X 128), las pérdidas son acumulativas, y así prácticamente los conmutadores tienen una tasa límite de números de puertos. Por ejemplo 16 X 16 o tal vez 32 X 32. Las *cross* conexiones ópticas de estado sólido, son caracterizadas por un número de parámetros. En los siguientes ejemplos, se describe entre paréntesis la referencia para un típico dispositivo SiO<sub>2</sub> .

- Conmutador de matriz (2X2,4X4, etc.)
- Inserción de pérdida (Típicamente 1 dB)
- Insulación (típicamente 35dB)
- Cross-talk (típicamente -40dB)
- Velocidad de conmutación (en el rango de mili o nano segundos)
- Polarización-dependiente de pérdida( <1dB)
- Plano espectral (típicamente +/- 1dB)
- Temperatura de operación (0-70°C)
- Voltaje de operación (típicamente +5v)
- Número de entradas (ej 2X2)

Figura 62. **Arreglo 4X4 estado sólido**



Fuente: SMATIOS V, Kartalopulos. Optical components, p.145.

### 3.2.3. Micro-sistema electromecánico *MEMS*

Para el diseño del equipo de *cross* conexión óptica se ha empleado nanotecnología en la micro-máquina con diminutos espejos sobre un sustrato que se usará para causar un cambio la reflexión del haz de luz.

Esta tecnología se conoce como sistemas micro electromecánicos *MEMS*, utiliza un producto de procesamiento de semiconductores, que es una tecnología aprobada, la nueva tecnología se espera que llegue a ser tan simple como una estampa de sello de hule para crear nano moldes, nano partes y nano máquinas que puedan usarse en telecomunicaciones y otros campos semejantes, mediante el depósito de grabado y litografía diminuta (más pequeño que un cabello humano) se micro ensamblaran sobre sustrato.

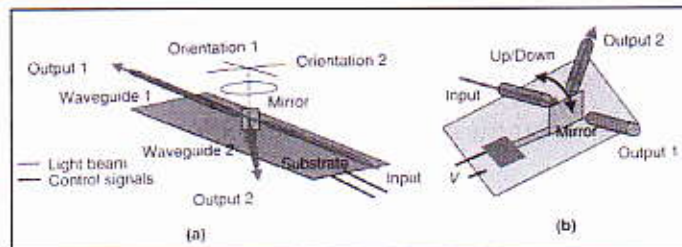
Estas máquinas son un arte de diseño, con unidades lineales de pasos, poleas, pinzas, flexión de vigas, tornillos, motores eléctricos, placas pulidas o espejos y así sucesivamente. Por lo tanto un plato altamente pulido (de oro) o un espejos está conectado con un actuador eléctrico verticalmente, este se coloca en el espacio de intersección de tres guías de onda (fibras ópticas).

Este arreglo comprende un actuador óptico mediante el cual el espejo puede dejar pasar un haz óptico a través de él o reflejar en otra dirección. También el espejo se puede mover, uno de los muchos métodos dependiendo de la tecnología de fabricación, por ejemplo, puede ser conectado de modo que girando el espejo entre en dos posiciones y un haz se dirija a una de dos posiciones (figura 63).

Puede ser tirado hacia abajo (cuando se le aplica voltaje) y puede ser tirado hacia arriba (cuando no se le aplique voltaje) (figura 63), similarmente,

puede ser empujado o jalado hacia la fibra óptica cambiando la dirección del haz de luz.

Figura 63. **Microsistemas electrónicos**

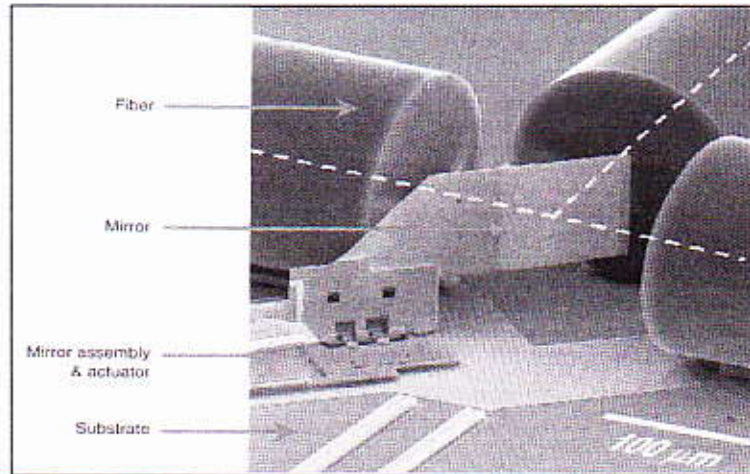


Fuente: Smatios V, Kartalopoulos. Optical components, p.146.

La figura 64 es una fotografía milimétrica de una *MEMS* (del tipo de figura 63). En otras estructuras el espejo en un actuador electroestático y por lo tanto puede ser inclinado en direcciones específicas, basadas en el valor de la tensión aplicada (en el orden de 100 y 200 V). Con referencia a la (figura 63), cuando el espejo se encuentra en una orientación, permite que el haz de luz se acople a una guía de onda 1 y la salida 1, y en la otra orientación permite acoplar la guía de onda dos a la salida dos.

La tecnología *MEMS* aunque compleja, como bien se sabe utiliza circuitos integrados por procesamiento de lotes por lo que muchos dispositivos *MEMS* pueden ser fabricados en el mismo sello a modo de reducir el coste por sistema, las *MEMS* ha demostrado tener una baja pérdida de conectividad (<1 dB), la relación *on-off* de contraste, es mejor a 60dB, baja potencia de actuación (2 mw), diseño compacto , sin embargo la tecnología *MEMS* es más lenta que aproximadamente 10 ms, con LinBo3 actuadores de estado sólido.

Figura 64. **MEMS**



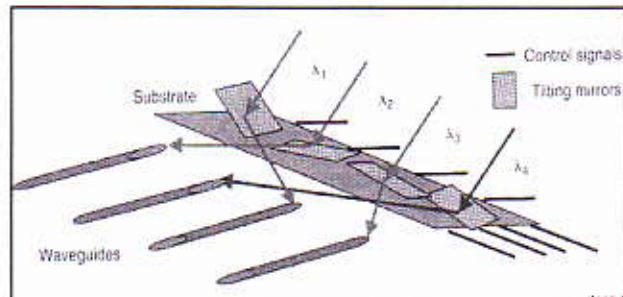
Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Optical components, p.146.

### 3.2.3.1. **Arreglo de espejos con actuadores electromecánicos**

La tecnología *MEMS* se ha ampliado para integrar a muchos espejos en el mismo chip, dispuestos en una matriz. Sobre la base de esta tecnología, cada espejo, conectado con un micro actuador electromecánico, puede ser independiente, de modo que al reflejar un haz de luz incidente se refleja en la dirección deseada.

Este es un arreglo de  $N$  espejos, pueden direccionarse  $N$  entradas de señal ópticas que incidan sobre ellos para  $N$  posiciones en el espacio, donde las salidas de guía de onda son posicionadas. El concepto de cuatro espejos en un arreglo es mostrado en la (figura 65) y en una fotografía ampliada en la figura 66. Claramente esta técnica podrá ser ampliada a arreglos de  $N \times N$  matriz de espejos. Donde  $N$  podría ser potencialmente 1 000.

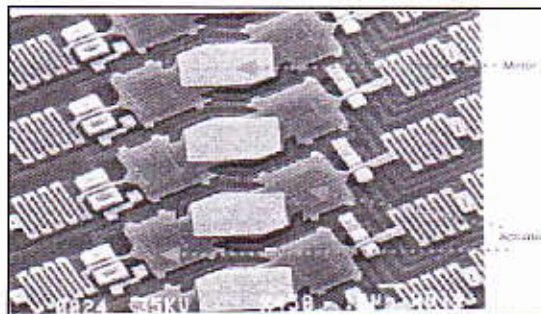
Figura 65. Arreglo de espejos



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Optical components, p. 147.

La tecnología *MEMS* promete baja pérdida de conectividad, diseño compacto y grandes matrices de interconexión. Sin embargo, la precisión de inclinación de los espejos es muy crítica, sus orientaciones deben ser siempre seguras y el ángulo exacto; entre menor desviación, el ángulo de posición puede incrementar en ambas señales ópticas, pérdidas y *cross-talk*. Además cuando un espejo cambia de posición, la reflexión del rayo de luz atraviesa el campo óptico de otra salida de fibra y por tanto debe tenerse precaución para evitar el rayo reflejado.

Figura 66. Macro fotografía



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Optical components, p.146.

### 3.2.4. Espectro óptico de filtros y rejillas

La función de un filtro electrónico o pasivo (LRC) es para reconocer una banda estrecha de frecuencias eléctricas de una multiplicidad y pasarlo o rechazarlo. En el espectro de los filtros ópticos funcionan de la misma manera. Y ellos son elemento clave en los sistemas de transmisión ópticos. Los filtros de espectro óptico están basados en la interferencia, difracción o absorción y estos son usados en filtros fijos y en sintonizables.

En esta sección se examinarán los filtros más utilizados en la transmisión de espectro óptico.

- El interferómetro *Fabry-Perrot*
- El reflector de *Bragg*

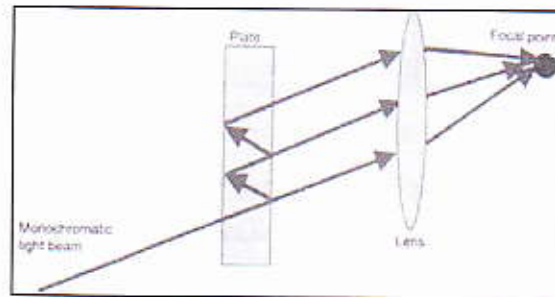
#### 3.2.4.1. Filtro *Fabry-Perrot*

El interferómetro *Fabry-Perrot* está basado en la interferencia de múltiple reflexión de un haz de luz por dos superficies de una placa delgada (figura 67). La condición de interferencia máxima para cada longitud de onda es  $2d \sin \phi = n\lambda$ , donde  $n$  es un entero y  $d$  es un espesor de placa. Claramente, esta condición es satisfactoria para un número de longitudes de onda que serán múltiplos de  $2\pi$ , y en los máximos puntos de intensidad  $I_{max} = E^2$ .

Si la efectividad de la superficie plana es  $R$ , entonces la intensidad entre máxima está entre  $I = (1+R)^2 / (1+R)^2$ . Como la efectividad de la superficie aumenta, la intensidad entre ambas decrece, así aumentando la nitidez del interferómetro (figura 67).

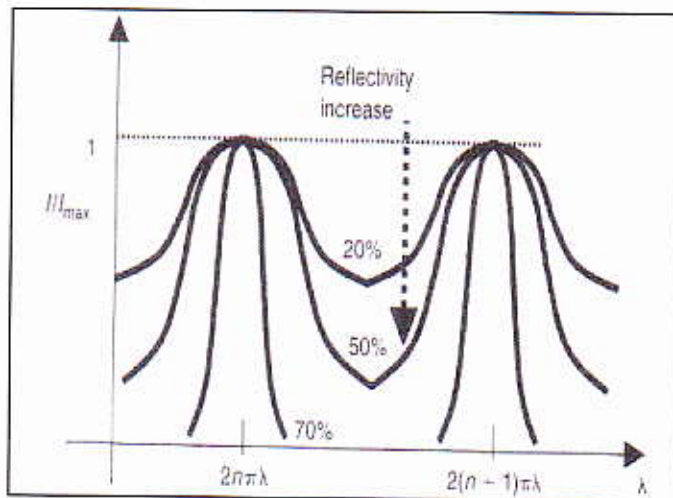


Figura 67. **Fabry Perot**



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Optical spectral filters and gratings, p.72.

Figura 68. **Incremento de reflectancia**



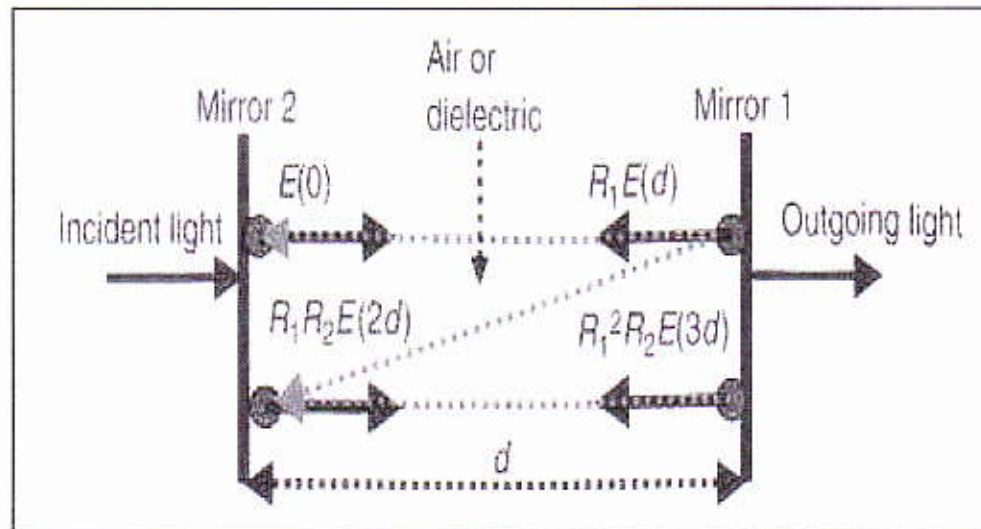
Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Optical spectral filters and gratings, p.72.

### 3.2.4.2. **Resonador Fabry-Perot**

El resonador *Fabry-perot* es un arreglo de dos platos paralelos que reflejan luz de ida y vuelta. Para examinar como es esta función, se puede observar la figura 69.

- Dejar dos reflectores planos semitransparentes (medio - espejos) separados por  $d$
- Tener esto con un medio de atenuación  $\alpha$  y ganancia  $g$
- Dejar que la potencia de  $R_1$  y  $R_2$ , este dada por los reflectores 1 y 2
- Dejar un pulso de fotones  $E(t,x)$  entre al reflector 2,  $E(t=0, X=0)$ .

Figura 69. **Resonador Fabry Perot**



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Optical spectral filters and gratings, p.73.

$$\text{Entonces; } E(t,x) = A \exp[-(\alpha s X/2)] [j(\omega t - \beta x)]$$

Donde  $g$  es la intensidad del coeficiente de ganancia, el primer exponente es la primera exponente, y la segunda es la componente de fase. Para un constante estado de oscilación, la amplitud del pulso de luz inicial ( $t=0, x=0$ ), será igual a la amplitud, luego este será reflejado de ida y vuelta.

Esto se basa en dos condiciones; la condición de amplitud,

$$R_1 R_2 A \exp \{[(g - \alpha s)d]\} = A$$

y la condición de fase

$$\exp(-j2\beta d) = 1$$

La condición de fase se satisface sólo si,

$$2\beta d = 2\pi m; \quad \beta = (2\pi n / \lambda)$$

Donde  $m$  es un entero,  $n$  es el índice de refracción,  $\beta$  es la constante de propagación, y  $\lambda$  es la longitud de onda en el espacio libre. El valor de  $\lambda$  que satisface la relación,

$$\lambda = 2dn/m$$

Proporciona la longitud de onda resonante o modo del resonador *Fabry-Perot*.  
Por ejemplo:

Para  $m=1$  y  $n=1$ , entonces  $\lambda=2d$ ; para  $m=2$  y  $n=1$ , entonces,  $\lambda=d$ .

El espaciado de frecuencias  $\Delta f$  entre modo consecutivo (longitudinal) es obtenido por:

$$m - (m-1) = (2dn/c)f_m - (2dn/c)f_{m-1}$$

o

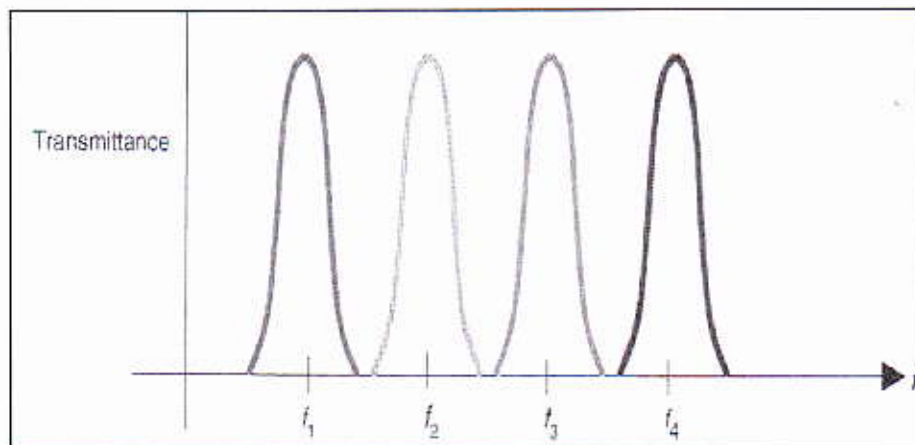
$$1 = (2dn/c)\Delta f,$$

Para lo cual una derivada,

$$\Delta f = c/2dn \text{ y } \Delta \lambda = \lambda^2/2dn$$

La anterior relación indica que una multiplicidad de frecuencias (longitudes de onda) es transmitida a través del resonador *Fabry-Perot*. Un perfil típico de transmisión es mostrado en la figura 70.

Figura 70. **Transmitancia**



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Optical spectral filters and gratings, p.74.

### 3.2.4.3. Red de *Bragg* en fibra

Una rejilla *Bragg* es un arreglo de placas semi-refractivas. Para examinar cómo funciona este arreglo se considera la figura 71.

- Se tiene N (periódicos) placas paralelas semi-reflectoras separadas por d (espacio Bragg).

- Se tiene un medio con atenuación  $\alpha$ , y ganancia  $g$ ;
- Se tiene  $R$  como la potencia del coeficiente de reflexión de tal manera que  $R \ll 1$ , y  $T$  el coeficiente de potencia de transmisión, de tal manera que  $T \approx 1$ .
- Permitiendo un pulso de fotones  $E(t,x)$  entrar a través del espejo 1,  $E(t=0,x=0)$ . Entonces:

$$E(t,x) = A \exp \left\{ -\alpha x / 2 + j(\omega t - \beta x) \right\},$$

Donde  $\alpha$  es la intensidad de atenuación,  $\beta$  es la propagación constante y  $\omega$  es la frecuencia de la luz. La pregunta clave en este arreglo es ¿Cuáles son las condiciones para una fuerte reflexión de una frecuencia en particular?

Entonces el primer pulso de luz en el primer espejo será  $E_{in}$ , la parte reflejada de  $E_{in}$  para el primer espejo semitransparente es  $E_{r1}(0) = E_{in}(0) R$  y la parte transmitida  $E_{t1}(0) = E_{in}(0) T$ .  $R$  y  $T$  son coeficientes de reflexión y transmisión respectivamente.

La porción transmitida  $E_{t1}(0)$  es particularmente reflejada ( $E_{r2}(d) = E_{t1}(0) R \exp(-j\beta d)$ ) y parcialmente ( $E_{t2}(d) = E_{t1}(0) T \exp(-j\beta d)$ ) para el segundo espejo etc.

La parte reflejada por el  $N$  enésimo espejo es;

$$E_{RN}[(N-1)d] = E_{T(N-1)}[(N-2)d] R \exp(-j\beta d)$$

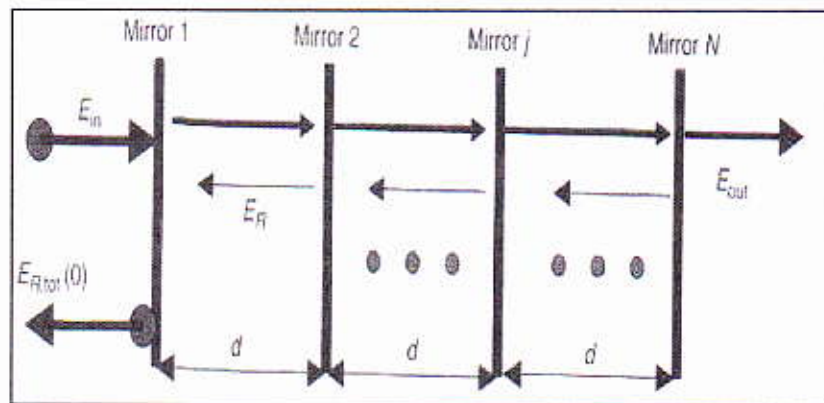
Y la parte transmitida es:

$$E_{T(N)}[(N-1)d] = E_{T(N-1)}[(N-2)d]Te^{-j\beta d}$$

La parte reflejada por el N-ésimo espejo llega de nuevo a la primera réplica, tomando en cuenta la propagación constante, queda así:

$$E_{R(N)}[(N)d] = E_{T(N-1)}[(N-1)d]R^{(N-1)}e^{(N-1)j\beta d}$$

Figura 71. Red de Bragg



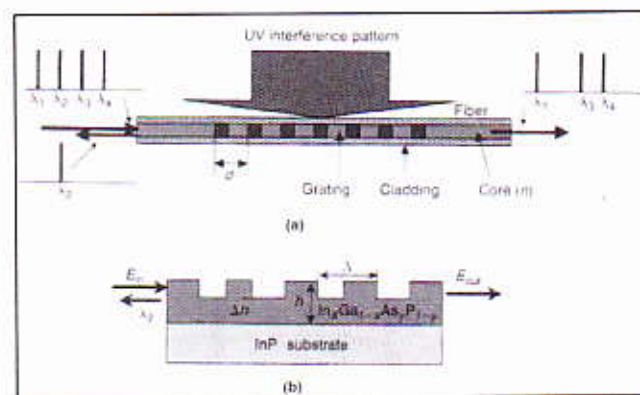
Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Optical spectral filters and gratings, p.76.

#### 3.2.4.4. Fibra Bragg

Una red de fibra Bragg (FBG) consiste de una fibra segmentada cuyo índice de refracción varía periódicamente a lo largo de la fibra. Variaciones del índice de refracción constituyen discontinuidades que emulan una estructura Bragg, unas variaciones periódicas del índice de refracción es formado por exposición al núcleo de silicato de germanio a un intenso patrón óptico de luz ultravioleta (UV) de igual período que la periodicidad del la rejilla a formarse.

Cuando la fibra es expuesta al intenso patrón UV, defectos estructurales son formados y así una permanente variación del índice de refracción tiene el mismo patrón que el rayo ultravioleta. La figura 72, muestra un FBG usando el método UV y en la figura 72 ilustra monolíticamente hecho un FBG con corrugado  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{(1-y)}$  sobre un substrato de InP. Una fibra *Bragg Grating* incorporada en línea con un transmisor de fibra es llamado un *in fiber Bragg grating*.

Figura 72. Fibra Bragg



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Optical spectral filters and gratings, p.78.

El patrón tiene una periodicidad que depende de la banda de la longitud de onda en que se desee designar la FBG para operar. Para la red cercana de infrarrojo la longitud de onda de donde se utiliza  $1,55 \mu\text{m}$ , es fabricada con periodicidad  $d$ , de  $1-10 \mu\text{m}$ . La rejilla de relatividad,  $R$ , para un determinado modo al centro de la longitud de onda está dada por:

$$R = \tanh^2[\pi L \Delta n \eta(V) / \lambda \cdot b],$$

Donde  $L$ , es la longitud de la rejilla,  $\Delta n$  es la magnitud de la índice de perturbación, y  $\eta(V)$  una función de parámetro de la fibra y  $V$  representa la fracción de la intensidad de modo integrado contenido en el núcleo.

Esta rejilla asume con polarización mono modo manteniendo la fibra con un núcleo circular. Sin embargo, cuando el núcleo es (imperfectamente) elíptico, la rejilla soporta dos modos de propagación, y cada eje de polarización tiene una diferente propagación constante.

### **3.3. Clasificación de los amplificadores de fibra óptica**

Los amplificadores ópticos de fibra (OFAs) son clasificados en amplificadores electrónicos, sistemas electrónicos y sistemas sin cables como amplificador de potencia, preamplificadores y amplificadores de línea.

Los amplificadores de fibra óptica deben aplicarse correctamente para minimizar los varios factores que pueden afectar a la integridad del canal y la señal transmitida en respuesta a la no linealidad, la polarización y otros efectos. ITU-T recomienda parámetros específicos, así como aplicaciones de aplicadores de fibra óptica en G.662 y G.663.

#### **3.3.1. Amplificadores de potencia**

Un OFA es capaz de incrementar la potencia óptica de la fuente de modulación fotónica es llamado un amplificador de potencia. Un amplificador óptico de potencia actúa como un *booster*. Se coloca inmediatamente después de la fuente y por lo tanto también puede ser integrada con la fuente. Este



recibe una gran señal (de la fuente laser) con una gran relación, señal a ruido y aumenta los niveles de potencia de -10 dB o más.

### **3.3.2. Preamplificadores**

Un OFA con muy bajo ruido es capaz de incrementar una señal con alta atenuación a un nivel fiable para un detector óptico, éste es llamado como preamplificador óptico. Un preamplificador se coloca directamente antes del detector y quizá puede estar integrado con el detector.

### **3.3.3. Amplificador de línea**

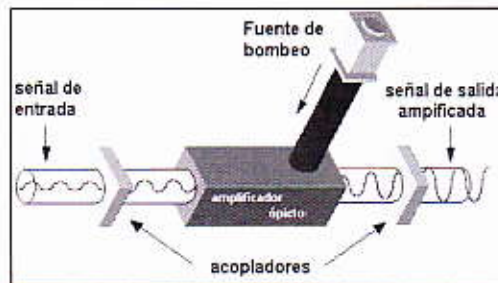
Un OFA con bajo ruido, es capaz de amplificar una señal atenuada, para que pueda viajar un tramo de fibra extra, se denomina amplificador lineal óptico. Por lo tanto el amplificador debe tener gran ganancia y muy bajo ruido, y no debe agregar ruido a la señal que ya se han recibido atenuadas.

El fundamento de un amplificador óptico es el proceso de emisión estimulada al igual que en un láser. Su estructura es similar a la de un láser salvo que no posee una realimentación para evitar que el dispositivo oscile, de forma que puede elevar el nivel de potencia de la señal pero no generar una señal óptica coherente. En la figura 73 se muestra un esquema del funcionamiento de un amplificador básico.

Una fuente de bombeo inyecta una energía en la zona activa del amplificador. Esta energía es absorbida por los electrones que incrementan sus niveles de energía, produciéndose la inversión de población. Al ser alcanzados estos electrones por los fotones de la señal óptica de entrada caen a unos

niveles energéticos más bajos, dando lugar a un nuevo fotón, esto es el proceso de emisión estimulada, produciéndose así la amplificación de la señal.

Figura 73. **Funcionamiento de un amplificador óptico**



Fuente: SMATIOS V, Kartalopulos. Optical componentes, p.170.

La amplificación se produce dentro de un rango de frecuencias que depende del material, así como su estructura.

Tabla V. **Estandarización de amplificadores**

<b>Estandarización Amplificadores</b>	
In ( amplificadores de línea)	G 622
Amplificador de refuerzo	G 622
Amplificador de fibra dopada Erbium	G 622
Dispositivo de amplificador óptico	G 622
Subsistema amplificador óptico	G 622
Amplificador Óptico	G.622
Amplificador óptico de fibra	G 622
Retorno de pérdida óptica	G.957
Receptor óptico amplificador	G.622
Preamplificador	G 622
Amplificador de bombeo remoto	G.973

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.4. Amplificador de fibra dopado de *Erbium* (EDFA)

El EDFA es un atractivo amplificador de fibra óptica en los sistemas de comunicación óptica, y particularmente en los sistemas DWDM.

El EDFA es un pequeño segmento de fibra que a pocos metros está dopado fuertemente con elemento de tierras raras *erbium* (también co-dopadas con Al y Ge). Los iones del *Erbium* pueden ser excitados por las frecuencias ópticas- 514, 532, 667, 800, 980, y 1 480 nm.

El EDFA es el amplificador de fibra dopada más empleado en la actualidad, ya que es posible amplificar señales en la tercera ventana (1 550 nm). El motivo puede deducirse del diagrama de niveles del erbio. Se puede ver en el diagrama de niveles de energía del erbio que la transición entre los niveles 4I13/2 y 4I15/2 corresponde a una longitud de onda comprendida entre 1 530 nm y 1 560 nm aproximadamente.

Luego al provocar una inversión de población entre dichos niveles se puede amplificar señales en la tercera ventana. El primer nivel excitado, 4I13/2, desde el que las frecuencias de transición se corresponden con la tercera ventana, tiene un tiempo de vida medio de unos 10 ms, mientras que en los dos superiores es de 0,001 ms, por lo que el nivel 4I13/2 es un estado meta estable.

Por lo tanto todo ión que llegue a estos niveles por medio del bombeo acabará cayendo al nivel 4I13/2 por emisión espontánea, y a su vez cara al nivel fundamental por emisión estimulada, produciéndose así la amplificación.

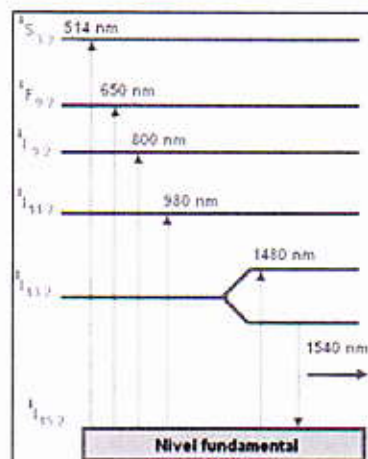
Al dopar con iones de erbio el núcleo de una fibra óptica se provoca un ensanchamiento de las bandas de transición. Esto a su vez provoca un

ensanchamiento considerable del rango de longitudes de onda que pueden ser amplificadas. Este efecto puede mejorarse añadiendo al núcleo, aluminio y óxido de germanio. Las dos longitudes de onda de bombeo más adecuadas son 1 480 nm (mediante un diodo láser de InGaAsP) y 980 nm (mediante un diodo láser de InGaAs).

El empleo de una u otra longitud de onda depende de ciertas características del proceso de absorción en cada uno de estos niveles, derivadas de los diferentes tipos de ruido al que pueden originarse, de la disponibilidad de las fuentes de bombeo o de la saturación de ganancia. El bombeo a 1 480 nm supone un amplificador más ruidoso pero más inmune a la saturación de ganancia.

Mientras que el bombeo a 980 nm proporciona un amplificador con prestaciones de ruido excelentes pero es más proclive a la saturación de ganancia. En ambos casos es posible obtener ganancias entre 30 y 50 dB.

Figura 74. Diagrama de niveles energéticos del Erbio



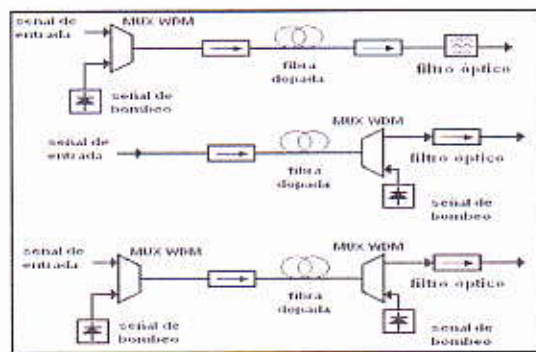
Fuente: SMATIOS V, Kartalopulos. Optical componentes, p.145.

### 3.3.4.1. Configuraciones de bombeo

Los elementos básicos para implementar un *EDFA*, son el medio activo donde se produce la inversión de población.

Formado por un tramo de fibra óptica de  $\text{SiO}_2$  con el núcleo dopado con iones de erbio. La fuente de bombeo óptico a 1 480 ó 980 nm, formada por un láser semiconductor.

Figura 75. Configuraciones de un *EDFA*



Fuente: SMATIOS V, Kartalopulos. Optical componentes, p.171.

En la figura 75 se muestran las configuraciones posibles del *EDFA*. La primera configuración es la más empleada hoy en día. La señal que hay que amplificar y la señal de bombeo se inyectan al *EDFA* combinadas por medio de un acoplador.

El primer aislador se emplea para impedir la propagación hacia fuera del *EDFA* de la emisión espontánea (ruido ASE) que se genera y se propaga en sentido contrario al de la transmisión. El bombeo y la amplificación se realizan en el mismo sentido que la propagación. A la salida se coloca otro aislador que

evita la entrada al *EDFA* y por tanto su amplificación de cualquier señal reflejada. Finalmente se emplea un filtro óptico para filtrar el ruido ASE, generado en el amplificador, que se encuentre fuera de la banda de la señal útil.

La siguiente configuración, se diferencia de la anterior en que la señal de bombeo se inyecta al *EDFA* en sentido contrario a la propagación.

El aislador de la entrada además de cumplir las funciones anteriores, tiene la misión de evitar la propagación de la señal de bombeo fuera del amplificador. La ventaja de esta configuración es permitir ganancias más altas, pero sus características de ruido son peores.

La tercera configuración, es una combinación de las dos anteriores. Consiste en un doble bombeo, por lo que se denomina bombeo dual o bidireccional. La ganancia por tanto puede llegar a duplicarse. Este esquema es muy empleado en la implementación de amplificadores repetidores.

#### **3.3.4.2. Ganancia de un *EDFA***

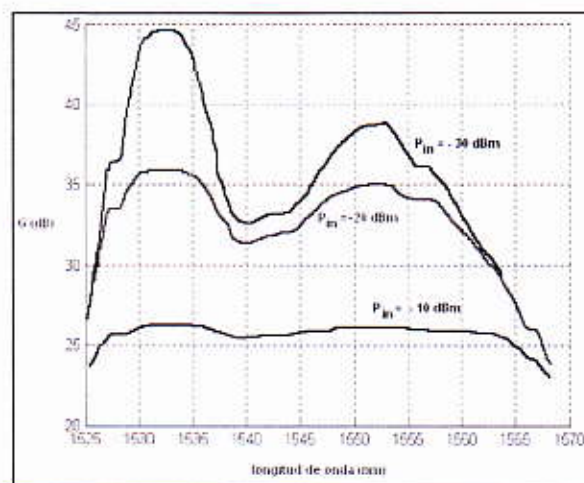
La figura 76 presenta la ganancia de un *EDFA* en función de la longitud de onda para diferentes valores de potencia de entrada, con una señal de bombeo a 1 480 nm.

El *EDFA* no presenta una ganancia uniforme con la longitud de onda. Debido a la saturación según crece la potencia de entrada, la ganancia disminuye hasta llegar a un punto en que se mantiene constante.

El máximo de ganancia se alcanza alrededor de los 1 530-1 535 nm. Como puede verse en la figura 76, a potencias altas la respuesta de la

ganancia en todo el rango de la banda C (1 530-1 565 nm) es bastante plano, lo cual no sucede a potencia de entrada más baja. Esto es un grave inconveniente en los sistemas *WDM*, ya que no todos los canales se amplifican por igual.

Figura 76. Representación de la ganancia de un *EDFA*



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Optical componentes, p.172.

Las características técnicas que hacen del *EDFA* el amplificador más utilizado son:

- Como consecuencia de su geometría cilíndrica sus pérdidas de inserción en las uniones con la fibra óptica son muy reducidas.
- Debido también a su geometría su ganancia es poco sensible a la polarización de la señal.
- El ruido que genera es bajo.
- La saturación de la ganancia no ocasiona distorsión.

- Su principal inconveniente es que sólo opera en la tercera ventana, aunque si existen dispositivos similares pero dopados con otros elementos que pueden operar en otra ventana. Otro problema es que su ganancia no es uniforme para todas las longitudes de onda, aunque esto se solventa trabajando cerca de su saturación, pues la curva de ganancia es más plana.

En el siguiente resumen los parámetros típicos de un amplificador *EDFA* se observa en la tabla VI.

Tabla VI. **Parámetros típicos de un amplificador EDFA**

<b>Longitud de onda de bombeo</b>	<b>1480nm</b>	<b>980 nm</b>
Eficiencia de bombeo (dB/mW)	5	10
Figura de ruido (dB)	5.5	3-4.5
Potencia de salida de saturación (dBm)	20	5
Ganancia (dB)	40	50
Potencia de bombeo (mW)	50-200	44105

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.5. **Amplificador de fibra dopada PDFA**

El fundamento de este tipo de amplificador, es el mismo que el de los *EDFA*, la diferencia es que se emplea praseodimio para dopar el núcleo de la fibra óptica, lo que permite a este dispositivo amplificar en la segunda ventana. La principal desventaja es que la ganancia es menor que con un *EDFA*.



### 3.3.6. Amplificadores de *Raman*

Este amplificador se basa en el efecto *Raman*, *SRS Stimulated Raman Scattering*. Esta no linealidad de las fibras ópticas tiene lugar cuando ésta es atravesada por una radiación monocromática de alta intensidad. Bajo ciertas condiciones, la radiación interactúa con el material dando como resultado la aparición de una nueva longitud de onda, de mayor intensidad que la inicial.

El efecto *Raman* estimulado, en principio es similar a una emisión estimulada, fenómeno en el cual se basan los amplificadores de fibra dopada. En la emisión estimulada, el fotón que interactúa con el medio, provocando la emisión estimulada de otro fotón sigue presente.

En el caso del *Raman* estimulado, después de la interacción entre el fotón y el medio, se genera un nuevo fotón de menor energía (menor frecuencia) y la diferencia de energía se transfiere al material, dando lugar a vibraciones moleculares, desapareciendo el fotón inicial.

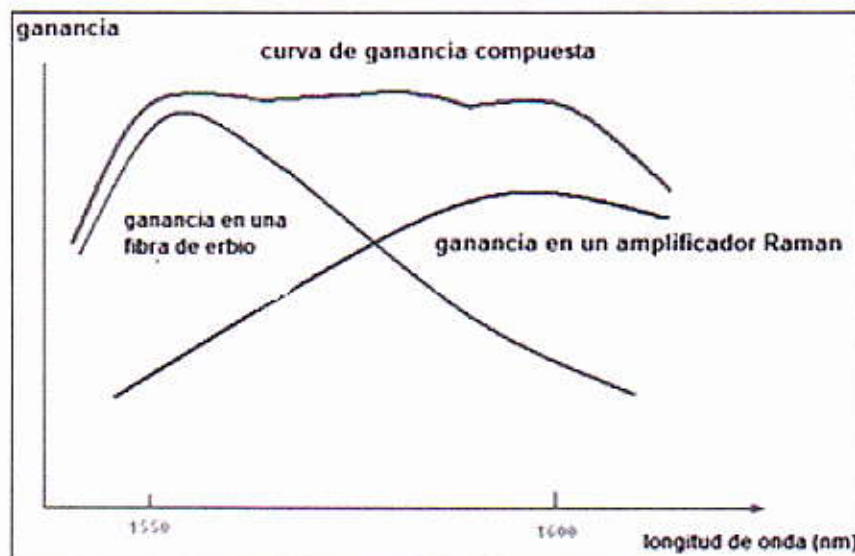
Las frecuencias que se pueden generar dependen las frecuencias características de las moléculas que componen el material. Si al tiempo que pasa por la fibra óptica la señal de bombeo pasa otra señal con una frecuencia característica del material, esta frecuencia será estimulada. En el caso de un material amorfo, como es una fibra óptica, las frecuencias características del material son un todo casi continuo, es decir, no son un conjunto de frecuencias claramente diferenciadas como ocurre con los materiales mono cristalinos.

Gracias a este concepto se obtiene un nuevo método de amplificar una señal óptica. La señal que provoca la amplificación será la propia señal que transmite la información. Además, si por la fibra se transmite más de un canal,

cada uno dará lugar al efecto *Raman* en su propia frecuencia, produciéndose la amplificación, siempre que estas frecuencias estén dentro del rango de frecuencias características del material.

Los principales inconvenientes que presentan estos amplificadores es la necesidad de una alta potencia de bombeo, cercana al vatio. Por el contrario una de sus ventajas es que cubre un margen de longitudes de onda no cubierto por los *EDFA*, por lo que pueden emplearse de forma complementaria. Este hecho queda reflejado en la figura 77, en la que se representa de forma aproximada las zonas de trabajo de cada uno. Como se ve empleando ambos amplificadores se obtiene en el rango comprendido entre los 1 530 y 1 600 nm una curva ganancia prácticamente plana.

Figura 77. **Obtención de una ganancia constante con la longitud de onda**



Fuente: Tutorial de comunicaciones óptica, p.2.



## 4. TOPOLOGÍA Y TRANSMISIÓN CON MULTIPLEXIÓN DENSAPOR DIVISIÓN DE ONDA

### 4.1. Topologías

Las arquitecturas de redes están basadas en muchos factores, incluyendo tipos de aplicaciones y protocolos, distancia, utilización y estructura de acceso, y topologías de redes anteriores. En el mercado metropolitano, por ejemplo, topologías punto-a-punto pueden ser usadas para conectar puntos de empresas, topología de anillo para conectar instalaciones Inter.-oficinas (IOFs) y para acceso residencial, y topologías de malla pueden ser usadas para conexiones Inter-POP (inter punto-a-punto) y en *backbones*.

En efecto, la capa óptica puede ser capaz de soportar muchas topologías y, puesto al desarrollo impredecible en esta área, estas topologías pueden ser flexibles. Hoy en día, las principales topologías en uso son la punto-a-punto y anillo.

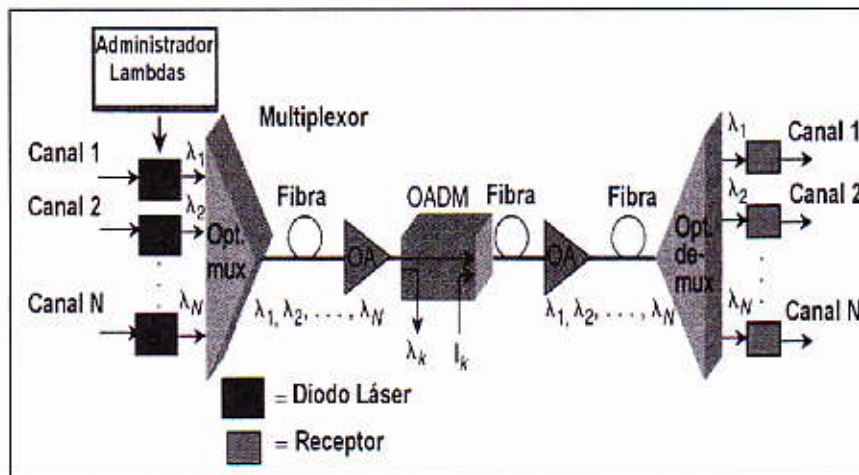
#### 4.1.1. Topología punto a punto

La topología punto a punto es primordialmente utilizada para transporte *long-hauld*, este requiere ultra alta velocidad (10-40Gbs) agregando ancho de banda (en el orden de los Tera bits por segundo), con alta señal integrada, genera una magnífica rentabilidad y rápida restauración de trayectos de capa. La distancia entre el transmisor y el receptor podría alcanzar hasta cientos de kilómetros, y el número de amplificadores entre dos puntos seria un máximo de 10 (esto determinado por la pérdida de potencia y la señal de distorsión).

La topología punto a punto con multiplexores *add/dropp* habilita el sistema para agregar y extraer canales a lo largo del trayecto.

Número de canales, espaciamiento de canales, tipo de fibra, método de modulación de señales y tipo de componentes seleccionados son todos parámetros importantes en el cálculo de la potencia del trayecto.

Figura 78. Topología punto a punto habilitada con add/dropp



Fuente: SMATIOS V, Kartalopulos. DWDM topogies, p.198.

En *DWDM*, cada canal es transportado sobre una específica longitud de onda, también conocida como canal óptico. Diferentes canales podrían transportar diferentes datos (ej. Voz, datos, video, paquetes de datos), para diferentes velocidades (ratas) de bits. El enlace con transmisor-receptor óptico cuenta con varios componentes ópticos: fibra, amplificadores ópticos, *OADM*, filtros ópticos, acopladores, fuentes de luz, moduladoras y receptoras. Cada uno de estos tiene su propio y particular efecto en la señal.

Una forma simplificada de ver un sistema punto incluyendo láser, un multiplexor óptico y demultiplexor óptico, fibras, amplificador óptico (OA), y un multiplexor *add/dropp* tal como se muestra en la figura 78.

La protección en una topología punto a punto se puede presentar de dos formas. En equipos de primera generación la redundancia es a nivel del sistema, es decir un paralelo redundante conectar los sistemas de enlace en cada extremo.

La conmutación en caso de daño es responsabilidad de los equipos clientes (por ejemplo *swich, router*), mientras que los equipos *DWDM* solamente proporcionan la capacidad de transmisión.

En el equipo de segunda generación, la redundancia es a nivel de tarjeta, los enlaces en paralelo son un sistema singular entre cada uno y éste contiene redundante transponder, multiplexores y CPUs. Aquí a migrado a decisiones bajo control local (APS), es un mecanismo de conmutación que rutea el tráfico de líneas en uso para protegerlas de problemas como corte en la fibra.

#### **4.1.2. Topología de anillo**

Una variación propietaria de las redes anillo *DWDM* se han desplegado. En general una red anillo *DWDM* consiste de una fibra en una configuración de anillo que interconecta plenamente los nodos; algunos sistemas tienen dos anillos de fibra para protección de la red. Cada uno de los anillos se convierte en un anillo de área local o metropolitana con una diferencia de decenas de kilómetros. El anillo de fibra puede contener unos pocos canales de longitud de onda (4), o varios. Y pocos o varios nodos. La tasa de bits por canal de longitud de onda puede ser de 622 Mb/s o menor, o 1,25 Gb/s o superior.

Uno de los nodos en el anillo es una estación *hub* (eje), de donde todas las longitudes de onda provienen, terminan y se gestionan, conectándose con otras redes tomando el lugar como un estación *hub*.

Entre el nodo y el *hub* tienen multiplexores *add-drop* (*OADM*) para agregar o extraer una o más longitudes de onda designadas.

En las redes anillo *DWDM*, la estación *hub* como fuente y terminal maneja varios tipos de tráfico (ej. Módulo de transporte síncrono STM, *IP*, video). El *hub* controla todos los canales (longitudes de onda) asignadas a un trayecto entre nodos también el tipo de tráfico. Con un *OADM*, una (o más) frecuencias son extraídas y agregadas.

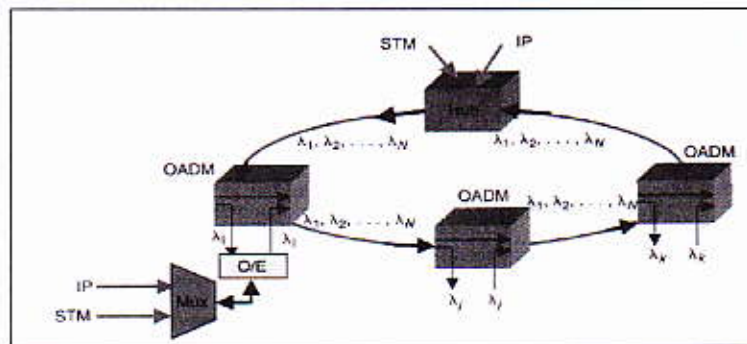
Mientras que el resto de frecuencias pasan a través del nodo transparentemente. No obstante, como el número de *OADM*s crece, la señal está sujeta a pérdida y pueden ser requeridas amplificaciones ópticas. El número de nodos se da típicamente por debajo de le número de longitudes de onda en la fibra. La figura 79 muestra una configuración básica de una red anillo sin anillo de protección.

En la topología de anillo, la estación *hub* administra los canales (longitudes de onda) asignados a fin que una red de nodos conectados con *OADM* sea controlada. La estación *hub* también puede proveer conectividad con otros nodos. En adición, un *OADM* se puede conectar con un multiplexor / demultiplexor donde varias fuentes de datos pueden ser multiplexados.

Las aplicaciones para las áreas metropolitanas con *DWDM* a menudo están basadas en *SONET*, estructuras de anillo con fibra de protección 1+1. Así pues los esquemas de protección *unidirectional path Swiched ring* (*UPSR*)

or *birectional line witched ring (BLSR)*, pueden ser reutilizadas para las implementaciones *DWDM*. Este sistema es más utilizado en las redes de acceso.

Figura 79. Topología anillo DWDM



Fuente: SMATIOS V, Kartalopulos. DWDM topologies, p.199.

Otros regimenes de protección, como el Anillo Bidireccional de línea conmutada (BLSR), permiten al tráfico viajar del inicio al final del nodo por la ruta más directa. Debido a esto, se considera preferible BLSR para redes *SONET* básicas, sobre todo cuando se aplica con cuatro fibras, que ofrece redundancia completa.

#### 4.1.3. Topología de malla

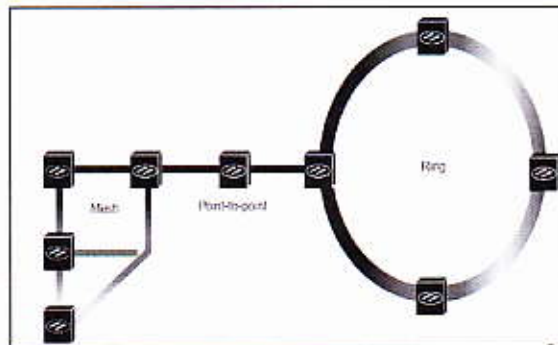
Estas topologías son el futuro de las redes ópticas. Conforme las redes evolucionan las topologías de anillo y punto a punto aun tienen un lugar en las redes, pero la malla tiende a ser la topología más robusta. Este desarrollo está habilitando la introducción de *switch* y *cros* conectores que en algún momento remplazarán y en otros casos suplementarán dispositivos fijos del *DWDM*.



Desde el punto de vista del diseño hay un camino evolutivo agraciado desde la topología de punto a punto a la topología de malla.

Al principio con los enlaces punto a punto, equipando con nodos *OADM* para mayor flexibilidad, y subsecuentemente la interconexión de estos, la red puede evolucionar en una malla sin un rediseño completo, además las topologías de anillo se pueden unir a una red de malla con un enlace punto a punto.

Figura 80. Topología combinada/malla



Fuente: Cisco Systems. Chapter 3 DWDM, p.12.

Las redes *DWDM* de malla, consiste en la interconexión de todos los nodos ópticos, esta red requerirá de la siguiente generación de protección.

Los anteriores esquemas de protección se basan en la redundancia del sistema a nivel de tarjeta o de fibra, la redundancia migrará ahora a nivel de longitud de onda. Esto significa, entre otras cosas, que un canal de datos puede cambiar de longitud de onda a través del recorrido, ya sea debido al ruteo o debido a una falla.

La situación es análoga a la de un circuito virtual a través de un cajero automático a través de nubes, que pueden experimentar cambios de su identificador de ruta virtual, en las redes ópticas a este concepto se le da el nombre de trayecto de luz (*light path*).

Las redes malla por lo tanto requieren un alto nivel de inteligencia para llevar a cabo las funciones de protección y gestión de ancho de banda incluyendo fibras y cambios de longitudes de onda. Los beneficios entre la flexibilidad y a eficiencia son potencialmente importantes. El uso de las fibras cuyas soluciones son bajas en un anillo debido a la exigencia de protección de fibras en cada anillo, se pueden mejorar en un anillo de malla.

La protección y restauración puede compartirse en trayectos, por lo que se requiere un menor par de número de pares de fibra por la misma cantidad de tráfico y no se desperdician longitudes de onda no utilizados.

Por último las redes de malla dependen en gran manera del software para la gestión. Un protocolo en *Multiprotocol Label swiching* se está desarrollando para apoyar los *path throught* en las redes totalmente ópticas. Además la gestión de la red requerirá una estandarización del canal para llevar los mensajes de elemento de red.

#### **4.2. Clasificación de las redes ópticas según su tamaño geográfico y funcionalidad**

La naturaleza de las modernas redes de comunicación han hecho que estén en un continuo proceso de evolución. Factores tales como nuevas aplicaciones, cambios en las pautas de uso y la redistribución de los

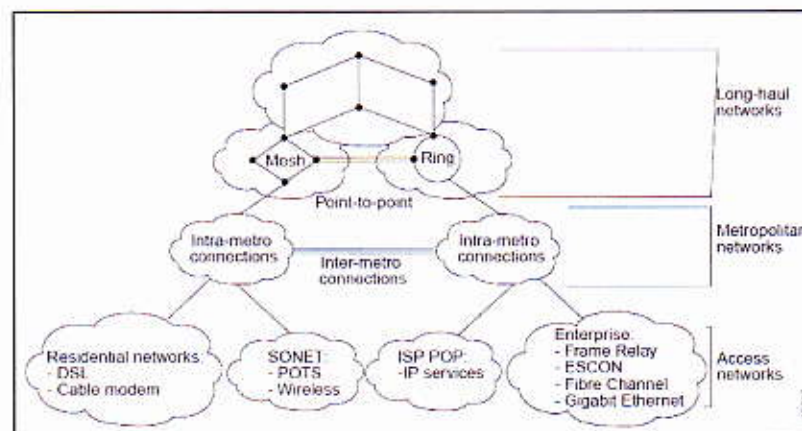
contenidos hacen que las redes estén progresando. Sin embargo, se puede definir en términos generales las grandes entidades que componen la red mundial sobre unas variables como lo son las tecnologías de transporte, la distancia, aplicaciones etc.

#### 4.2.1. Redes de larga distancia

Las redes de larga distancia son el núcleo fundamental de la red mundial. Dominado por un pequeño grupo de grandes transnacionales y mundiales empresas de transporte, las redes de larga distancia conectan las *MANs*. Su aplicación es el transporte por lo que su gran preocupación es la capacidad.

En muchos casos estas redes, que tradicionalmente se han basado sobre la tecnología de red óptica síncrona (*SONET*) o la jerarquía digital síncrona (*SDH*) han experimentado un escape como resultado de la alta demanda de ancho de banda.

Figura 81. Jerarquía global de redes



Fuente: Cisco System. Chapter 1 DWDM, p.1-1.

#### **4.2.2. Redes de acceso**

En el otro extremo del espectro están las redes de acceso. Estas redes son las más cercanas a los usuarios finales, en el borde de la *MAN*. Se caracterizan por diversos protocolos e infraestructuras que abarcan un amplio espectro de tipos. El rango de consumidores va desde los clientes residenciales hasta las instituciones y grandes corporaciones.

El predominio del tráfico *IP* con sus inherentes ráfagas asimétricas de naturaleza impredecible, presenta muchos desafíos, especialmente con las nuevas aplicaciones en tiempo real.

Al mismo tiempo estas redes son requeridas para seguir apoyando el legado de tráfico y de protocolos.

#### **4.2.3. Redes de área metropolitana**

Entre estos dos ámbitos de la creación de redes se encuentran las *MANs*. Estas redes proporcionan el canal de tráfico en el ámbito metropolitano entre empresas, oficinas y área metropolitana y entre largas redes de largas distancias con presencia de enlaces POP. Las *MANs* tienen muchas de las mismas características que la red de acceso, tales como diversos protocolos de red y velocidades de canal.

Al igual que las redes de acceso las *MANs* han sido tradicionalmente basadas en *SONET/SDH* utilizando topologías punto a punto o anillo añadiendo multiplexores (*ADMs*).

Las *MANs* se encuentran en una coyuntura crítica, por un lado debe satisfacer las necesidades creadas por la dinámica cada vez mayor de la disponibilidad de ancho de banda para los enlaces de grandes recorridos de las redes de transporte. Por otra parte debe abordar las crecientes necesidades de conectividad y acceso a las tecnologías que son resultado de la demanda de alta velocidad y servicios de datos personalizados.

#### **4.2.4. Diferencias entre redes de acceso y redes metropolitanas**

Existe una tendencia natural a considerar de las *MANs* son una versión pequeña de la red de *Long Haul*. Es cierto que las redes de servicio de la zona metropolitana abarca una distancia más corta que las redes de transporte *Long haul*. Sin embargo tras un análisis detenido estas diferencias son superficiales en comparación con otros. La forma de red *Long-haul*, es más estable en sus recorridos, mientras que la *MAN* cambia con frecuencia.

Muchos más tipos de servicio y tráfico deben ser apoyados por las redes metropolitanas, desde los tradicionales servicios de voz y servicios de líneas arrendadas a las nuevas aplicaciones incluyendo almacenamiento de datos, aplicaciones y códigos fuente. La *Long Haul* por lo contrario se trata de grandes tuberías.

Estas diferencias fundamentales entre los dos tipos de redes tienen implicaciones de gran alcance para las necesidades en el ámbito metropolitano. El proveer los protocolos, la velocidad de transparencia, escalabilidad y dinamismo son tan importantes en la red metropolitana como la capacidad en las redes *Long haul*.

### 4.3. Ip sobre *ATM / SDH* sobre *DWDM*

En el nuevo modelo de red, la capa de transporte incluye las funcionalidades de transmisión, conmutación y encaminamiento de paquetes en el seno de la red. En ella se distinguen tres subcapas: acceso, tránsito y red de clientes.

Actualmente y ya desde hace algún tiempo, nos encontramos en un gran crecimiento de tráfico como consecuencia, principalmente, de la generalización del uso de internet.

Este aumento de tráfico no viene solo determinado por el cada vez mayor número de personas conectadas a la red, si no cada vez los usuarios acceden a ella con mayor frecuencia y transmiten un mayor volumen de información. En los orígenes de internet, la mayoría de ficheros se transmitían codificados en modo texto, por lo que el volumen de información transportada no era demasiado elevado.

Hoy en día, por el contrario, se ha generalizado la transmisión de unidades mayores de información como páginas web, ficheros de video o música MP3, que tanto auge a tenido en los últimos tiempos. Por lo tanto está claro que la demanda de ancho de banda crece y continuará creciendo, sobre todo para tráfico *IP*.

Internet como una red de comunicación basada en el protocolo internet (*IP*), a experimentado un tremendo crecimiento durante la última década. El éxito de la internet y su omnipresencia ha realizado del protocolo de internet (*IP*) un factor común. Con el protocolo *IP* voz y video, así como de multimedia en tiempo real pueden ser integrados y transmitirse con el tráfico de datos a

través de una sola infraestructura de red, proporcionando una oportunidad sin precedentes para las empresas a mejorar sus servicios, reducir gastos y aumentar los ingresos.

La convergencia de *IP* no es sólo una opción esto inevitablemente se hace una necesidad de negocio en la era dependiente- internet. La convergencia de *IP* se ve ampliamente apoyada por el multiplexado denso por división de onda, la tecnología *DWDM*.

*DWDM* alivia el efecto del cuello de botella electrónico utilizando la división del espectro óptico en un número de canales que no se traslapan. Por lo que los componentes electrónicos trabajan a su propio ritmo (pocos giga bits por segundo) y no en una tasa agregada de velocidad. La convergencia *IP/DWDM* será traducido a una eficiente, robusta, fiable, viable y totalmente óptica de red.

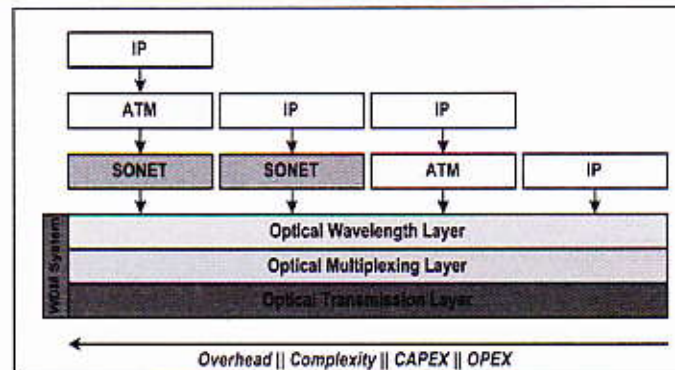
#### **4.3.1. Encapado *IP* sobre *DWDM***

El protocolo de internet (*IP*) ha prevalecido, y debido a las ventajas de la tecnología *DWDM* en gran manera indiscutiblemente han contribuido en gran manera. Por lo tanto la integración de la capa *IP* directa en la capa *DWDM* es la elección natural para reducir los costos, simplificar la gestión y el control, y para reducir los gastos generales de señalización.

Lamentablemente una integración directa no es tan simple y comprensible, por la necesidad de funciones como la elaboración de fragmentos y sincronización entre *IP* y la capa óptica.

Muchas soluciones se han propuesto para el transporte de tráfico sobre *IP* sobre *DWDM*, comenzando con la arquitectura multicapa, y la eliminación gradual de las capas intermedias. Así moviéndose hacia una integración más estrecha entre *IP* y la capa óptica, que es el modelo de de dos capas. Se presenta a continuación los diferentes enfoques el encapsado.

Figura 82. Encapado *IP* sobre *DWDM*



Fuente: VDE/ITG. *Optical transport networks (OTN)*, p.3.

#### 4.3.2. *IP sobre ATM sobre SONET/SDH sobre DWDM*

En el mecanismo *IP sobre ATM sobre SONET SOBRE DWDM*, el tráfico *ip* es transportado en *ATM* este a su vez es multiplexado sobre conexiones *SONET*, el cual eleva los servicios a la capa óptica, en otras palabras los paquetes *IP* son encapsulados y están segmentados en la capa de adaptación 5 (AAL-5), unidad de protocolo de datos (PDUs) y asigna diferentes conexiones virtuales para la línea de mando *SONET/ATM* en el router *IP*. Las celdas *ATM* son empaquetadas dentro de la trama *SDH/SONET*, los cuales pueden ser enviados ya sea a un switch *ATM* o directamente a un transpoder *DWDM*.



La infraestructura *SDH* ofrece una alta capacidad en contra de los cortes de fibra, y el uso de la capa *ATM* es atractivo principalmente por la asignación de ancho de banda, flexibilidad y capacidad de ingeniería de tráfico. *ATM* puede también proporcionar el *QoS* deseado a varias conexiones, el cual complementa el mejor esfuerzo de enrutamiento de tráfico *IP*.

Sin embargo, en adición se debe realizar un proceso de mapeo para la cabecera, mapeando paquetes *IP* de longitud variable sobre celdas *ATM* de longitud fija. Utilizando *ATM* para transportar *IP* sobre *SDH* incurrimos en información extra en la cabecera por que las celdas ociosas de *ATM* tienen que ser insertados como datos simulados en las tramas *SDH* durante los períodos donde no hay celdas de *ATM* para la transmisión, y esto se debe a que los enlaces *SDH* operan con una rata fija.

#### **4.3.3. IP sobre ATM sobre DWDM**

Un similar acercamiento es mantener solo la capa de *ATM* como un intermedio entre la capa de *IP* y la capa *DWDM*, por lo tanto, la eliminación de la capa *SDH* con su alto costo de equipo inicial y alto costo operacional.

En este panorama, usando la capa física basado en celdas *ATM*, las celdas de *ATM* se transportan en un canal directamente *DWDM*, sin el encapsulado en tramas *SDH*. Además de su amplitud de servicios en la capa 2. Este enfoque reduce la inversión en a capa física (alrededor de 16 veces en comparación que *SDH*), también simplifica la técnica de transmisión de celdas *ATM*, ya que son enviados directamente a través de la capa óptica. Además *ATM* es asíncrono, por lo tanto la dificultad de la sincronización por las redes *SDH* se ve aliviado.

A pesar que *ATM* magnífica la utilización del ancho de banda con la multiplicación estadística y proporciona cierta funcionalidad de QoS. La desventaja de este enfoque es la alta inversión en a cabecera de la trama *ATM* incluyendo las celdas AAL5.

#### 4.3.3.1. *IP sobre SONET/SDH sobre DWDM*

Para reducir la ineficiencia de la capa de transmisión de *ATM* los paquetes de *IP* son encapsulados dentro del protocolo (PPP/HDLC) (protocolo punto a punto/ control de enlace de datos de alto nivel) ò en marco simples de transmisión de datos (SDL).

La estructura de PPP/HDLC o la estructura del SDL entonces se encapsulan en la trama de *SDH* y se transmiten directamente sobre *DWDM*. Hay diversos tipos de interfaces para interconectar *IP* y *SDH*, por ejemplo.

- STS 3c/VC 4, que proporciona un ancho de banda agregada sin ninguna separación entre diversos servicios de *IP*.
- Interfaces separadas donde la salida óptica STM-48/STM16 puede contener 16STS-3c/VC-4 individuales con una diferenciación posible para cada STS-3c/VC-4.

*SDH* se puede utilizar para proporcionar funcionalidad de protección automática de conmutación (APS) contra cortes de cable en una variedad de configuraciones, además de su capacidad de transportar tráfico de voz. Por otra parte, siguen existiendo todas las desventajas previamente mencionadas asociadas a *SDH*, por ejemplo los altos costos de operación.

#### **4.3.3.2. IP sobre DWDM**

En contraste con los anteriores planteamientos, un enfoque optimizado es ofrecer servicios de *IP* directamente sobre la capa óptica *DWDM*, para eliminar ambas capas *SDH* y *ATM*.

El equipo inicial se ha reducido por qué no se utilizan equipos *SDH*. Se combina multiplicación eléctrica y óptica bajo normas estándares de marcos de trabajo.

El dominio óptico se basa en la tecnología de multiplicación *DWDM* pero proporcionando interfaces estándar y métodos para supervisión y administración de redes. Por ejemplo:

- G.872 en la cual se especifica su arquitectura
- G.709 en la cual se especifican los marcos y formatos
- G.898 habla sobre funciones y procesos

#### **4.3.4. Capas ópticas de la OTN**

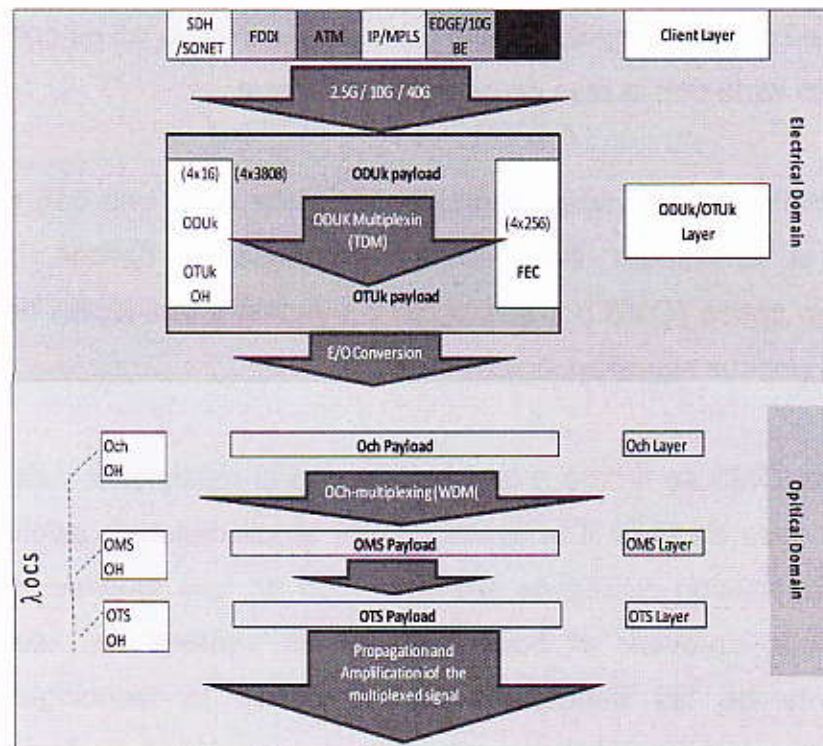
La estructura del encapsado de *OTN* se muestra en la figura 83 la jerarquía de *OTN* se basa en el canal óptico (*OCH*). La carga útil de *OCH* es transportada sobre una longitud de onda. A diferencia del legado del sistema *DWDM*, la estructura de esta señal es estandarizada.

Un canal común de supervisión (*OSC*) es usado para transportar la información de cabecera de la *OCH*, proporcionando también señales de mantenimiento y otros datos de dirección. La carga útil *OCH* consiste de una subestructura eléctrica.

La unidad de transporte de canal óptica (*OTU* por sus siglas en inglés) es la multiplexación eléctrica de mayor nivel e incluye una función de corrección de errores avanzada (*FEC*). El cual es aplicado entre puntos de la red, donde las señales son convertidas del dominio óptico al dominio eléctrico.

El canal óptico de unidad de datos (*ODU* por sus siglas en inglés) transporta un canal óptico de carga útil (*OPU* por sus siglas en inglés), las señales del cliente son mapeadas en la *OPU*, el cual no es procesado en los sitios intermedios de una red de transporte.

Figura 83. Encapado general y monitoreo de *OTN*



Fuente: VDE/ITG. Optical transport networks (OTN), p.5.

Las señales de ODU son definidas como las entidades conectadas a una red de punto a punto, comparables a los antiguos contenedores virtuales *SDH*.

En la actualidad está definida para 3 velocidades de bits:

- ODU1: 2,50 Gbps
- ODU2: 10,04 Gbps
- ODU 3: 40,32 Gbps

Estos son regularmente definidos como 2,7, 10,7 y 3 Gbps. La arquitectura y las funciones de cabecera de la *OTN* son muy similares a lo que se conoce de la *SDH*. El marco de la estructura contiene 4 X 4,080 bytes independientemente de la tasa de bits. Esto implica que la duración del marco no es contante como en *SDH*, pero varía con la tasa de bit de la señal real.

La multiplexión de varias longitudes de onda cada una con un OCh por medio de la tecnología *WDM* crea las entidades ópticas, sección de multiplicación óptica (*OMS* por sus siglas en inglés) y la sección de transporte óptico (*OTS* por sus siglas en inglés).

La capa *OMS* se refiere a la sección entre el multiplexor y de-multiplexor óptico y la capa de *OTS* a la sección entre amplificadores ópticos. Un canal óptico de supervisión (*OSC*) es implementado en una longitud de onda por separado para proveer el transporte de las señales de supervisión y mantenimiento de las subcapas ópticas. Dónde la tecnología *WDM* es principalmente necesaria para la extensión de capacidad de transporte, esto también representa una capa física adicional en la red.

Anteriormente sólo enlaces *DWDM* punto a punto y anillos metro-*WDM* eran posibles. Construyendo una verdadera red completamente óptica con solo pocas conversiones electroópticas para la regeneración de la señal también requiere la aplicación de la operación similares a las funciones de mantenimiento según lo dispuesto en las redes *SDH / SONET*, como cros conexiones, localización de fallas, y la protección de conmutación/ restauración a nivel óptico.

Esto era la razón por qué el concepto de la red óptica de transporte fue traído en la ITU-T. Esta tecnología de transporte añade una nueva capa de red flexible, económica a las actuales redes *SDH/SONET* y sistemas *DWDM*, permitiendo que una red sea manejada con una granularidad de longitud de onda.

Las futuras redes de transporte óptico constará de alta capacidad, enlaces punto a punto en combinación con cros-conectores para canales ópticos y ODU's.

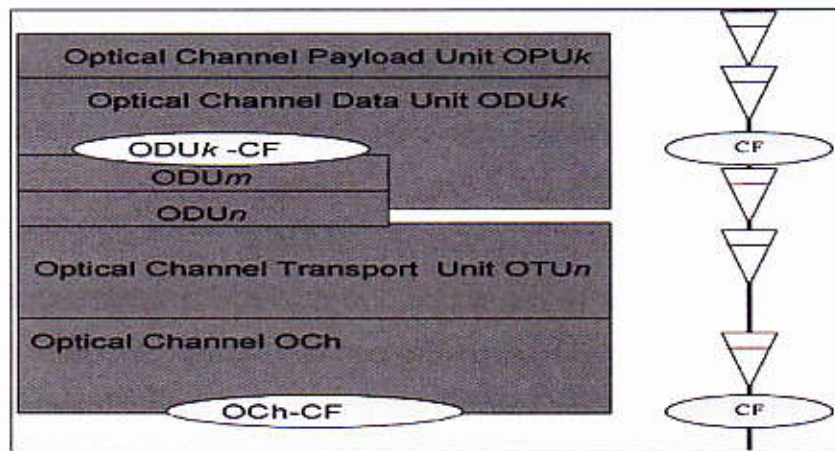
Esto creo una verdadera red óptica que proveerá características similares a las redes *SDH/SONET* hoy en día, pero con la exitosa extensión de mayores capacidades y canales ópticos. Uno de los principales requerimientos para *OTN* es proveer transporte transparente y la conmutación de protocolos Ethernet y señales *SDH/SONET*.

Las fibras entre diferentes posiciones (ubicaciones) a menudo llevan señales en múltiples longitudes de onda (*DWDM*). La entidad de la red entonces es el canal de unidad de datos ópticos (ODU<sub>K</sub> donde K=1,2,3), representando la parte de carga útil en un tramo punto a punto y contenido en una sola longitud de onda.

El canal óptico tiene una estructura de trama con cabecera, carga útil y un área para la corrección de error avanzada (*FEC*). *FEC* utiliza adicionalmente una cabecera para la redundancia de datos en las redes y permite la detección de errores de transmisión e incluso para la corrección de una parte de estos. El canal óptico es una señal digital sobre una longitud de onda separada de donde viaja la ODUk siendo transportado como una entidad de punto a punto.

Es compatible con cualquier tecnología de la matriz (óptica o eléctrica) para la conmutación de canales ópticos. Sin embargo la supervisión (digital) de rendimiento solo es posible en interruptores eléctricos.

Figura 84. Funciones digitales de OTN y niveles de *cross*-conexión



Fuente: VDE/ITG. Optical transport networks (OTN), p.3.

Las funciones digitales del OTN (G.709) son mostradas en la figura 84. En principio hay dos capas de *cross* conexión, la (opaca) capa ODUk y la capa OCh. La razón es que las dos capas son versátiles. Una arquitectura general tiene que soportar las implementaciones eléctricas y ópticas de las funciones de *cross*-conexión.

Así como también la definición de las funciones *TDM* entre las tres capas ODU necesitan un conmutador de capas en adición a la capa OCh de modo de garantizar eficientemente el llenado de los canales ópticos y para desacoplar la topología de las conexiones ODU y las conexiones OCh.

#### **4.3.4.1. Funciones generales de Gestión entre capas de la Red**

El costo operacional de una red de transporte es un grande y extenso determinado por las funciones de administración y mantenimiento proporcionadas por los elementos de la red. *SDH* el día de hoy está listo para soportar un comprensivo conjunto de características y por lo tanto es visto como el punto de referencia para nuevas tecnologías de transporte.

Las normas *OTN* reutilizan los conceptos, que son aplicados a *SDH* y amplían aquellas funciones, donde son necesarias. Tiene que ser acentuado, que *OTN* proporciona estos mecanismos no sólo en el dominio eléctrico, también proporciona mecanismos estandarizados en el dominio óptico.

Esto será explicado con un simple ejemplo de supresión de alarmas. Tales mecanismos son extensamente usados en señales PDH y *SDH* para fallas de señales en una red, de modo que en el mismo instante son notificados de la falla. Esto evita informes de fracaso excesivos hacia el administrador de red. De ahí se simplifica la identificación de un problema de red.

*OTN* amplía estos mecanismos en el dominio óptico, un fracaso de un sistema *DWDM* de varios canales causa el final de una falla para producir señales indicadoras de alarmas. La señal de alarma es transportada en la OSC.

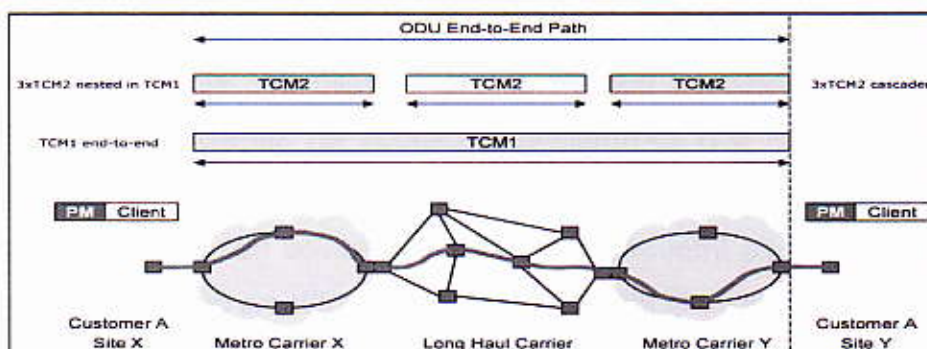


Además, la acción sobre calidad de degradación (Por ej. la señal degrada también es definida). Los umbrales que indican daños de calidad son configurables.

Un rasgo importante del OTN es *Tandem Connection Monitoring (TCM)*, dentro de diferentes dominios de administración (p. ej. El dominio del vendedor u operador). La capacidad mejorada TCM provee hasta 6 niveles de TCM independientes permitiendo anidar y cascandar dominios de monitoreo. En contraste con esto, *SDH* sólo provee monitoreo cascandeado.

La figura 85 muestra un ejemplo para la transmisión de señales a través de distintos dominios consistentes de dos redes transporte metro y de larga distancia. Con *SDH* solo es posible supervisar la red de transporte por separado. En adición a esto con *OTN TCM* es posible supervisar varias y diferentes redes en paralelo.

Figura 85. Ej. conexión monitoreo OTN



Fuente: VDE/ITG. Optical transport networks, p.10.

La aplicación de misión crítica requiere servicios de transporte con alta disponibilidad. Las fallas no deben dar lugar a la interrupción de servicio.

Se necesita de mecanismos de auto detección de fallas de la red e iniciar medidas de restablecimiento del servicio.

La protección es un mecanismo de recuperación basado en la funcionalidad HW implementada con los elementos de red. Las vías de protección son pre-definidas y preestablecidas. Las normas OTN especifican varios mecanismos de protección.

La tabla VII resume los mecanismos de protección en el dominio óptico. Sección, trayecto o camino de protección es aplicado por el operador de acuerdo a las especificaciones y requerimientos del servicio pero también dependiendo de los lineamientos y el concepto de resistencia subyacente.

Tabla VII. **Mecanismo de protección**

Técnicas de protección	Capas OTN	Capas OMS	Capas OCh
1+1 protección de trayecto	N/A	A	A
1:N protección de trayecto	N/A	A	A
1+1 SNC/N,SNC/S and SNC/I	N/A	N/A	A
Protección de anillo compartido	N/A	A	A
A = APLICA    N/A= NO APLICA			

Fuente: VDE/ITG. *Optical transport networks*, p.11.

Además de los mecanismos de la capa óptica hay también la posibilidad de proteger la capa *OTN* eléctrica, por eje. *OTU/ODU*, rastrean la protección *ODU SNCP*. Esto está a la espera de la estandarización aplicable para la capa *ODU*.

#### **4.3.5. Interfaces estándar y marcos de estructura de OTN**

La globalización de los negocios a creado demanda para la conectividad global. Los operadores, que no poseen la infraestructura en todas las regiones, tienen que arrendar la capacidad de proveedores para la ampliación de mayores anchos de banda.

Si el requerimiento de ancho de banda excede la capacidad de la carga *SDH*, el transporte de *STM-N* transparente es el servicio preferido para interconectar dominio de redes aisladas.

Por lo tanto surge una fuerte demanda de transparencia en la interfaz sobre el nivel de *STM-N* (en el total de la señal incluyendo todo el *SOH* y octetos de indicador).

Esto puede ser solucionado por la introducción de redes *OTN* basadas en una tecnología denominada *G-modem* (modem *OTH*) o (*SONET-OVER-SONET*) (*SoS*), y que permite transportar entidades *OTN* sobre *SDH/SONET*.

Con respecto a la sincronización, es importante notar que en contraste con *SDH*, los elementos *OTN* de la red no tienen que ser sincronizados con un reloj central. Sin embargo, es posible transmitir señales de reloj vía *OTN*, por ejemplo para sincronizar elementos de red *SDH* remotos.

#### **4.3.5.1. OTN sobre SDH (G-modem)**

Para lograr introducir capacidades OTN a la perfección en la existencia de redes SDH, un ODU-OVER-SDH el mapeo de la funcionalidad a sido definido como G-modem. Este es definido en la ITU-T G.707 como un método para conmutar transparentemente un ODU a través de una infraestructura SDH.

Esta contiene el mapeo de ODU 1 y ODU2 dentro de la estructura SDH y provee de rendimiento de monitorización de la ODUk basado sobre la cabecera VC-4. Una ODU 1 ( que puede mantener un stm 16 por ejemplo) es mapeado en un VC-4-17v, mientras un ODU2 (que si mismo sostener un STM 64 por ej.) es mapeado en un VC-4-68v. Por lo tanto STM-16 + STM1 o STM-64 es requerido para trasportar un ODU1. Para ODU2 , STM64+STM-4 es necesario.

#### **4.3.5.2. Mapeo de la señal del cliente en la OTN**

Mientras que las señales SDH se pueden asignar directamente en OTN, la asignación arbitraria de las señales de nivel 2 en la OTN se basa *Generic framing procedure (GFP)*.

*GFP* proporciona por primera vez un medio estandarizado para la asignación de una gran variedad de señales de (capa 2) en los marcos SDH o marcos ODU. Las señales pueden ser de tipo unidades de datos de protocolo orientado por ejemplo. *IP/PPP* p *Ethernet MAC*) o en bloques de código de tasa de bits constante, *ESCON*, *FICON* o canales de fibra.

Actualmente, dos modos de adaptación de clientes se definen de la *GFP*: una PDU orientada al modo de adaptación, refiriéndose a este como marco de

mapeo *GFP* (*GFP-F*). Y un bloque de código orientado al modo de adaptación, conocido como *GFP* transparente (*GFP-T*).

Con *GFP-F*, una señal del cliente es recibida y enteramente mapeada en una estructura *GFP-F*, en este modo de adaptación, la función de adaptación de cliente *GFP* puede operar como una capa de enlaces de datos (o la capa más alta) de la señal cliente. La visibilidad de las PDU del cliente es necesaria. En la actualidad el mapeo de *GFP-F* está definido por la carga útil de Ethernet MAC e *IP/PPP*. El mapeo de *GFP-T* proporciona un código-bloque orientado a modo de adaptación en el cual la función de adaptación opera sobre el código de la cadena de caracteres más que las *PDU*s entrantes de clientes.

Con este tipo de mapeo, los caracteres de cliente cifrados por bloque son descifrados y luego mapeados en una longitud fija de la estructura *GFP*, y pueden ser transmitidos inmediatamente sin esperar la recepción de una estructura entera de datos del cliente. Esto permite funciones de red como los servicios de extensión LAN/SAN que requieren latencias muy bajas. El mapeo *GFP-T* es definido para varias señales de cliente incluyendo FC, *ECON*, *FICON* y GbE. El mapeo de cargas útiles en el trayecto del canal óptico (OCh) esta especificada en las recomendaciones ITU-T G.709.

#### **4.3.5.3. El procedimiento de trama genérico**

El procedimiento de trama genérico (*GFP*) es un marco de trabajo de encapsulación flexible para adaptación de tráfico síncrono de aplicaciones de transporte de banda angosta (DS-n/E-n) datos paquetados (IP, GbE, FC), así como la estructura de concatenación virtual NG-S mejorando la utilización y eficiencia del ancho de banda para el uso de LCAST.

Esta función de control aloja diferentes clientes compartiendo un solo canal. ESCON, FICON, GbE, en múltiples STS-1 concatenadas en una revisión de la estructura *SONET/SDH*.

El protocolo *GFP* permite mapear la señal de una capa lógica o física a un byte de canal síncrono, este soporta diferentes topologías de red (corto alcance, mediano alcance y largo alcance), este exhibe baja latencia de orientación de paquetes o bloques codificados de cadenas de datos y soporta diferentes calidades de servicio (*QoS*).

*GFP* sobre la siguiente generación *SONET/SDH* considera la tecnología multiplexión por división de onda tanto gruesa como densa, que son la tecnologías de opciones en redes ópticas. Así con la flexibilidad de *GFP* en la próxima generación de *SONET/SDH* sobre *WDM*, y un solo canal (longitud de onda) puede llevar la señal de diversos clientes para mejorar la utilización y eficiencia del ancho de banda.

#### **4.3.5.4. Encabezado *GFP*, control de error y sincronización**

*GFP* define diferentes tamaños de estructuras y diferentes estructuras para clientes específicos para carga útil y gestión. Para aumentar la eficiencia de transmisión, se multiplexan diferentes estructuras en el tiempo, estructura por estructura.

Si no hay estructuras para multiplexar, estas estructuras ociosas se multiplexan para proporcionar una continua cadena de bits sobre el medio de transmisión.

*GFP* define una área de carga útil con sus propios campos de control que incluyen extensiones punto a punto y anillos. Así, la carga útil es de diferentes clientes pero del mismo tipo, como GbE puede ser multiplexado usando cualquier método de secuencia como Round-Robin para sincronizar la carga útil tal como DS1 y DS3.

*GFP* define una estructura flexible. La estructura define un núcleo de cabecera y un área de carga útil. El área de carga útil soporta conectividad de cliente a cliente y control de errores.

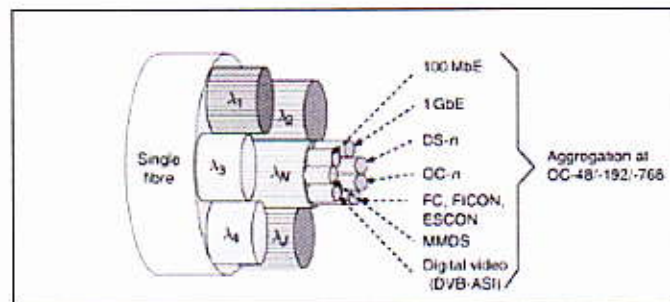
Este consiste de tres campos:

- Los datos de información del cliente que pueden ser de longitud fija o variable delimitadas por dos campos.
- La cabecera de carga útil es un campo que contiene información específica que pertenece a carga y control de errores.
- La secuencia de marcos para carga (FCS) campo que se utiliza para control de error de carga útil.

*GFP* separa control de errores entre la adaptación del proceso *GFP* y los datos de usuario. Esto permite enviar intencionalmente al receptor marcos corrompidos bajo la suposición que el usuario final usa su propio código de corrección de errores. En aplicaciones síncronas tales como video y audio, aun marcos corruptos son mejores que no enviar marcos, sobre todo, si particularmente estos marcos pueden ser restaurados por el usuario final. *GFP* define dos clases de funciones, comunes y clientes específicos.

El común es para lineamientos PDU, sincronización de enlaces de transmisión, multiplexión de clientes PDU y supervisión de función de clientes independientes.

Figura 86. **Diverso tipo de carga útil en un sólo canal óptico**



Fuente: VDE/ITG. Optical transport networks (OTN), p.13.

El cliente específico se mapea en una PDU dentro de la carga útil de *GFP*, y para clientes específicos OA&M (operación, administración y mantenimiento). *GFP* distingue entre dos tipos de estructuras de clientes: trama de cliente de datos (CDF) y trama de dirección de cliente (CMF). Un CMF transporta la información relacionada con la conexión *GFP* o la dirección de señal de cliente.

Un CFM es una característica poderosa que permite al cliente el control de la a conexión de cliente a cliente.

El núcleo de la cabecera *GFP* consiste sólo de cuatro bytes (figura 87). Los primeros dos definen la longitud de la carga útil y los otros dos un cedido de chequeo de redundancia (*CRC-16*) que protege la integridad del núcleo de cabecera de bits de errores.

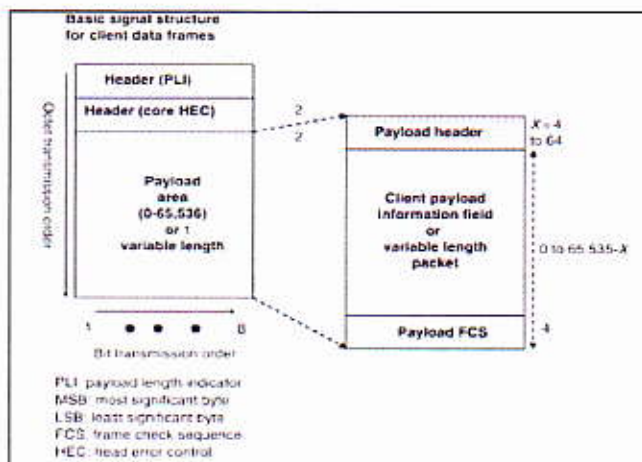


El núcleo de cabecera de control de errores (cHEC) es capaz de identificar muchos errores y corregir uno solo. El cHEC se genera polinomialmente  $G(x) = x^{15} + x^{12} + x^5 + x^0$  con valor inicial cero.

Al final de la transmisión, donde *GFP* es formateado, el código 16-Bit *CRC* es calculado sobre el núcleo de cabecera, y ese es almacenado en el tercer y cuarto byte de la cabecera.

Para la alineación de la estructura (o sincronización), *GFP* usa el cHEC; este es una variante de la cabecera de control de errores (HEC) y el esquema de alineación usado por *ATM* (ITU-T Rec.1.432.1). La función de alineación identifica el principio de la estructura *GFP*. Este es acompañado con el *CRC*-16 en el segundo byte del núcleo HEC. En adición el campo en la cabecera de trama *GFP* contiene la longitud de carga útil; esto puede cambiar de estructura en estructura teniendo en cuenta la longitud variable de PDUs, o puede permanecer contante para soportar *TDM*- como servicios sincrónicos.

Figura 87. Área de carga útil *GFP*



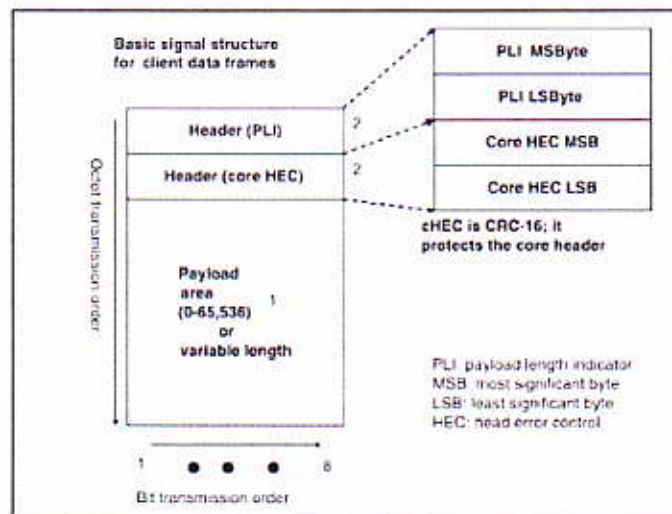
Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Next generation intelligent optical networks, p.129.

El mecanismo de alineación es como sigue: cuando el primer marco llega, el *CRC-16* es calculado sobre dos octetos y estos son comparados con los siguientes dos bytes. Si estos nos coinciden, entonces se avanza en un bit/Byte y trata de nuevo. Si estos coinciden, lo más seguro es que estos bytes son el *cHEC* almacenados en el núcleo superior de la cabecera.

Entonces, la función de alineación entra en estado de *hunt*. Para el esta *hunt*, la función de alineación se mueve para el *pre-sync* y eventualmente para el estado *sync*.

La alineación *GFP* es estabilizado cuando dos *cHEC* consecutivos coinciden. Si la coincidencia de un *cHEC* falla (una coincidencia incorregible), entonces el estado del mecanismo de alineación se mueve al estado re-sincronización.

Figura 88. Cabecera de GFP



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Next generation intelligent optical networks, p.137.

#### 4.3.5.5. Estructura del marco GFP

El tipo de carga útil mapeada en el área de carga de *GFP* es mostrado por un valor binario de 8-bit /byte, del tipo de usuario de carga útil (UPI). *GFP* define dos tipos de estructuras, el marco de datos de usuario y el marco de gestión de clientes. El tipo de marco es mostrado en un campo de 3.bits, el tipo de indicador de carga útil (PTI) en la cabecera de la carga útil. Figura 87 y 88. Actualmente, la carga útil eta definida como en la tabla VII. Por ejemplo PTI=100 indica un marco de gestión. En este caso, el valor de la UPI es de diferente sentido.

- UPI\_0X01 Falla en la señal del cliente-pérdida de señal en el cliente.
- UPI=0X02 Falla en la señal cliente-pérdida de sincronización de carácter.
- UPI= Otros; reservados.

Tabla VIII. Estructura del marco GFP

0X01:	Marco-mapeado Ethernet
0X02	Marco-mapeado PPP (incluye IP y MPLS)
0X03	Mapeo transparente FC (fiber channel)
0X04	Mapeo Transparente FICON
0X05	Mapeo Transparente ESCON
0X06	Mapeo Transparente GbE
0X07	Reservado
0X08	Marco mapeado Protocolo multiplex acceso sobre SDH
0x09	0XFE Reservado
0X00	Y 0XFF --→inhabilitados

Fuente: elaboración propia.

*GFP* también define los marcos inactivos estos son usados para llenar el tiempo durante el proceso de multiplexión. Un marco inactivo consiste de cuatro octetos, el núcleo general, con el total de los cuatro campos establecidos en cero. Sin embargo, después codificando todos los ceros a un código con suficiente densidad de unos. Sin embargo, el marco de datos de cliente tiene prioridad sobre los marcos de gestión teniendo los marcos inactivos la más baja prioridad.

#### 4.3.5.6. Modo GFP-F y GFP-T

*GFP* especifica dos diferentes tipos de clientes, también conocido como modos de transporte, es el mismo canal, el mapeo del marco *GFP* (*GFP-F*) y el mapeo del marco *GFP* (*GFP-T*).

El modo *GFP-F* es el modo especializado para aplicaciones que incluye la conmutación de paquetes *IP*, protocolos (*PPP*) nativos punto a punto, Ethernet (incluyendo *GbE* y *10 GbE*), y en general *Multiprotocol label switching* (*GMPLS*).

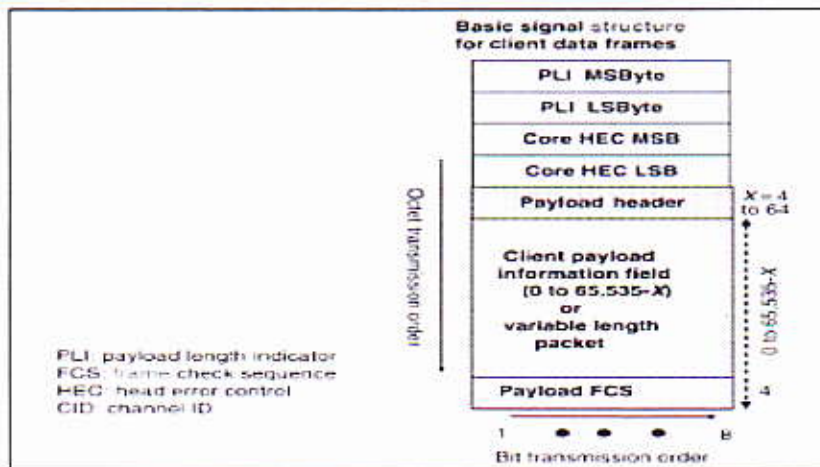
Las características del *GFP-F* son los siguientes:

- Los marcos son variables
- Usa *CHEC* para alineación
- Soporta tasas de adaptación y multiplexa niveles de paquetes
- Agrega marcos para niveles de *STS* y *VT*
- Requiere conocer *MAC*
- Requiere de almacenamiento
- Introduce suma de retardos temporales (latencia)

- Soporta marcos de datos de clientes (CDF) para ambos marcos de clientes y supervisión de marcos. CDF consiste de 4 byte en la cabecera principal (FC), y 0-65,535 de área de carga útil (PA)
- Soporta control de marcos ( para inactivo y OA&M)

El modo *GFP-T* es para optimizar aplicaciones que requieren eficiencia de ancho de banda y aplicaciones de retardo de sensibilidad incluyendo canal de fibra (FC), FICON, ESCON, y áreas de almacenamiento (SAN),

Figura 89. Marco general de *GFP*



Fuente: SAMTIOS V, Kartalopoulos. Next generation intelligent optical networks, p.138.

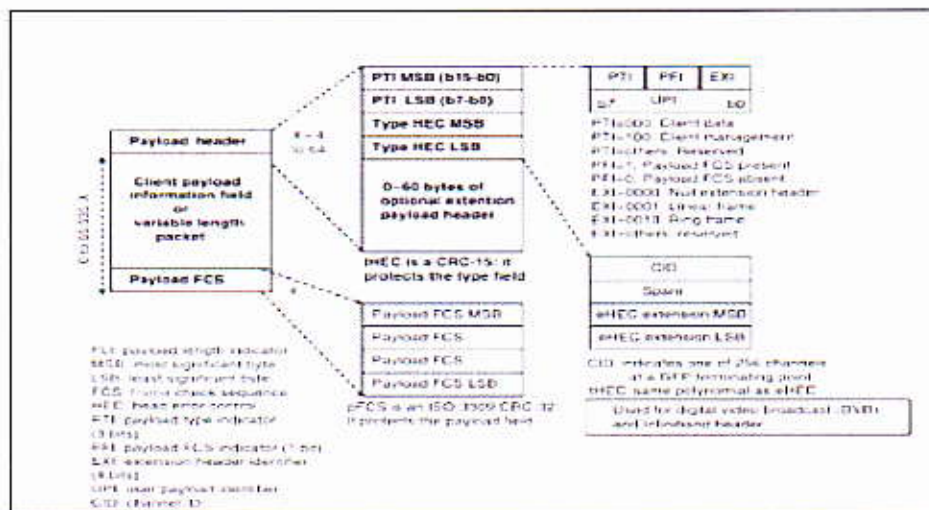
Las características del *GFP-T* son las siguientes:

- Longitud de marcos fijos
- Mapeo de paquetes clientes de N a 1
- No requiere almacenamiento
- Opera conforme arriban los bytes
- No introduce latencia

- No requiere MAC, solo codificando (8B/10B)
- La capa física es terminal
- Por no tener almacenamiento retiene cuadros de inactividad

Para cumplir con los requisitos en tiempo real, se considera una trama de longitud fija *GFP-T*, que opera cada carácter de una trama a medida que llegan, así que este proceso no necesita almacenamiento y no remueve paquetes inactivos. Como consecuencia, no se necesita de MAC. Para responder a los requisitos de las tramas *GFP-T* se definen súper-bloques. En este segmento la señal del cliente está formada en 8 octetos o 64 bits.

Figura 90. Detalles de la estructura *GFP*



Fuente: SMATIOS Kartalopoulos, Next generation intelligent optical networks, p.138.

A cada cabecera de segmento se le agrega un bit de bandera para formar un bloque. Ocho bloques consecutivos forman un súper-bloque; luego las ocho banderas son colectadas para formar un octeto que se coloca en el extremo de salida del súper-bloque, que se coloca junto con los 16 bits.

El código de chequeo de error CRC-16 es calculado sobre 536 bits (8 X 8 X 8+3 X 8) en el súper bloque y es sumado al final del súper bloque.

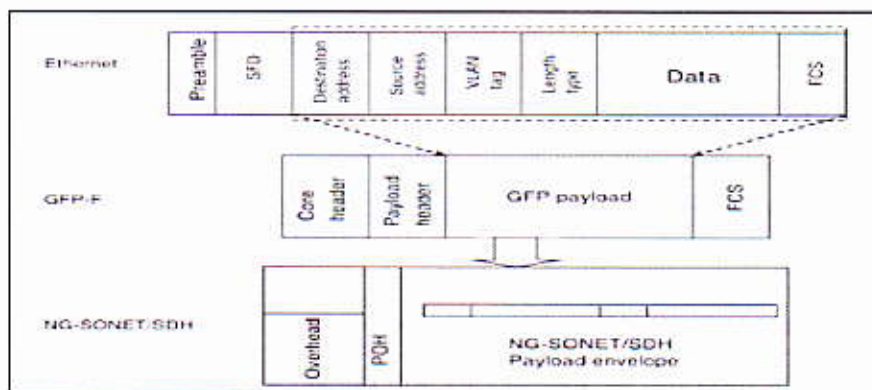
El polinomio utilizado que genera el CRC -16 es:  $G(x) = X^{16}+X^{15}+X^{12}+X^{10}+X^4+X^3+X^2+X^1+X^0$ , con valor inicial cero.

En resumen, según el esquema general de NG-S, el tráfico es mapeado en SONET/SDH (VT/TU grupos), datos (IP, Ethernet, FC, PPP) es encapsulado en GFP (primero GFP es independiente y luego GFP es común a todas las cargas útiles) y luego es asignado a la carga útil NG-S STS-n.

Durante la adaptación para GFP y mapeo del proceso NG-S, la carga es principal. Los bytes de cabeceras y punteros son formados para construir a un marco NG-S. La lógica de los mejores pasos para mapear el tráfico de clientes sobre NG-S se muestra a continuación.

Un ejemplo de encapsulado Ethernet sobre GFP sobre NG-S es mostrado.

Figura 91. Encapsulado *Ethernet* sobre *GFP*



Fuente: SMATIOS V, Kartalopoulos. Next generation intelligent optical networks, p.139.

## 5. DISEÑO – INGENIERÍA – IMPLEMENTACIÓN DEL ANILLO DWDM

### 5.1. Ingeniería y diseño óptico

La planeación de una red es necesaria para optimizar varios parámetros eléctricos y ópticos, esto garantiza la fluidez y de las operaciones de una red *DWDM*. Si la topología de sistema es punto a punto, un anillo o una malla inherentemente deben considerarse dos partes: el diseño del sistema óptico y el eléctrico o diseño del sistema de alta jerarquía.

Para el mundo de la redes, la capa óptica aparece como una capa física transparente cuya función es transportar cargas de bits a una alta velocidad con pérdidas insignificantes. La mayoría de los planificadores de la capa de red convencional no se preocupan por la heurística de la capa óptica.

Sin embargo, tales fallos a menudo pueden ser catastróficos. Esto no sucederá mientras que los parámetros de la tasa de bit y distancia se encuentren bajo una restricción limitada, tal es el caso de las redes pequeñas, en donde a menudo no hay que tener en cuenta los parámetros ópticos.

Conforme la tasa de bit aumenta y la distancia de transmisión crezca, los parámetros ópticos tienen a jugar un papel importante en la red. El planificador de la red debe tener en cuenta las causas que afectan los parámetros ópticos y crear una red que se adapte a estas causas. Se describirán algunas de las limitaciones que giran alrededor del diseño de una red *DWDM*.



Considerando la posibilidad de una señal óptica como una señal que varía lentamente de amplitud  $A(d, t)$  ( $d$  en función de la distancia “y tiempo “ $t$ ”), en el que distintos parámetros están actuando en todo momento.

Una señal óptica se propaga a través de una fibra de silicio con la propagación constante  $b$ , cuyo valor se obtiene de la solución de las ecuaciones de onda básica. Además, esta señal óptica se somete a la atenuación, que en virtud de sí misma, es una propiedad del medio de propagación de fibra de silicio en este caso. La atenuación en una fibra se caracteriza por la atenuación constante  $a$ , que da la pérdida (en dB) por km recorrido.

Ahora, ¿por qué es importante el parámetro de atenuación?. En primer lugar el pensamiento común dice que si el total de atenuación acumulada es mayor que la señal de entrada o energía de lanzamiento, una señal no existe en el extremo receptor. Esto aún muy obvio es una cuestión importante para la verificación de la recepción de la señal en el extremo receptor, en segundo lugar para que la comunicación óptica suceda un receptor necesita una cantidad mínima de potencia para distinguir los 0s y 1s de la señal de entrada óptica.

El requisito mínimo de potencia del receptor se llama sensibilidad del receptor,  $R$ , se debe asegurar que la potencia de transmisión es suficientemente alto para que pueda mantener la potencia de la señal  $>R$  en el extremo receptor, a pesar de la atenuación a lo largo de la línea de transmisión. Eso no quiere decir que si aumenta la potencia de transmisión a un nivel alto, podamos enviar bits a través de grandes distancias.

La potencia de entrada también es un generador de impedimentos tales como modulación de fase cruzada (*XPM*), modulación de fase segura (*SPM*),

mezcla de cuatro ondas (*FWM*). Además existe un límite superior para cada receptor (tipo APD o PIN) para la recepción de potencia óptica, el rango dinámico de un receptor típico es de -7 dBm a -28 dBm.

Por lo tanto la potencia máxima que se puede lanzar a la fibra es limitada. Esto también limita la distancia máxima de transmisión ( $L$ ) y  $P_r$  es la potencia mínima del receptor, entonces la primera ecuación muestra la potencia máxima de entrada que puede ser enviada por la fibra y la segunda ecuación muestra la distancia máxima de transmisión.

$$P_{inmax}(dB) = \alpha L + P_r(dB)$$

$$L = \frac{P_{in} - P_r}{\alpha}$$

La potencia óptica en el extremo receptor tiene que estar dentro del rango dinámico del receptor, de lo contrario, daña el receptor (si supera el valor máximo), no se podrá distinguir entre 1s y 0s si el nivel de potencia es menos que el valor mínimo.

En las ecuaciones anteriores se ha descuidado varios factores para que se comprenda de una mejor manera, dentro de los factores se encuentran la dispersión, la no linealidad de fibra, la polarización, ensanchamiento del espectro, origen (ampliación), las pérdidas de la planta de fibra (conectores, empalmes, conectores, empalmes, y los factores de envejecimiento), y así sucesivamente, si se tiene en cuenta estos efectos se nos reduce la longitud máxima. Para alcanzar a transmitir por largas longitudes, se utilizan repetidores en cascada.

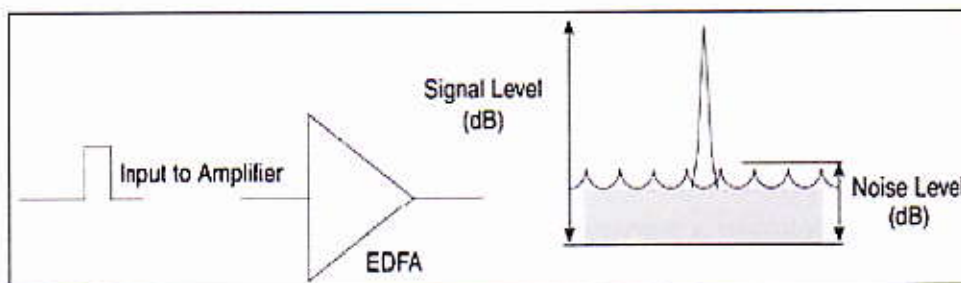
Existen dos tipos de repetidores, Opto-electro-Opto (OEO), repetidores eléctricos que al detectar, reforman, *retime* (reorganiza en el tiempo), retransmiten (3R) la señal (canal por canal), y están los amplificadores de (1R) (fibra dopada, *Raman* y SOA) que aumentan el nivel de potencia de la señal (sin reformar y no hay reajuste temporal) totalmente en el dominio óptico.

Los primeros tienen la ventaja de reactivar por completo la señal de la regeneración y conseguir la transmisión debido a la conversión opto- electrónica y la regeneración. Para ello, la señal *DWDM* debe estar de-multiplexada, lo cual no es ni rentable ni eficiente.

Los amplificadores ópticos alivian este problema mediante la amplificación de todos los canales juntos, por completo el dominio óptico, por lo tanto, amplificadores ópticos mejora la distancia de transmisión.

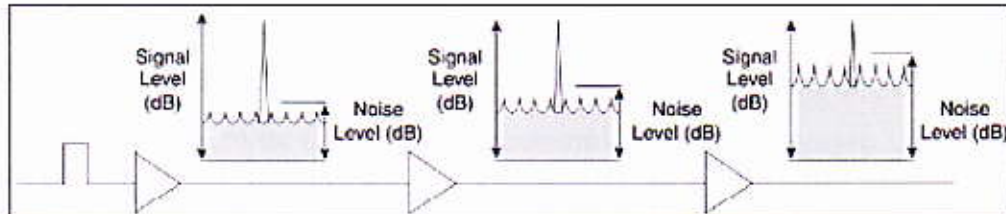
Sin embargo los amplificadores ópticos tienen sus desventajas, estos amplificadores son costosos añaden su dotación de ruido, este ruido a la vez se amplifica. El ruido es aleatorio en la naturaleza, y se acumula en cada etapa de amplificación como se observa en las figuras 92 y 93.

Figura 92. Paso simple de amplificación y ruido asociado con la señal



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.134.

Figura 93. **Ruido acumulado, resultado de múltiples pasos de amplificación**



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.134.

La amplificación del ruido es un severo problema en el diseño del sistema. Un factor de mérito para el diseño es la relación señal a ruido (*OSNR*) del funcionamiento del sistema. El *OSNR* especifica la relación de la potencia de la señal con la potencia del ruido, esta es una relación de dos potencias. El *OSNR* se usa para obtener la calidad de la señal y calcular la relación de esta relación. El diseño del sistema basado en *OSNR* es una importante y fundamental herramienta.

El *OSNR* no sólo se limita aún en la base amplificador óptico de redes. otro dispositivo activos y pasivos pueden sumar y crear un *OSNR* limitante en el diseño de la red. Dispositivos activos como láser y amplificadores agregan ruido. Dispositivos pasivos tales como llaves de paso y la fibra puede agregar ruido. En el cálculo de diseño de sistemas ópticos el amplificador es considerado el dispositivo predominante de la penalidad de *OSNR* y degradación.

La dispersión, causa el pulso de propagación. La más importante forma de dispersión es el grupo de velocidad de dispersión (GVD).

El grupo de velocidades inversamente proporcional al cambio de propagación constante  $\beta$  con respecto a la frecuencia.

En realidad  $\beta$  no es contante, (indirectamente) depende de  $\gamma$  un coeficiente no lineal, y  $P$ , la potencia de la señal. Además  $\beta$  depende del índice de grupo, que a su vez depende de los parámetros GVD. Por lo tanto, la dispersión causa severos pulsos de propagación y genera interferencia de inter- símbolos.

Otro problema de diseño es la polarización. Suponiendo que la polarización de las fibras no es una buena idea. Diferentes estados de polarización crean diferentes niveles de *PMD*. La compensación y la colocación del *PMD* es otro fuerte tema para la transmisión de altas tasas de bit.

Por último pero no menos importante, se debe considerar la no linealidad de la fibra, la auto- modulación de fase y la modulación de fase cruzada son dos problemas de acoplamiento comunes.

Un diseño de sistema puede ser optimizado teniendo en cuenta estos efectos de manera estratégica. En la siguiente sección se verán varios pasos que se deben considerar en el diseño de unos enlaces *DWDM*.

## **5.2. Factores que afectan el diseño del sistema**

Inicialmente, la pérdida de la fibra se considera el factor más importante en la limitación de la longitud de un canal óptico. Sin embargo, como la tasa de datos a crecido y los pulsos ocuparon menores y menores intervalos de tiempo la dispersión de velocidad de grupo y las no linealidades (*SPM*, *XPM*; *FWM*) se han convertido en una consideración importante.

Como se mostrará, para el diseño de un enlace óptico se toma en cuenta un parámetro, que generalmente es la tasa de error de bit (*BER*) del sistema. Para la mayoría de las redes *DWDM* prácticas, esta exigencia de *BER* es de  $10^{-12}$  ( $\sim 10^{-9} - 10^{-12}$ ) lo que significa que un máximo de  $10^{-12}$  pueden ser dañados durante la transmisión.

Por lo tanto, el *BER* es un parámetro figura de mérito para las redes *DWDM*, todos los diseños se basan en adherirse a esa calidad.

### 5.2.1. Efectos en la fibra por no linealidad

Con la colocación de amplificadores ópticos, se puede optimizar la enormemente potencia de una señal óptica que llega la foto detector. Otra consideración del diseño del sistema es la no linealidad de fibra única que está presente en la fibra de silicio.

La intensidad de la onda electromagnética a través de la fibra da lugar a la no linealidad. El índice de refracción tiene una fuerte componente no lineal que depende del nivel de potencia de la señal. Esta falta de linealidad produce un notorio desfase dado por  $\phi_{NL}$ .

$$\varphi_{NL} = \gamma P_{in} \frac{[1 - e^{-\alpha L}]}{\alpha}$$

$\gamma$  es el coeficiente no lineal que es denotado por

$$\gamma = \frac{n_2 \omega^2}{c A_{eff}}$$

Donde  $n_2$  es el índice de refracción y  $A_{eff}$  es el área de la sección transversal del núcleo. Además  $\phi_{NL}$  es dependiente de  $P_{in}$ , de tal manera que  $P_{in}$  es en sí dependiente de la variación del tiempo.

Por lo tanto el cambio de fase no lineal inducido en un pulso óptico de rápido movimiento es muy dinámico. La implicación es que la frecuencia es asociada con este desplazamiento de fase. En otras palabras, un pulso de frecuencia  $\omega_0$  en el tiempo, tienen componentes en un rango de frecuencia como se muestra a continuación:

$$\omega_0 \pm \phi_{NL}$$

En la ecuación  $\phi_{NL}$  es dinámica, el resultado es el pulso de propagación, que es el resultado de la dependencia de energía en el cambio de fase inducido. Por lo tanto para mantener un control sobre el desplazamiento de fase máximo que puede tener un pulso, es imprescindible fijar un límite a la potencia máxima de entrada. A esta no linealidad de desfase se le llama modulación de fase segura. En la comunicación óptica los pasos de señal por nodos deben ser diseñados teniendo en cuenta el cambio de fase máxima tolerable  $\phi_{NL}$ . Por lo tanto a potencia máxima [ $P_{in\ max} | \phi_{NL} < 1$ ] puede limitar el desplazamiento de fase que el sistema requiere.

El SMP no actúa solo, en la comunicación óptica, GDV y SPM a menudo van de la mano, actuando casi simultáneamente sobre la longitud de la fibra.

La potencia del canal de entrada debe ser optimizada de manera que garantiza una dispersión neta (a una velocidad determinada) que es menor que el mínimo tolerable de dispersión.

En otras palabras, una desventaja es tratada. Se necesita más energía para atender la dispersión inducida penalidad de potencia, pero esta potencia adicional conduce a efectos no lineales de fibra (como *SPM*) que crea más dispersión. Una técnica de optimización consiste en la simulación, por el cual se puede diseñar correctamente la red, considerando todos los factores que afectan y usando las herramientas adecuadas para compensar estos factores.

En un método, *SMP* y *GVD* ambos son calculados sobre una fracción de la transformada de Fourier. Usando este método, el análisis en el dominio de la frecuencia los dos efectos se acoplan para separar la guía de onda cilíndrica en segmentos infinitesimales, de forma tal que *SMP* se supone que actúa en los segmentos impares y *GVD* se establece para actuar en los segmentos par, la suma final de los efectos en el último y penúltimo segmento nos indica el deterioro de la red en el sistema.

Hasta el momento, los parámetros no lineales se han considerado en un sólo canal, en los sistemas *DWDM*, los canales paralelos tienen un efecto sobre otros, dos o más canales tienen efectos no lineales entre sí, siendo estos efectos *XPM* y *FWM*. El cruce de modulación de fase resulta de la diferencia de la frecuencia portadora de los canales independientes, incluyendo los cambios asociados a la fase de uno sobre otro.

El cruce de modulación de fase es gravemente perjudicial el doble que el efecto producido por modulación de fase segura. El cambio de fase inducido es producido por el efecto *Walkover*, por lo cual dos pulsos de diferente rata de velocidad se sobreponen uno con el otro. El pulso más bajo ve el traslape y provoca un desplazamiento de fase, de aquí el efecto *Walkover*. El desfasamiento total depende de la potencia neta de todos los canales y sobre la salida de bit de los canales.



El desfase máximo se produce cuando dos 1bits se traslapan, debido a la potencia en ambos bits, a diferencia de los niveles de potencia baja inferiores cuando ambos bits no están en 1 lógico.

Matemáticamente este desfase se muestra a continuación:

$$\varphi_i^{NL} = \gamma \left[ \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha} \right] [P_i + 2 \sum_{k=1}^w P_{k=1}]$$

En donde  $w$  es el número total de canales y  $P_k$  es la potencia del  $k$ -ésimo canal. El máximo desfase (todos los bits en 1) nos da:

$$\varphi_{max}^{NL} = \left[ \frac{\gamma}{\alpha} \right] [2w - 1] P_i$$

### 5.2.2. Efecto de la dispersión cromática en la longitud de transmisión y penalidad de potencia

La dispersión cromática es una causa de principal preocupación en la transmisión de altas tasas de velocidad (>2.5 Gbps) en sistemas *DWDM*. Como se ha explicado antes, la dispersión en un pulso óptico crea un ensanchamiento tal que el pulso se extiende a los bordes (en el dominio del tiempo) de otros pulsos. Esto no solo causa ISI, también introduce una penalidad en la potencia, lo cual causa degradación de los sistemas NSR. La penalidad de potencia se muestra en la siguiente ecuación.

$$Penalty_{DISP} = \frac{10 \log \frac{\sigma}{\sigma_0}}{\sqrt{1 + (D_L \frac{C}{\lambda})^2}}$$

En esta ecuación el ancho del espectro es el ancho del pulso, para las fibras SMF el parámetro de dispersión es de  $D=17$  ps/km-nm , la distancia límite es mostrada por el rango

$$B^2L < 16 \frac{\lambda^2 D}{2\pi c} \text{ or } L < \frac{16\lambda^2 D}{B^2 2\pi c}$$

Por lo tanto la siguiente ecuación es verdadera.

$$L < \frac{K}{B^2}$$

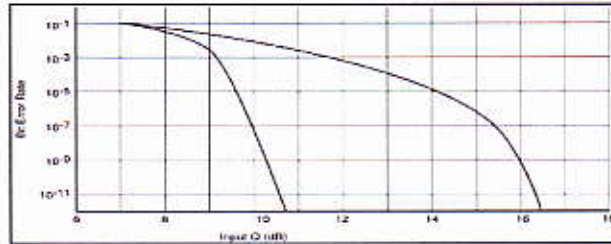
Donde K es una constante, por lo tanto a medida que aumenta B, disminuye con la raíz cuadrada de B.

### 5.2.3. Diseño de un enlace punto a punto basados en el factor Q y OSNR

Para diseñar una red, es imprescindible que el diseño del sistema cumpla con los requerimientos de *BER* de la red. Si se consideran cuidadosamente los criterios precedentes, debe ser evidente que el cálculo de *BER* instantáneo es una tarea interesante a pesar de que un diseñador tiene instrumentos como una hoja de cálculo y calculadora.

El factor Q proporciona una descripción cualitativa del funcionamiento del receptor, porque es una función de la relación señal a ruido (óptico). El factor Q sugiere el menor SNR, requerido para obtener un *BER* específico para una señal dada. La figura 94 muestra la relación del factor Q con *BER*. Se observa que entre más alto el valor del factor Q menor es el *BER*.

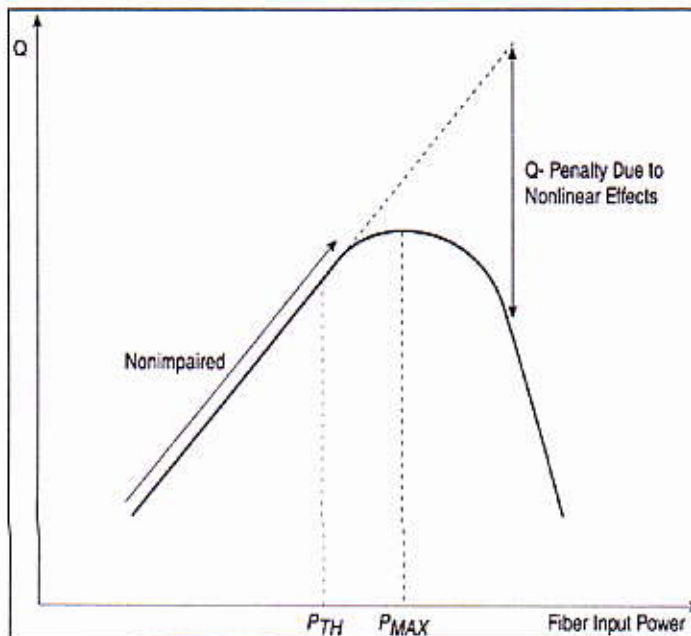
Figura 94. Relación de factor Q con BER



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.140.

La figura 95, muestra la penalidad del factor Q, debido a efectos no lineales por aumento de potencia de entrada.

Figura 95. Factor Q/ penalidad



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.141.

Matemáticamente esta gráfica está dada por:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

Donde  $I_1$  es el valor de la corriente de 1bit,  $I_0$  es el valor de la corriente de 0bit,  $\sigma_0$  es el valor de la corriente de 0bit,  $\sigma_1$  es la desviación estándar de la corriente de 1 bit.

La siguiente ecuación muestra la relación de factor  $Q$  con  $BER$  matemáticamente.

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)$$

El  $BER$  es difícil de calcular o simular, para un caso de diseño dado por ejemplo  $BER$  está dado por  $10^{-12}$  para una línea de OC-3, o 155Mbps, la red tiene un error en aproximadamente 10 días, esto toma 1000 días para grabar una estadística y un valor  $BER$ .

Esto es por lo que  $BER$  es difícil de calcular. Por otro lado, el factor  $Q$  es comparablemente fácil. A menudo  $Q$  es medio en dB. El siguiente tema sería como calcular dinámicamente el factor  $Q$ . Este está dado por  $OSNR$ .

#### 5.2.3.1. Cálculo de $Q$ facto de $OSNR$

La relación señal a ruido  $OSNR$  es el parámetro más importante que está asociado con una señal óptica dada. Esta es una cantidad medible (práctica) para una red dada, y puede ser calculado de los parámetros del sistema dado.

A continuación se relacionara con *OSNR* con el factor *Q*. El valor logarítmico de *Q* está relacionado con *OSNR* por la ecuación:

$$Q_{dB} = 20 \log \sqrt{OSNR} \sqrt{\frac{B_o}{B_c}}$$

Donde, *B<sub>o</sub>* es el ancho de banda del dispositivo final (foto detector) y *B<sub>c</sub>* el ancho de banda eléctrico del filtro receptor. Por lo tanto;

$$Q_{dB} = OSNR + 10 \log \frac{B_o}{B_c}$$

En otras palabras, *Q* es directamente proporcional a *OSNR*.

Generalmente, los cálculos de ruido son realizados por el analizador de espectro ópticos u osciladores de muestreo (*OSAs*), y estas medidas son realizadas sobre un rango de medición particular *B<sub>m</sub>*. Típicamente, *B<sub>m</sub>* esta dado entre 0,1 nm o 12,5 Ghz para un *OSA*. De la ecuación anterior mostrando la relación de *Q* en dB en términos de *OSNR*, se puede entender que si *B<sub>o</sub>* < *B<sub>c</sub>*, entonces *OSNR* (dB) > *Q* (dB). Para diseños en la práctica *OSNR* (dB) > *Q* (dB) por lo menos 1,2 dB. Típicamente, cuando se diseña un sistema con altas velocidades de transmisión, el margen de recepción es aproximadamente 2dB, por lo tanto *Q* es cerca de 2 dB más pequeño que *OSNR*.

### 5.2.3.2. Margen de requerimiento

En un enlace multi-nodo *DWDM*, el componente principal de pérdida del sistema no es la atenuación debido a la transmisión del enlace, pero sí lo es, la

perdida asociada a los distintos subsistemas. Un enlace típico consiste de varios nodos, cada uno equipado con una variedad de componentes. La pérdida por cada componente es alta, lo cual resulta en una penalización severa para el diseño de sistema. Un nodo típico de *DWDM* podría tener una sección de multiplexación completamente óptica (OMS) que consiste en guías de onda puestos en orden (*AWGs*) y una matriz de conmutación.

Un típico *AWG* tiene una pérdida típica de 5 dB (pérdida de inserción) asociada con ella. Una señal óptica que pase por un nodo con dos *AWGs* (multiplexor y demultiplexor) es sujeta a 10 dB de pérdida además de las pérdidas de conmutación de fábrica.

Considerando dos nodos, cada uno equipado con *AWGs* (pérdida de 5 dB) y la conmutación de fábrica (pérdida = 3 dB), además de la pérdida de conector (2 dB). Si están separados por 50 km de SMF ( $a=0,2$  dB/ Km), la atenuación total debido a la transmisión es de 10 dB (2 X 50) sin embargo, en cada nodo, la pérdida 5 + 5+3+2, nos da 15 dB. En otras palabras, las pérdidas nodales son superiores en comparación con las pérdidas de transmisión.

Esto afecta a los diseños de sistemas y *OSNR* también. El efecto es indirecto en el sentido de que la potencia de salida de un nodo se ve afectada por tales pérdidas, y tiene un efecto mayor en *OSNR*.

$$OSNR_{db} = 58 + P_{in} - [(db) - NF_{db} - 10\log N$$

En la tabla VIII, se muestra la pérdida de inserción debido a los elementos típicos. Se tiene que cuantificar las pérdidas debidas a deficiencias en la transmisión, la dispersión puede ser cuantificada como una sanción en dB.

Igual tratamiento se puede hacer a otros fenómenos no lineales como la polarización etc.

La tabla IX muestra un requerimiento de márgenes para un buen diseño, estos márgenes se adhieren a las variaciones en asuntos de presupuesto óptico de señales, especialmente en un nivel dinámico.

Los márgenes son elegidos generalmente por la evaluación de conjuntos de lecturas que representan la pseudo - población de una serie de eventos discretos que rigen todo el espacio maestro de diseño digital óptico.

**Tabla IX. Pérdida en la ventana de operación de 1 550 nm**

Component	Insertion Loss	Wavelength Dependt Loss	Polarization-Dependent Loss	Coss TalkNF
<b>Multiplexer / Demultiplexer (AWG)</b>	5dB	< 1 dB	0,1 dB	-40dB
<b>Optical 2 x 2 add-drop swich</b>	1,2 dB	< 0.2 dB	0,1 dB	-40dB
<b>Coupler (2 x 2) Passive</b>	3 dB	-	-	-
<b>Filter -Thin-film</b>	1 dB	0,1 dB	-	-40dB
<b>Filter- AOTF/ MZI</b>	1 dB	0,1 dB	-	-35dB
<b>Interleaver</b>	2-3 dB	-	-	-
<b>Optical cross-connect (OXC) Port to Port</b>	3 dB typical without AWG loss	< 0,4 dB	0.1 dB	-40dB

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Requerimiento de margen**

Symptom	Loss Margin
Fiber dispersion	1dB
SPM margin	0,5 dB
XPM margin	0,5 dB
DCU compensation	6 dB
FWM	0,5 dB
SRS/SBS	0,5 dB
PDL	0,3 dB
PMD	0,5 dB
Amplifier gain tilt (due to nonflat gain spectral)	0,3 dB
Receiver sensitivity tilt (wavelength dependence of PMD)	0,5 dB
Transmitter chirp	0,5 dB
AWG cross-talk	0,2 dB
Fiber connectors	0,5 dB

Fuente: elaboración propia.

### 5.2.3.3. **Requisitos del margen de diseño usando la compensación de dispersión cromática**

En un sistema de dispersión cromática limitada en la que la dispersión total acumulada de un pulso es mayor que la dispersión máxima admisible, el sistema no puede funcionar debido a la ISI o simplemente al pulso extendido.

Por lo tanto, se tiene necesidad de colocar las unidades de compensación de dispersión (DCU) en diferentes posiciones en una red. Cuando se diseña una conexión de alta velocidad de bits *DWDM* (donde la dispersión es considerada un deterioro importante de diseño), se debe utilizar los mapas de dispersión de manera efectiva en el diseño de un sistema. Los mapas de dispersión son los mapas bidimensionales que trazan la dispersión acumulada vs la longitud de transmisión. Estos son mapas particularmente útiles que



ayudan al diseñador a decidir dónde colocar compensadores de dispersión en una red. La dispersión acumulada se calcula multiplicando la fibra y las especificaciones de laser de dispersión para una velocidad dada con respecto a la longitud de la fibra.

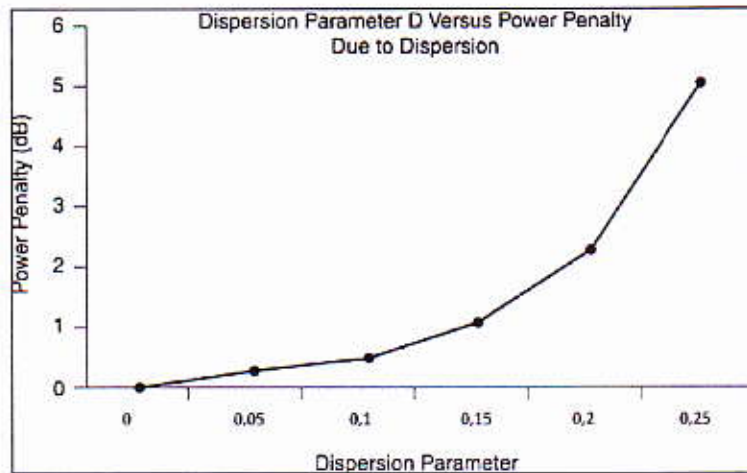
Por ejemplo el valor típico de dispersión de una fibra SMF es de 16 ps/nm – km, que quieren decir que para cada kilómetro recorrido de fibra SMF, un pulso en 10 Gbps (100 ps ancho del pulso) se extiende 16 ps de su medida. Se debe asegurar que la extensión de pulso acumulado a través del kilómetro “x” es menor que el límite de dispersión máximo que podría ser 1 600 ps/km-nm para una señal de 10 Gbps.

De esta discusión, es evidente que la señal puede viajar  $16 \times 1\,600$  km (si  $x=100$ ) de fibra SMF a una tasa de bit de 10 Gbps. Es importante recalcar que si la señal recorre una distancia mayor, la dispersión acumulada también aumenta. Para una velocidad de bits dado y en una determinada longitud de onda (o banda de funcionamiento), el máximo admisible de dispersión acumulada está dada por una especificación estándar. En ningún punto del mapa de dispersión el valor de la curva debe este más alto que el límite de la tolerancia de dispersión.

Se debe tener en cuenta que los parámetros de dispersión dependen de muchos factores, los principales son: la tasa de bits (que ofrece el ancho de pulso), la longitud de la fibra, el parámetro de la dispersión de base y la anchura espectral del laser, que cuantitativamente corresponden a monto de la dispersión inducida (GDV) dispersión cromática. Una especulación interesante es el de la variación de la penalidad de energía para los sistemas de dispersión limitada en función del parámetro de dispersión D, que se deriva de lo especificación de la fibra de base.

D puede considerarse un componente de equilibrio entre la tasa de bits, la longitud de la fibra y la anchura espectral de la fuente que emite el pulso, lo cual se puede observar en la figura 96.

Figura 96. **Variación de la dispersión con penalidad de potencia**



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.150.

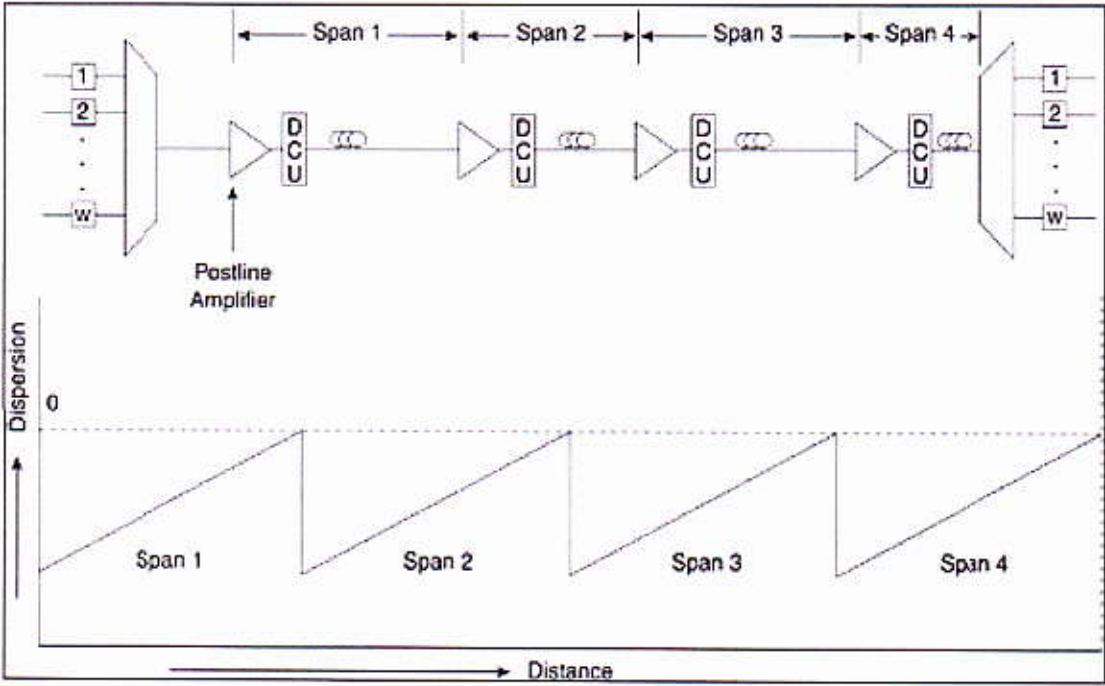
Hay dos técnicas pre compensación y post compensación, pueden compensar la dispersión de usar cualquier  $f$  en estos métodos. Como su nombre lo indica, pre compensación compensa la dispersión antes de que la señal sea inducida en el sistema. Esta es una técnica de compresión del pulso de antemano con UCD, que se encarga de la dispersión acumulada por adelantado. En contraste, post compensación, se puede colocar la DCU después del amplificador en la línea como se ve en la figura 97.

Estas unidades tienen bucles de fibra óptica con perfil de dispersión opuesto al de la transmisión de la fibra.

Por ejemplo, una transmisión de fibra que tiene un parámetro de dispersión de 16 ps/nm-km. Un DCU hipotéticamente podría hacer para tener un perfil de dispersión de  $\approx 50\text{ps/nm-km}$ .

La señal pasa a través de bobinas de fibra, DCU y el pulso es pre compensado. Por el contrario, con las técnicas de post compensación, los módulos DCU se colocan antes del amplificador en la línea, como se muestra en la figura 97, se muestra el parámetro de dispersión D para diferentes tipos de fibra 1 550 nm. En la tabla X se encuentran los parámetros de dispersión para distintas fibras.

Figura 97. **Posicionamiento de DCU de pre-compensación**



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.151.

Tabla XI. **Parámetros de dispersión por tipo de fibra**

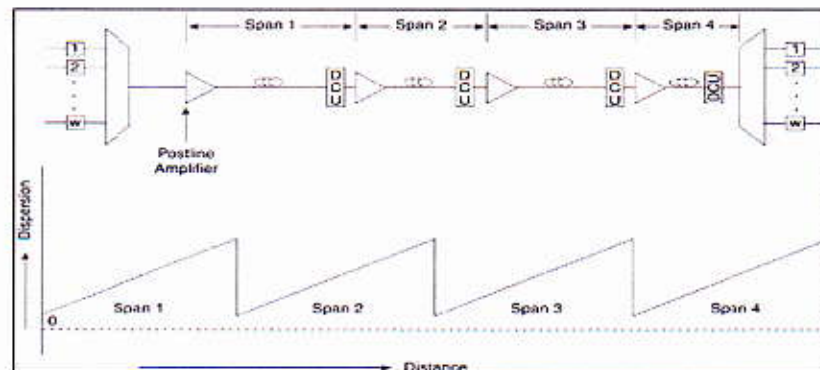
Tipo de fibra	Dispersión normal a 1550 nm medidas en ps/nm-Km
Fibra mono modo (SMF)	17
Fibra de área efectiva (ELEAF)	4
TrueWave RS (TW-RS)	4,2
Dispersión shifted fiber (DSF)	-0,33

Fuente: elaboración propia.

Una grave pérdida (atenuación) se produce cuando se añade UCD. Esto se debe a una diferencia de acoplamiento entre la fibra de transmisión y la DCU.

Por otra parte, diferentes perfiles de dispersión dan como resultado desequilibrio de fases, lo que impide que suceda el efecto *FWM*. Esta es una de las ventajas de la DCU en la limitación de los efectos de la no linealidad.

Figura 98. **Mapa de posicionamiento para post-compensación**



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.152.

#### 5.2.3.4. Bases de diseño OSNR

Para una red dada, es importante calcular la OSNR y hacer un diseño basado en los OSNR y las limitaciones de dispersión. Es posible compensar a dispersión en gran medida. Sin embargo, la indemnización OSNR necesita regeneración 3R (OEO) que es cara.

En otras palabras, la compensación es casi imposible para los sistemas multicanal WDM. Por lo tanto, cuando estamos diseñando un enlace WDM, es imprescindible considerar en primer lugar las limitaciones de OSNR. El diseño sobre OSNR se basa en la etapa final (en el receptor); el OSNR es el deseado para alcanzar el BER requerido.

Esto también a su vez garantiza la exigencia BER que es esencial para generar la recepción del símbolo.

#### 5.2.4. Efectos FWM y XPM a larga distancia de diseño

El FWM es el tercer efecto de no linealidad en los enlaces ópticos que pueden ser comparados a la distorsión de intermodulación en los sistemas eléctricos estándar.

El FWM es peor para sistemas equidistantes WDM y de alta potencia. Cuando tres canales ópticos en frecuencias  $W_i$ ,  $W_j$  y  $W_k$  y viajan en la longitud de onda de tal manera que están cerca de la dispersión cero, se entrelazan para producir una cuarta onda como se muestra a continuación.

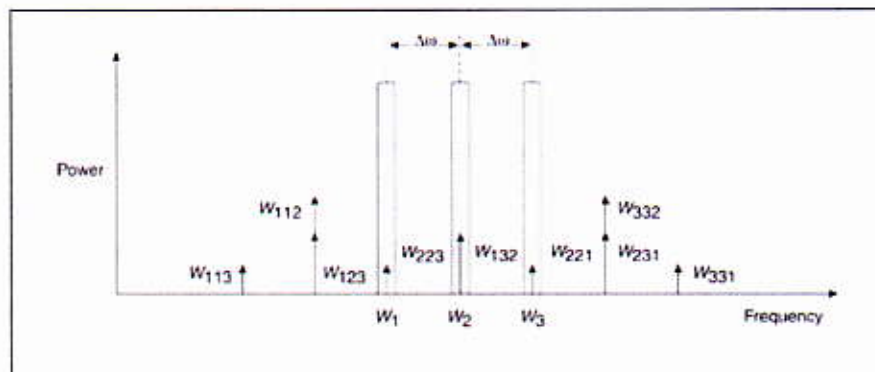
$$w_{ijk} = w_i \pm w_j \pm w_k$$

Las  $W_i, j, k$  pueden mezclarse con otro canal *DWDM*, causando graves *cross talk*. Para longitudes de onda  $W$  en una fibra, el número de canales ( $N$ ) de *FWM* producida se muestra en la ecuación N.

$$N = \frac{w^2}{2} (w - 1)$$

La figura 99 muestra los efectos de *FWM* en sistemas igualmente espaciados y considerable potencia, mientras que en la figura 100 se muestra la misma consideración para los sistemas distribuidos de manera desigual en espaciado de frecuencia.

Figura 99. **FEM Igual separación**

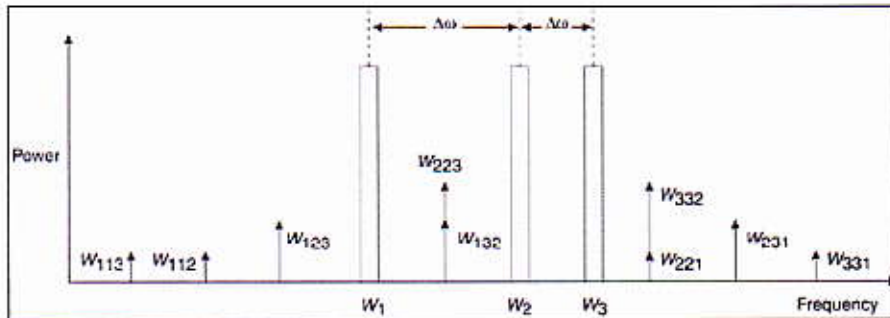


Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. *DWDM network designs*, p.155.

La igual separación de canales, tres canales equidistantes generan nueve señales *FWM*, de las cuales tres caen sobre las señales.

Tres canales de desigual espaciamiento generan nueve señales *FWM*; ninguna de las señales generadas cae en la parte de superior de la señal original.

Figura 100. **Canales de desigual espaciamento**



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.156.

La solución para reducir al mínimo *FWM* es utilizar el canal desigual de espaciamento de tal manera que la longitud de onda generada no interfiere con el canal de señal (s). El uso de *NZDSF* minimiza el efecto *FWM*.

En los sistemas multicanal *DWDM*, *XPM* causa intensidad basada en la modulación de los canales de frecuencia adyacentes.

El *XPM* causa fluctuaciones en propagación de pulsos debido al efecto de otros canales. Por otra parte, si hay canales adyacentes están viajando a la misma velocidad de bits, los *XPM* son más pronunciados.

Una forma de evitar *XPM* es seleccionando cuidadosamente las tasas de bits para los canales adyacentes que no sean iguales a la tasa actual de bits.

En el diseño de enlaces *DWDM*, por lo general mantener un margen de 0,5 dB de penalidad de potencia tanto para *FWM* y *XPM*. *XPM*, tiene más impacto con determinados tipos de modulación. Normalmente, *FSK* y *PSK* tienen un impacto más pronunciado que *NRZ* pura y codificación *RZ*.

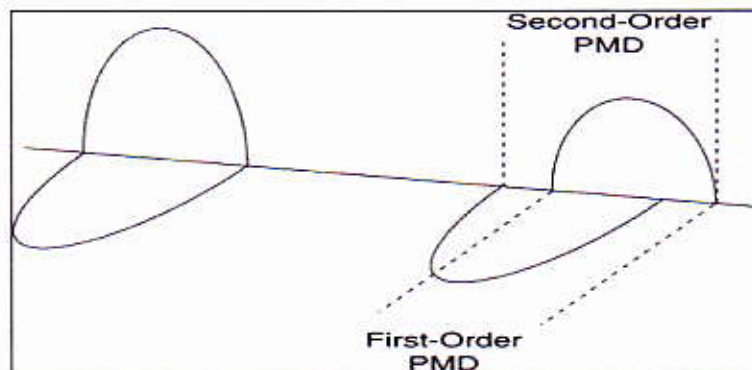
### 5.2.5. *PMD* en diseños de larga distancia

*PMD* no es un problema en las tasas de transmisión bajas, se convierte en un tema determinante en las tasas de bit por encima de 5 Gbps. *PMD* es inherente causado por la asimetría de la fibra.

Esta asimetría se agrega a una propiedad llamada bi - refringencia, como principio que los dos modos de polaridad de degeneración (modo de polarización  $E_x$  y  $E_y$ ) están sujetos a el efecto *walkover*.

Debido a este efecto, los modos no están acoplados entre sí, que a su vez hace que el impulso se extienda en el tiempo. El principal tipo de *PMD* que se debe tomar en cuenta es el de segundo orden, que esencialmente se origina en la dispersión debida a la longitud de onda de la señal, así como el ancho espectral de la señal. La figura 101 muestra la heurística de *PMD* que se crea en los sistemas de alta velocidad.

Figura 101. El *PMD* en el pulso



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.157.



Una medida de *PMD* es el retardo de grupo diferencia (DGD), que solo puede visualizarse como la diferencia de tiempo en múltiples componentes espectrales (a varias velocidades) en una determinada longitud de fibra. Los ejes de la polarización ya no son comunes, en el aumento de la separación como el pulso se transmite a través de una fibra.

La diferencia es algo proporcional a la DGD. Por lo tanto, DGD puede ser usado con precisión como una medida de *PMD* para un sistema dado. Por otra parte, el *PMD* de fibra determinado se define como la media de DGD, la medida DGD puede ser calculada a partir de la DGD.

$$DGD = (PMD \text{ coefficient}) \times Length^{\frac{1}{2}}$$

Para un sistema típico de larga distancia el margen *PMD* es 1dB típicamente, pero depende de la longitud de transmisión. Se considera un ejemplo numérico. Si el coeficiente *PMD* de la fibra dada es de 2PS y la distancia es cuestión es de 625 km, el cálculo de la DGD quedaría así.

$$DGD = 2ps\sqrt{Km} = 2 * \sqrt{625} = 2 * 25 = 50_{ps}$$

En sistemas de 10 G y 40G, un DGD de esta magnitud degrada el rendimiento del sistema (causando más *BER*). La figura 102 muestra el diagrama de flujo básico que se utiliza para diseñar una red óptica basada en los principios de diseño del sistema. Un tema que no se toma en cuenta en este diagrama es el sistema de inclinación limitada, según la cual la ganancia del amplificador que produce amplificación diferentes para los diferentes canales ( y por lo tanto, diferentes niveles de ruido), generando diferentes valores de *OSNR* para canales diferentes.

Compensar la inclinación es una tarea difícil a pesar de la disponibilidad de filtros de banda plana, así como ecualizadores de banda, que intenta crear uniformidad en cierta medida en el grupo de trabajo óptico.

### 5.3. Diseño de topología virtual o lógica para el paso DWDM

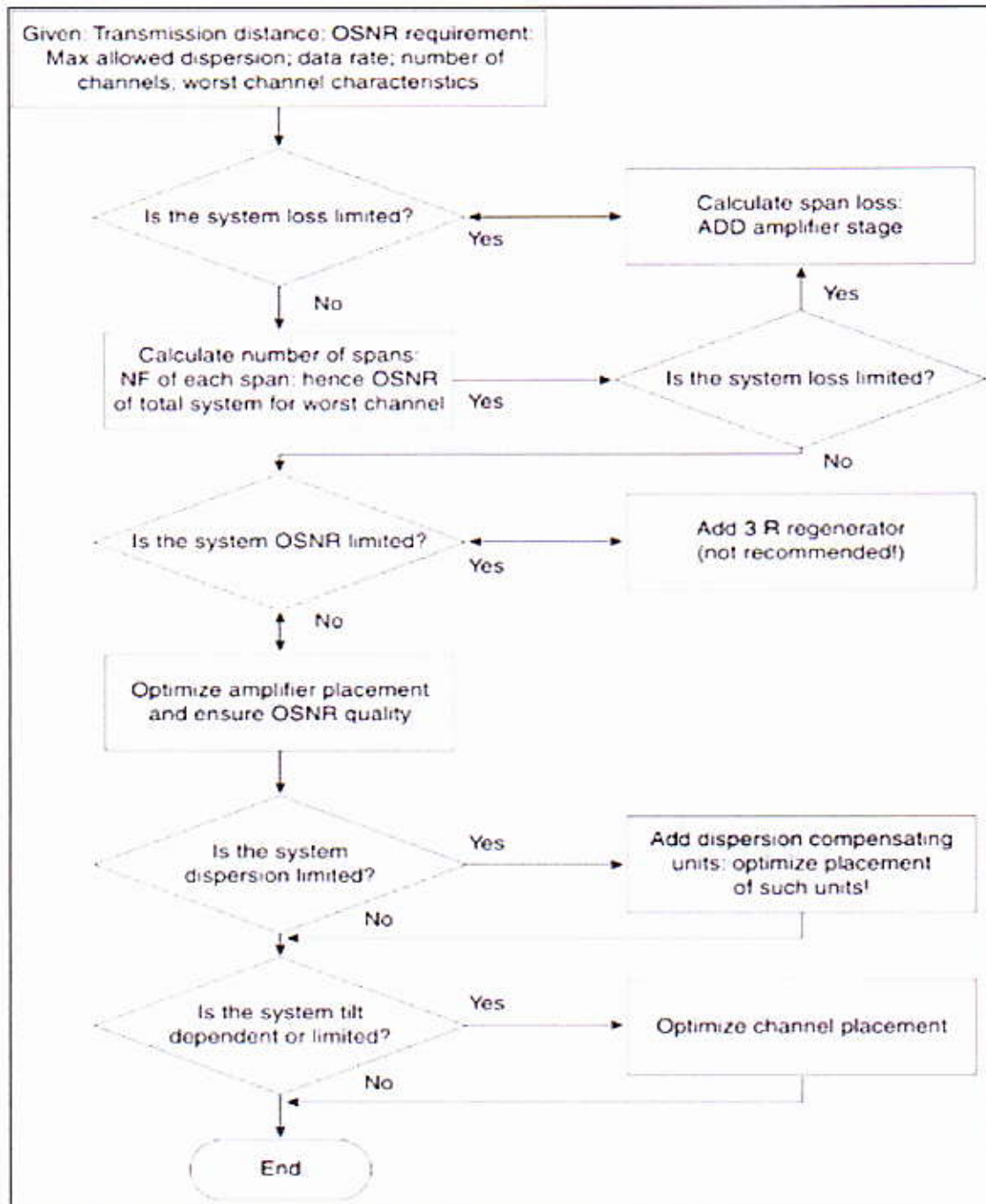
A pesar de que el enrutamiento totalmente óptico es difícil de aplicar, es el enfoque prometedor en la ruta del camino óptico más corto, y que fácilmente puede llevar a cabo mediante el uso de la arquitectura OXC. Una de las características claves de OXC's es su naturaleza óptica.

Un OXC puede cambiar cualquier recorrido óptico *lightpath* de cualquier puerto a otro. Una tecnología candidata idónea para esto es MEMS.

En el *lightpath* se debe tener en cuenta que el número de enlaces es igual al número de fuentes únicas de pares de destino (asumiendo comunicación Half-Duplex por par), en contraste con a figura 103, que se tiene 6 nodos de tal manera que el número de enlaces es igual a dos veces el número de nodos en la red. Obviamente, esto significa que el número de enlaces en un anillo es mucho menor que el número de enlaces en una red de malla. Esto significa ahorro de costos.

Pero la pregunta es cómo asignar un *lightpath* para un par origen destino que está bastante lejos (en otras palabras, no adyacentes). Considerando una solicitud de *lightpath* de nodo A al nodo C. Debido a la ausencia de un vínculo directo entre A y C, se tiene que recurrir a alguna conexión lógica. Se puede establecer una *lightpath* dentro los nodos A y C a través del nodo B.

Figura 102. Diagrama de flujo diseño de red óptica

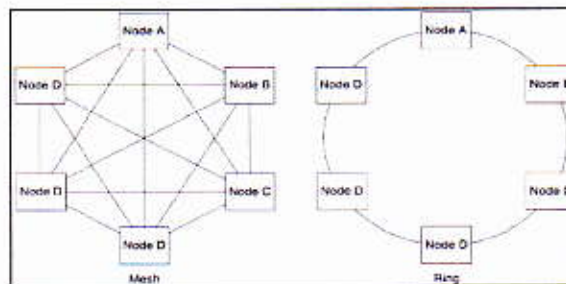


Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.159.

De manera que el nodo B actúa como un paso libre a través del nodo. Se puede hacer esto seleccionando una longitud de onda (a veces el problema es la limitación de lambdas) de tal manera que la longitud de onda este libre entre los enlaces AB y BC.

Luego se debe configurar la unidad de interfaz de nodo(s) de manera que el *lightpath* no se bloquee. Al terminar se tiene una AC *lightpath*, que es absolutamente ajeno al nodo B.

Figura 103. **Número de nodos red vs. anillo**



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.171.

En otras palabras, también se ha establecido una conexión lógica entre los nodos A y C. Esto significa que, aunque ninguna relación física directa está presente entre los nodos A y C, todavía se tiene relación lógica entre los nodos A y C a través de nodo B.

Las conexiones no se interrumpen en el nodo B, que en realidad es ajeno a los datos que fluyen a través de ella. Este tipo de diseño de la topología se suele denominar diseño virtual o lógico. Esto significa que para una topología física dada, se puede trazar una topología lógica dinámica para apoyar la

demanda de tráfico dada en un momento determinado, utilizando un número fijo de recursos (por lo general longitudes de onda).

Se puede hacer frente a este problema de varias maneras, una forma de hacerlo es tratar de diseñar una topología lógica que se puede incorporar a una física existente para el número de conexiones lógicas que se establezcan.

#### **5.4. Clasificación del diseño de las redes ópticas basadas en el tamaño geográfico y funcionalidad**

El mercado de redes ópticas está dividido en tres segmentos principales para facilitar el análisis, así como la orientación al cliente. La división se basa en el tamaño de la red a causa de las dimensiones físicas.

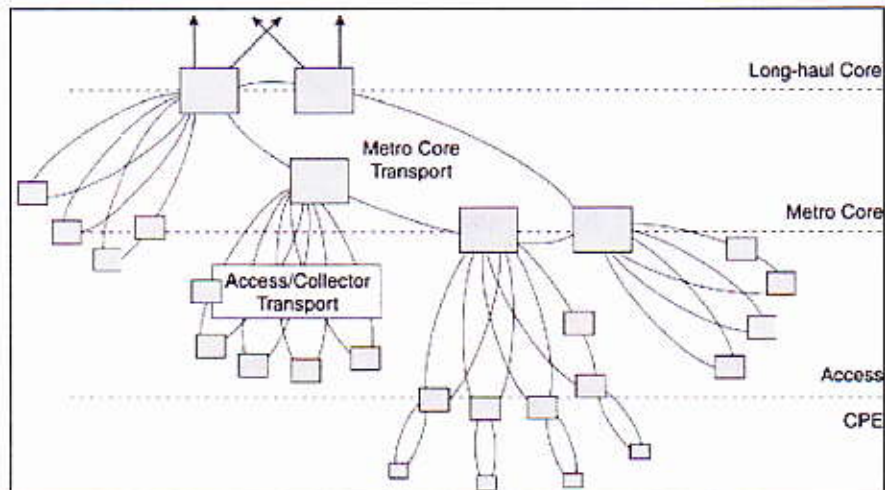
Para los enlaces *DWDM* a velocidades bajas, no hay problema de las deficiencias debido a la no linealidad. Del mismo modo, la dispersión no se convirtió en un peligro potente para la transmisión hasta que los niveles de transmisión alcanzaron un valor de corte. Para mantener una buena transmisión óptica, es necesario instalar equipos de compensación de dispersión, así como amplificadores ópticos para garantizar que la señal llega al receptor a un nivel de alimentación adecuada. La distancia de transmisión juega un papel muy crítico en la determinación de los costos de la red.

En última instancia, los costos son lo que guían el mercado, por lo que tiene perfecto sentido para clasificar a las redes basándose en las distancias de transmisión o tamaños geográficos.

Las redes se clasifican en tres categorías principales, correspondientes a su tamaño y funciones.

El primer tipo es el de las redes de acceso o metro, o simplemente las redes de acceso.

Figura 104. Segmentación de redes



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.174.

El segundo tipo de clasificación es el de redes de área metropolitana o regional, la última clasificación es la larga distancia así como la ultra larga distancia (submarina e intercontinental). Se presentará adelante que el tamaño de la red exige el aumento considerable del costo de la red.

La nomenclatura de clasificación es una jerarquía de tres niveles, basado principalmente en las distancias de transmisión. La primera segmentación es el nivel de red de acceso. En el siguiente nivel la red principal metro, y en el nivel superior la red de larga distancia.

Los clientes de la empresa entran en la capa del cliente (CPE) donde los clientes finales están conectados a la red del proveedor de servicios como se ve en la figura 104 y se detalla en la tabla XII.

Tabla XII. Comparación de redes

Redes	Metro Access Network	Metro Core Network	Long Haul
Topology	Ring	Ring/mesh	Point-to-point /ring and mesh
Traffic Flow	Hubbed	Distributed/meshed	Hubbed
Ring circumference / length	40-75 km Smaller rings also possible	< 100 to 250 - 300km	< 300 + to 2000 km
Wavelength supported	Up to 16 lambdas	32 to 64 typical	64+
Number of nodes in the ring	6~8	8~16	5--12
Distance between the node (span length)	10-30 km	40~300 km	300 + km
Current market size	20~30%	50~60%	10~20%
DWDM technologies (not limited)	Mux/ Demux OADM Electrical switching and routing	Mux/Demux OADM EDFA (amplifier) DCU Wavelength-tunability Electrical switching and routing/limited all optical switching	Mux/Demux OADM EDFA (amplifier) DCU ,PMD, Wavelength tunability , All optical switching and routing

Fuente: elaboración propia.

## 5.5. Arquitectura nodal y canal óptico de servicio

El elemento más importante de una red es el nodo. Para la jerarquía de capas *DWDM*, diferentes configuraciones tienen diferentes propósitos, cada adición representa un nuevo listado de requerimiento. De hecho las redes de acceso, metro y el núcleo de la red tienen su propia y única arquitectura nodal. Una buena arquitectura nodal se caracteriza por la inserción de baja pérdida baja dependencia de polarización y pérdidas dependiendo de la longitud de onda, alta escalabilidad y buena capacidad de bahías de conmutación.

Además de las características anteriores un nodo también debe ser capaz de configurar y comunicarse con otros nodos sobre el establecimiento de *lightpath*. El nodo lo hace a través del sistema de gestión de redes (NMS), que suele ser construido para proporcionar información de extremo a extremo a en la red. El usuario de control de servicios de los elementos nodales utiliza el sistema de elementos de gestión (SME), que es como un instrumento operativo para el funcionamiento del nodo local en diversos escenarios.

El NMS realiza el establecimiento rápido de *lightpath* y la des- habilitación de la red así como también se involucra con otros niveles importantes de la red. El nodo se comunica a los otros nodos desde una posición local a través de un canal con banda de salida y banda de entrada llamada canal de servicio OSC. Que generalmente es un canal que desciende en cada nodo. La OSC es como el sistema nervioso de la red, se informa a los dos nodos vecinos de los detalles de la red en cualquier punto dado.

Normalmente, OSC lleva información relativa a la ruta donde el enrutamiento se basa en algoritmos de ruta más corta (SPFs). OSC es utilizado



para descubrir topologías e identificar vecinos, así como también se utiliza para disposición de restaurar y proteger la red.

El nodo crea una tabla de topología y la tabla *lightpath* utilizando los datos recopilados durante el proceso de descubrimiento.

Por último una tabla de enrutamiento se deriva para el enrutamiento automático de *lightpath*, OSC también reporta los rendimientos de la red y ayuda en la toma de decisiones durante el establecimiento de *lightpath*, este procedimiento se puede apreciar en cada uno de los nodos en la figura 105

OSC genera este reporte, difunde la información y toma decisiones propagando las tablas de *lightpaths* con longitudes de onda utilizadas y no utilizadas la fuente y el destino de estos *lightpath* en todo momento.

Normalmente, OSC trabaja a una tasa de transmisión menor a OC-3 (155 Mbps), pero algunos OSCs se han reportado en OC-12 de alta velocidad, aunque no existe un estándar para esta velocidad, depende de las exigencias de la red. La velocidad baja se puede atribuir a dos causas principales; en primer lugar no hay mayor cantidad de información que se transmita entre cada nodo, en segundo lugar la OSC tiene que bajar en cada nodo, así que la interface óptica tiene que ser de bajo costo.

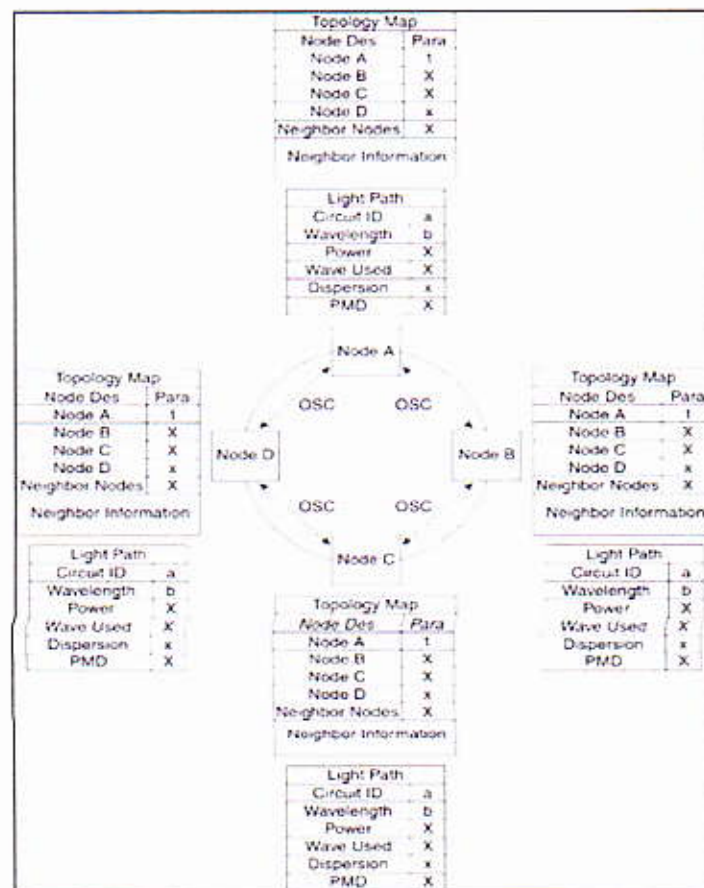
Las tarjetas de mayor tasa de bits son de un precio más elevado, por lo general OC-3 es una buena alternativa. La OSC esta típicamente en 1 510 - 1 520 nm, y no es necesario definirla en la separación entre canales por la UIT.

La importancia de la OSC está creciendo debido a la rápida normalización de los procedimientos de señalización para el establecimiento de *lightpaths*.

El multiprotocolo de conmutación de etiquetas (GMPLS) es una aplicación nueva y un paradigma para la señalización en las redes ópticas, que se implementa utilizando el canal de servicio óptico.

Conforme las redes ópticas vayan madurando, la OSC tendrá un papel más destacado en dictar la heurística de la red y en la capacidad de obtener ingresos.

Figura 105. Topología por nodo



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.184.

## 5.6. Protección en la red DWDM y protección de conmutación

En la capa óptica o DWDM, una *lightpath* está configurada usando un mecanismo de control relacionado con los ingresos y egresos, los nodos intermedios y equipo, además de las fibras para crear *lightpath*.

La falta de equipo/fibra/nodos puede causar la interrupción de un *lightpath*, resultando en una enorme pérdida de ingresos. La protección de *lightpath* es un medio por el cual las pérdidas por fibra o equipo puede ser superado.

La protección esencialmente significa añadir un cierto grado de redundancia o la diversidad de la red. La porción redundante de la red se utiliza para proporcionarle capacidad a la red de protección en caso de falla o avería.

En principio, la protección es un fenómeno rápido tal que el fallo de *lightpath* es conmutado a la redundancia en el menor intervalo de tiempo. Una red óptica tiene varias clases de fallas. La falla más común es la de equipo. El fallo de equipo representa el 70% de todas las fallas y es el resultado de varios factores como envejecimiento, mal funcionamiento y error humano.

La protección de las redes de equipo o de fallas de un sistema es una tarea difícil. La única manera de proteger una red de fallas de equipo, es el despliegue de equipos redundantes como equipo de protección y cambio del equipo normal para el equipo redundante en caso de una falla.

Algunos algoritmos realmente describen y facilitan la forma en que la señal se transfiere desde el equipo normal al equipo redundante y también describir cuando este cambio se debe hacer. La falla de los equipos también puede

sucedan en la falla del nodo completo. Esto puede ocurrir debido a los cortes de energía o incluso errores humanos.

El error nodal es difícil de proteger a menos que el fallo sea parcial, el nodo se restablece hasta que los ejercicios de rectificación se llevan a cabo. Un fallo de nodo puede ser considerado como el fallo multienlace.

La siguiente falla común, después del fallo del equipo es la falta de fibra, que es más comúnmente conocida como corte de fibra.

Corte de fibra son las fallas causadas por el daño causado a las fibras en funcionamiento ya sea daño físico o de curvaturas graves de flexión (aumentando así sus pérdidas aceptables), se pueden proteger los cortes de fibra con fibras redundantes y cambiando la señal normal a camino redundante.

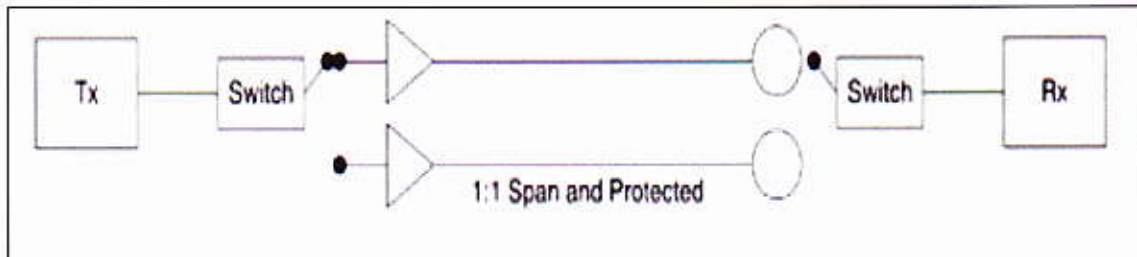
La protección de redes se puede clasificar en dos tipos: protección de línea y protección de recorrido.

La protección de línea significa la protección de la línea entera o toda la banda de los canales *WDM* en el caso de un corte de fibra o falla figura 106.

En contraste, la protección del camino, protege solo los *lightpath* que han fallado (ver figura 107). Por lo tanto, la protección del camino es más específica y más difícil de aplicar.

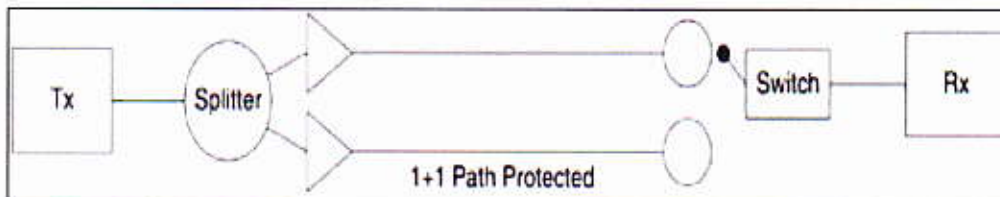
En las redes convencionales de *SONET*, la protección de línea y de camino ha sido incorporada a la topología anillo por dos regímenes distintos, ruta de acceso uni-direccional de conmutación de anillo (*UPSR*) y la línea bidireccional de conmutación de anillo (*BLRS*).

Figura 106. **Protección de enlace (note que cada transmisor y receptor tienen su conmutador)**



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.189.

Figura 107. **Protección de enlace (Note que solamente recepción posee conmutación)**



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.190.

Se puede extender el mismo régimen a las redes *DWDM* en una variedad de topologías. Para el camino de protección de conmutación punto a punto o topología de malla o incluso anillos *DWDM*, la protección que se conoce como 1+ 1. Por otro lado la protección de conmutación de línea el esquema es llamado protección 1:1.

Para el camino de conmutación 1+1. El transmisor o el nodo transmite la señal de entrada de trabajo y la de protección de forma simultánea (*DWDM lightpath* en longitudes de onda lambda especifica). En el receptor o el nodo de

salida, el receptor elige la señal ya sea del trabajo o la ruta de protección, dependiendo de la cantidad de señal.

En esencia este tipo de sistema es fácil de manejar porque la decisión de cambio se toma solo por la sección de receptor y no es de múltiples secciones. Se tiene en cuenta que es mejor tener el trabajo y la protección de camino en las diferentes fibras, que la diversidad física exultante.

En cambio, en el sistema de 1:1 o de conmutación de línea como en la figura 107, la señal se envía sólo en la sección de trabajo, mientras que en un canal de protección sirve como una copia de seguridad, múltiples canales de trabajo geográficamente diverso.

En el caso de una falla, tanto el emisor como el receptor de la necesidad de coordinar entre sí y cambiar la señal de sección al canal de protección como se puede ver en las figuras 106 y 107.

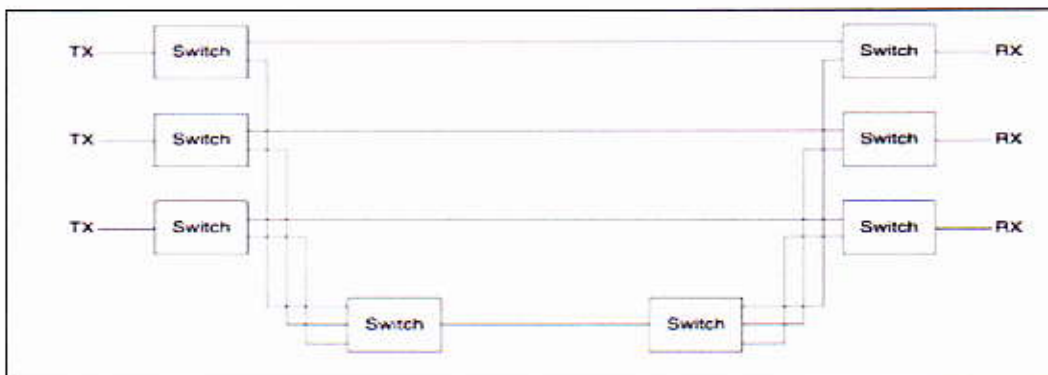
Naturalmente, el formato de la protección 1+1 es una manera mucho más fácil de garantizar la protección rápida (el tiempo de restauración es mínimo) Q, pero el costo relacionado es más y más ancho de banda (recursos) necesaria. La protección 1:1 en cambio no es tan rápida en términos de tiempo de restauración, pero el costo que implica suele ser bastante inferior a pesar de que el procedimiento de señalización es a menudo engorroso debido a que están involucrados señalización en ambos sentidos a la vez.

Sin embargo, la protección 1:1 tiene la ventaja de optimizar el ancho de banda de protección entre los muchos trayectos de trabajo. Este tipo de sistemas es también conocido como protección 1:N , mediante el cual una ruta

de protección puede ofrecer una protección de una de la fallas en cualquiera de las N fibras (una falla en un momento véase la figura 108).

Cuando el algoritmo de protección es 1:1 (es decir cada canal tiene su recurso para garantizar la protección), el régimen también se le llama protección dedicada o más técnicamente, protección dedicada 1:1, por otro lado la protección 1:N se le denomina protección compartida. La protección compartida de ruta de acceso compartido es también un concepto interesante para la concesión de protección a *lightpath* individuales en los anillos de *DWDM* metro.

Figura 108. **Protección 1: N (protección compartida)**



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.190.

### 5.6.1. Protección para diferentes calidades de *lightpath*

La forma más simple es el modelo de protección especial en el que cada *lightpath* tiene su propio y completo ancho de banda que se asignan de acuerdo al evento de fallo, el *lightpath* es protegida utilizando los principios básicos de 1:1 ó 1+1.

Un tema importante en la protección, es el tiempo de retardo para que entre en función la protección. Cuando necesitamos proteger un fallo *lightpath* o enlace, se necesita ejecutar un algoritmo que determina en realidad el fallo, luego se reasignan la información a la *lightpath* de fallo, y se coordinan los recursos del transmisor y el receptor, esto tiene una cantidad finita de tiempo.

Previamente, se hizo notar que la protección 1+1 es mucho más rápida y sin fisuras comparado con la protección 1:1. Por supuesto la desventaja de esta es el costo involucrado. En las redes de voz y de modelos *SDH*, el tiempo de protección deber ser inferior a 50 metros. Esto es difícil de lograr si los recursos de protección son muy dinámicos, en el sentido que múltiples algoritmos deben ser ejecutados y las decisiones que deben hacerse para asignar los recursos de protección.

En las redes de anillo, la idea es tener el *lightpath* de trabajo en el camino corto y tener el *lightpath* de protección en el camino largo (esta dos siempre son dos direcciones opuestas). Esto significa que una buena forma de implementar los anillos *DWDM* es asegurarse de que hay dos fibras; una en sentido horario (CW) y el otra en sentido contra reloj (CCW).

El acceso de canal de protección (ACP) es una clase de tráfico que tiene una menor prioridad que el tráfico de trabajo. Cuando la red esta sin fallas, el ancho de banda que se asigna a la protección puede ser utilizado para desplegar *lightpaths* adicionales. Sin embargo, cuando se produce un error, esta clase de tráfico de baja prioridad es el primero en ser descartado.

Esta clase de tráfico es también considerado simplemente el tráfico sin protección. Muchas aplicaciones de bajo costo utilizan hoy en día un plan de



tránsito de PCA. Debido a los costos de fibra son muy caros, PCA al igual los métodos de maximización de fibra eficiente utilizan todos los canales.

### **5.6.2. Protección de malla**

En los anillos, los algoritmos de protección son sencillos. El camino más corto es el camino de trabajo y el camino más largo el de protección.

Las redes de malla pueden contener varias rutas de protección. Es importante elegir el mejor camino de protección. Esta decisión podría incluir algunos aspectos de balanceo de carga dinámica, así como la selección de ruta.

En el mejor ejemplo, los ciclos de protección son creados para una topología de  $N$  nodos, tal que para un ciclo dado la trayectoria de trabajo está acorde a el ciclo y la trayectoria de protección está acorde al arco complementario.

## **5.7. Asignación de onda y ruteo**

### **5.7.1. Los inconvenientes básicos**

Se considera una red con  $N$  nodos y enlaces arbitrarios. Ahora se supone que los enlaces  $E$  de fibra están dispersos, estos crean una gráfica de topología de red que conecta los  $N$  nodos en diferentes maneras arbitrarias.

Además se asume y se supone que cada enlace tiene  $2\omega$  en el mismo enlace, con  $\omega$  longitud de onda en cada dirección. Entonces, la capacidad de la

red en el número de *lightpaths* es  $E*2\omega/h$ , donde  $h$  es la distancia media del enlace.

El objetivo de un planificador de capacidad de la red es optimizar la red para algunos máximos de tráfico de matriz  $T_{rmax}$ . En otras palabras, se debe acomodar dentro de la topología física un número máximo arbitrario de *lightpath* entre los pares de fuentes dadas. Si bien se logra establecer el máximo de *lightpath* posible, estamos sujetos las siguientes limitaciones:

- Un *Lightpath* debe tener continuidad de longitud de onda. La misma longitud de onda se debe mantener por los *lightpath* enteros. En otras palabras, incluso si el *lightpath* atraviesa múltiples enlaces, debe estar en la misma longitud de onda en cada uno de los enlaces. Aunque cada nodo puede tener algunos elementos de conversión de longitud de onda, esta condición es generalmente rara y no se puede suponer
- La ruta debe hacerse para que sean caminos más cortos. Esto garantiza que se maximice la capacidad de la red
- Las longitudes de onda deben ser asignadas para reducir o minimizar el bloqueo de los *lightpath* adicionales. Algoritmos de asignación de longitud de onda se pueden hacer para optimizar la calidad particular en una red. El mejor ejemplo, se maximiza la reutilización de longitudes de onda y la capacidad
- Esto se hace mediante la asignación de longitudes de onda probabilísticamente más cortas, lo que maximiza su utilización. Este tipo de estrategia de asignación de longitud de onda puede ser considerado como de primer orden

- La reutilización de longitud de onda debe ser maximizado. Como se menciona en el anterior punto, la reutilización de longitud de onda es una característica importante de las redes ópticas
- Se puede lograr la reutilización de la longitud de onda en diferentes segmentos en la red.

Los resultados de la reutilización de longitud de onda da la diversidad espacial. La diversidad espacial aquí significa tener dos *lightpaths* en la misma onda, pero los dos *lightpaths* son disjuntos. En otras palabras, que no comparten un vínculo en común, por lo tanto, la *lightpaths* puede utilizar la misma longitud de onda. Los dos *lightpaths* espacialmente diversos.

El enrutamiento y la asignación de longitudes de onda pueden considerarse dos problemas separados, uno en el que las rutas físicas deben ser calculadas; así encaminando *lightpath* sobre estas rutas calculadas, y el segundo por el cual la longitudes de onda tienen que ser asignadas a estas rutas para *lightpath* de la manera más eficiente. Como se ve el enrutamiento y la asignación de longitud de onda sean dos problemas diferentes, solucionan la misma situación, optimización de la red para crear máximas ventajas.

La solución de estos problemas a menudo nos conduce a algoritmos con los altos niveles de complejidad computacional.

Se puede ver el enrutamiento y la asignación de longitud de onda (RWA) como análogo al diseño del sistema óptico, por el cual los recursos de la red (en este caso longitud de onda y rendimiento, mientras que en el caso de diseño del sistema hablamos de *OSNR* y *BER*) son optimizados o maximizados. Una de las soluciones más adecuadas para tratar de resolver el problema RWA es

romper los dos problemas en un conjunto de sub- problemas, en el que cada sub-problema se resuelve para obtener un valor de optimización. Los enfoques pueden ser los siguientes:

- Encontrar un algoritmo de asignación de longitudes de onda que tiende a favorecer el tráfico óptico y la obtención de una conexión (lógica) gráfica para él.
- Desarrollo de un sistema de enrutamiento que permita obtener la gráfica que muestre la probabilidad más baja de bloqueo.

La restricción en este caso es que no puede haber dos *lightpath* en el mismo enlace con el mismo color o longitud de onda. Además, la segunda restricción es la de la continuidad de la longitud de onda, por el cual la propagación completa de *lightpath* a través del enlace de diferentes fibras debe tener la misma longitud de onda.

Sin embargo la segunda restricción se puede obviar, si suponemos que la conversión de longitud de onda en los nodos se hace en nodos intermedios.

### **5.7.2. Asignación y ruteo de lambda y programación lineal**

Para maximizar el desempeño de una red óptica *WDM*, es imperativo para dirigir el conjunto de las demandas de la manera más adecuada (en las rutas de la mejor manera posible y utilizando la asignación de longitudes de onda adecuada). Para un determinado gráfico de la red  $G(V,E)$ , donde  $V$  representa vértices (nodos) y  $E$  representa la relación que une a estos vértices (enlaces de fibra), se tiene una matriz de tráfico  $T$  (teniendo en cuenta la carga) que debe ser satisfecha de la mejor manera posible.

En otras palabras, se tiene que crear *lightpaths* para cada uno de los elementos distintos de cero en  $T$ , la matriz de tráfico.

Matemáticamente esto significa que se tiene que establecer para cada *lightpaths*  $T_{ij} > 0$  donde  $i, j$  son elementos de matriz de nodo ( $V$ ).

Si bien la creación de esta *lightpaths* y el ajuste de la carga en la red, se tiene que considerar las limitaciones que rigen la expedición y la filosofía de asignación de longitud de onda.

Esta ausencia de convertidores de longitud de onda en cada nodo, se tiene que garantizar que cada *lightpath* está sujeto a la restricción de a continuidad de longitud de onda.

Esta limitación asegura que cada *lightpath* tiene la misma longitud de onda en cada una de sus fibras. También se debe garantizar que no hay dos *lightpaths* en la misma longitud de onda en un enlace de fibra dada. Se puede lograr esto de varios modos.

Se puede usar el enrutamiento del camino más corto, otra forma, se asignan longitudes de onda primero a *lightpaths* sobre caminos cortos y luego asignando longitudes de onda a *lightpath* más largos (en orden ascendente de número por método de salto). La reutilización de longitud de onda es un parámetro que determina la eficacia de la red.

Como se puede ver en esta discusión, el enrutamiento y la asignación de longitud de onda son problemas con múltiples entradas, múltiples limitaciones de trabajo y varias soluciones de las cuales solo unas son óptimas.

Para solucionar un problema RWA, se tiene que hacer uso de soluciones complejas en las matemáticas.

En la búsqueda de una solución al problema RWA, se puede esperar muchas implementaciones posibles, software de simulación y gráficos de Excel son buenos métodos para proporcionar una solución a estos problemas.

### 5.7.3. Gráfica coloreada aprovechando la asignación de lambda

Para una determinada red y un conjunto de demandas de tráfico, es importante asignar a longitudes de onda a *lightpath* manualmente.

Algunas de las redes actuales se caracterizan por un pequeño gráfico (en tamaño) y baja cargas. Un método intuitivo y de manera sencilla de asignar longitudes de onda para *lightpaths* es el gráfico de enfoque de colores. Este enfoque es un problema matemático legendario por el cual los nodos de un gráfico son coloreados tal que ninguno de los dos nodos adyacentes tienen el mismo color.

Ampliando este enfoque a las redes ópticas, consideremos la red que ha de darse por un gráfico  $G(V,E)$ . En otras palabras,  $V$  representa vértices (nodos) y  $E$  representa los bordes (enlaces). Además, si se nos da una matriz de tráfico  $T_{i,j}$  donde  $i, j$  son elementos de  $v$ , se puede enrutar estas demandas de  $T$  sobre la mejor ruta posible (que podría ser el camino más corto). Ahora se puede dar a cada *lightpath* un nombre único tal como:

$$W = \{w_1, w_2, \dots, \dots, w_{(i,j)max}\}$$

Es el conjunto de *lightpath* que conforma la carga de  $T$ .

Se puede dibujar un gráfico de  $G(W, P)$  cuyos nodos son los *lightpaths* que se han llamado el conjunto  $(w)$ . Además, se puede dibujar un puente unidireccional entre dos nodos o más que compartan un enlace. Repetir el procedimiento para dibujar los puentes sobre todos los *lightpaths* que compartan un enlace en común, así se obtiene el gráfico  $G(W, P)$ .

Ahora la gráfica de color  $G(W, P)$  tal que ninguno de los nodos enlazados tienen el mismo color. El significado físico es que si dos nodos son adyacentes, ellos tienen al menos un enlace en común (*lightpath*) entre ellos.

Sobre la terminación del procedimiento de coloración, conseguimos entonces obtener un nodo cuyos nodos son las conexiones *lightpath*. El color de estos nodos corresponde a la longitud de onda que son usados. Entre más colores existan, serán más las longitudes de onda necesarias para enrutar las conexiones  $(T_{ij})$  sobre la  $G(V, E)$ .

Un enfoque más heurístico para colorear el gráfico es el enfoque secuencial. Los dibujos para colorear todas las demandas (nodos) simultáneamente, es un procedimiento difícil, y se dice que es NP completo (lo que significa que tomará un largo tiempo de forma exponencial de cálculo). El enfoque secuencial es muy modular, de tal manera que al colorar el gráfico se hace como van llegando los *lightpaths*.

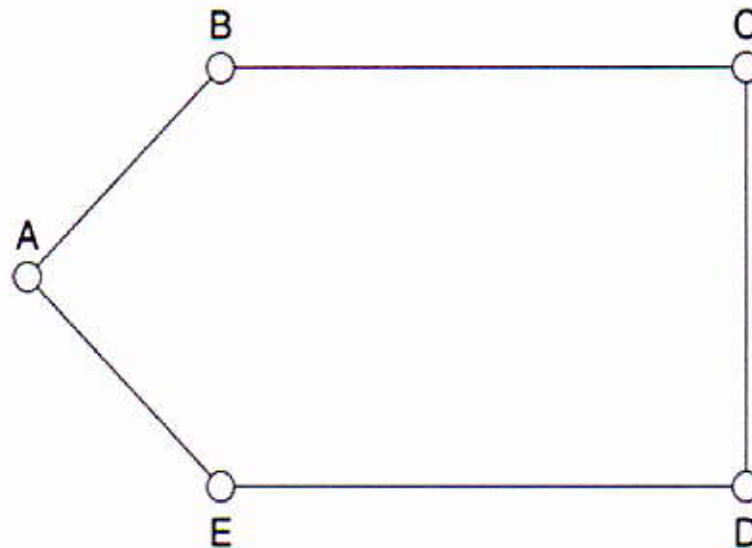
En otras palabras, como los nuevos nodos en el gráfico (*lightpaths*) llegan, se colorean tomando en cuenta sólo el color anterior de la gráfica en lugar de tomarla toda la gráfica y la reasignación de los colores le da la forma más adecuada (usando el número mínimo necesario de colores). Si el gráfico de *lightpath* (como nodos) tiene vértices  $V$  (*lightpath*  $V$ ) y el grado de éstos está dado por el conjunto  $D = (D_1, D_2, \dots, D_V)$ .

Entonces el número máximo de colores necesarios (longitudes de onda necesarios) está dado por:

$$C_{max} = \max\{D_i\} + 1$$

Para un ejemplo numérico consideremos la figura 109:

Figura 109. **La topología básica**



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p. 224.

Si el tráfico enrutado es el siguiente;

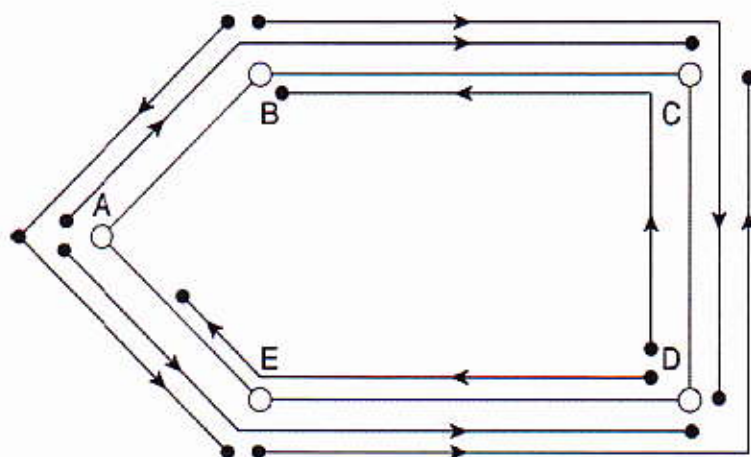
- AEC
- ABD
- BCD
- BAE
- EDC
- DCB
- DEA



Cada una de las siete demandas representa un *lightpath* desde el origen al destino a través de un nodo intermedio. Nótese, sin embargo que hay que establecer la *lightpath* bajo la continuidad de longitud de onda y también la restricción que no pueden haber dos en una conexión física que tengan la misma longitud de onda.

Se enruta la solicitud y el color de la gráfica para obtener el número mínimo de longitudes de onda. Se muestra en la tabla XII como queda el esquema de asignación de longitud de onda basado en los resultados de la figura 110.

Figura 110. Enrutador del tráfico sobre la topología



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.225.

De la tabla XII se puede ver que el número requerido de lambdas es 4. Se puede verificar esta solución considerando el nodo con el más alto grado y el

uso de la ecuación teórica  $C_{max} = \text{Max}(D_i) + 1$ . El número máximo de grados es 3 por lo tanto  $\text{Max}(D_i) = 3$ . De donde  $C_{m\acute{a}x} = 3 + 1 = 4$  colores.

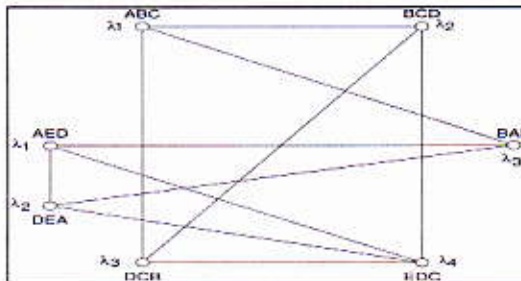
Tabla XIII. **Asignación de lambdas**

Node	Color $\lambda$	Node	Color $\lambda$
AED	$\lambda_1$	EDC	$\lambda_4$
ABC	$\lambda_1$	DCB	$\lambda_3$
BCD	$\lambda_2$	DEA	$\lambda_2$
BAE	$\lambda_2$	-	-

Fuente: elaboración propia.

Los nodos en la figura 111 y los círculos representan *lightpath* establecidos. Si un enlace existe entre dos nodos (*lightpath*) los dos *lightpath* comparten una fibra.

Figura 111. **El gráfico de *lightpath***



Fuente: ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. DWDM network designs, p.226.

Si consideramos 40 colores y 100 conexiones *lightpath* más de 10 ó 16 nodos, se podría imaginar lo difícil que podría establecer tal esquema, por lo tanto la programación lineal es una solución viable para los gráficos grandes con muchas longitudes de onda.

#### 5.7.4. Creación estática y dinámica de *lightpath*

Dos tipos de técnicas para establecer *lightpath* merecen la atención. Establecimiento de *Lightpath* estáticas (LES) y el establecimiento de *lightpath* dinámicas (LDE) ambas son cuestiones importantes en la red de hoy y su solución tiene efectos directos sobre la planificación de la red, principalmente en gastos de capital (CAPEX) y la reducción de los gastos operativos.

El primer caso, el establecimiento *lightpath* estática, es el problema RWA para un conjunto de pre conocidos *lightpath*. En otras palabras, el conjunto de demandas o de la matriz de tráfico que se conoce " en mano". Se tiene para la ruta *lightpath* en el más eficiente camino para minimizar el número de longitudes de onda requeridos.

Para la asignación de *lightpath* estáticas, se puede poner primero la ruta del camino más largo y luego la ruta del *lightpath* más cortó. La suposición aquí es la continuidad de longitud de onda, por el cual ninguna conversión de longitud de onda en nodos intermedios es asumida.

Otra de las soluciones para establecer *lightpath* estáticas es mediante la asignación de *lightpath* con la distancia más corta del primer salto. El establecimiento de *lightpath* estático es un problema en las redes de hoy en día, cada solución tiene sus pros y sus contras.

El segundo caso es el establecimiento de *lightpath* dinámicas, para una red que se somete a cargas de tráfico diferentes, se deben asignar longitudes de onda y ruteo de *lightpath* de modo de obtener el rendimiento máximo (mayor número de *lightpaht* establecidos) sobre un período de tiempo.

Los parámetros de optimización son considerados en el hecho que en un momento dado, se verá en la necesidad de ser capaces de asignar el número máximo de *lightpath* en la red.

En este momento se debe ser capaz de enrutar y asignar el número máximo de *lightpath* en la red, y satisfacer el máximo número de demandas llegado el momento incluyendo las demandas antiguas.

Esto reduce la probabilidad de bloqueo de *lightpath*. La probabilidad de bloqueo es la razón da la que *lightpath* rechazada contra las requisiciones de *lightpath* referirse a la ecuación (BP) probabilidad de rechazo.

$$Bp_{Ligh-path(DLE)} = \frac{\text{Number of lighpath rejected}}{\text{Number of lightpath requested}} \dots [1]$$

El objetivo es reducir al mínimo la cantidad de bloqueo, o maximizar la probabilidad de que una *lightpath* comience satisfactoriamente tomando en cuenta el algoritmo RWA que es implementado. Una vía de hacerlo es mediante el enrutamiento de *lightpath* de acuerdo al algoritmo de enrutamiento de camino menos congestionado (LCP). Este esquema, nos muestra, si múltiples caminos están entre la fuente y el receptor destino, una petición es encaminada sobre la ruta menos congestionada.

La ventaja de este algoritmo es que la congestión global de la red está bajo control. Esto significa que se puede enrutar las solicitudes adicionales siempre y cuando la congestión de la red en un vínculo es menor a  $\lambda_{max}$  el número máximo de longitudes en la fibra.

### 5.7.5. Diseño virtual de a topología

Considérese una topología física dada representada en el gráfico  $G(V,E)$ , donde  $V$  representa el conjunto de vértices y  $E$  representa el conjunto de bordes, también considérese un matriz de tráfico determinando  $T$ , que básicamente nos da el tráfico de *lightpaths* entre cada par de origen – destino en la red de trabajo.

Se tiene que crear una topología virtual o lógica de la forma más eficiente para asignar el conjunto de demandas más optima en la matriz  $T$ . Se tiene que satisfacer algunas restricciones antes de crear la topología virtual, como ejemplo, uno de los obstáculos es que el número de *lightpaths* a través de cualquier enlace deber ser menor o igual a la longitud de onda en la fibra, y en ausencia de la conversión de longitud de onda, la propagación *lightpath* a través de múltiples enlaces deben tener la misma longitud de onda en cada enlace (continuidad de longitud de onda constante).

Para un nodo  $N$  y longitud de onda  $W$ , se considera a topología de la red para ser representada por el gráfico  $G(V,E,W)$ , donde  $|V| = N$ , y  $E$  representa los bordes o enlaces con longitudes de onda  $W$  en cada dirección. Si  $F_{m,n}$  es el número de fibras que contar los nodos  $m$  y  $n$ , entonces el número de enlaces de fibra en la red se puede mostrar cómo:

$$\sum_m \sum_n F_{m,n} = L$$

Por otro lado,  $\theta_{mn}$  es la longitud en kilómetros del nodo  $m$  al nodo  $n$ ;

$$\frac{\phi_{mn}}{c} = \Delta_{mn}$$

Es el retraso entre m y n en el tiempo, Tsd es la matriz de tráfico, y la máxima capacidad de cada canal es Bmax. Entonces;

$$\gamma_{ij}^{sd}$$

Denota el tráfico entre s y d sobre el enlace físico i, j. Entonces, la ecuación de la topología de diseño virtual se da en la ecuación RR como un problema de minimización.

$$\text{minimize } \frac{1}{\sum_{s,d} Tsd} \sum_{ij} \sum_{sd}^1 W X_{ij}^{sd}$$

En otras palabras se tiene que reducir al mínimo la distancia media del flujo o del salto de *lightpaths* sobre el sistema de acoplamientos dados de la manera más óptima. Mientras que se reduce al mínimo la distancia media del salto, como la distancia de salto media es reducida al mínimo, el rendimiento neto de la red es maximizado y la probabilidad de obstrucción de *lightpath* es reducida al mínimo.

En el proceso conseguiremos una matriz  $V_{ij}$ , que se llama la matriz virtual de la conexión de la topología. Las limitaciones que se debe considerar son la restricción de la continuidad de la longitud de onda, así como el retraso del enrutamiento de la red. Otros temas que en futuro se deberán tener en cuenta son la congestión o la carga en el comportamiento de la red y limitación de sintonización de longitud de onda.

## 5.8. Diseño e implementación de anillo DWDM (instalación)

El requerimiento del análisis de una nueva alternativa para mantener una red de transmisión óptima, por parte del operador se basa en el disparo de la demanda del ancho de banda de la red, en gran parte debido a tráfico de datos, especialmente del *back bone*. De lo anterior, el operador de telefonía tiene dos opciones, instalar nuevas redes de fibra o aumentar eficazmente el ancho de banda de la fibra existente. Entre estas dos opciones el operador se ha inclinado por el aumento eficaz del ancho de banda de la fibra actualmente instalada utilizando la tecnología de multiplexión densa por división de onda.

A continuación se presentaran los datos de los estudios realizados, para el diseño que se llevo a cabo para la implementación final de esta red basándose en los criterios técnicos descritos hasta el momento. Para iniciar la exposición de esta solución es necesario explorar los requerimientos del operador.

Los requerimientos que se plantean para el diseño de la red DWDM son los siguientes:

- Se requiere un modelo de red, escalable y flexible, de manera que se pueda ir incrementando la capacidad de la red sin la necesidad de aumentar nuevos equipos y fibra óptica.
- La red debe ser capaz de manejar cualquier tipo de servicio, entre ellos se tiene: Ethernet, SONET/SDH, TDM, ATM, servicios de  $\lambda$  oscura (consiste en que el operador alquila al usuario una  $\lambda$  determinada dentro de la fibra).
- Se requiere utilizar un medio de transmisión eficiente y con pérdidas mínimas, necesariamente debe ser fibra óptica, pero aquella que esté

liberada en mayor grado de los factores de dispersión, atenuación y fenómenos no lineales. De manera que las capacidades de la fibra puedan ser aprovechadas al máximo posible.

- La red propuesta debe captar la mayor cantidad de aplicaciones actuales y futuras de los usuarios, por ejemplo: datos, voz, video, servicios de vpn, video conferencia, ipv6, etc.
- Los equipos de conmutación que se emplearán en la red óptica deben manejar las tecnologías propuestas *DWDM* y necesitan tener la capacidad de manejar los distintos tipos de aplicaciones antes mencionadas como Ethernet, *SONET/SDH*, *TDM*, *ATM*.
- Los nodos del *backbone* constituyen elementos muy importantes dentro del mismo, por ello su instalación deberá cumplir ciertos parámetros, basándose principalmente en las recomendaciones de EIA-TIA en cableado estructurado.
- El diseño debe contar con equipos de gestión, es decir con equipos de monitoreo constante de la red.
- Los enlaces deben estar diseñados para soportar las necesidades actuales y futuras de tráfico (por ejemplo, ancho de banda y velocidad).
- El trazado de la red de fibra y la ubicación de los nodos de red.
- En la arquitectura de red a diseñar se requiere una red convergente o una red formada por elementos de red capaces de conmutar en diferentes



capas de tecnología, por ejemplo *SDH* y *Ethernet*. Esto con el fin de optimizar el funcionamiento de la red y los costos.

- De acuerdo a los equipos de multiplexación, a la fibra óptica y al plano de control utilizado se debe tener parámetros de rendimiento del *backbone*. Se propone brindar SLAs (Acuerdo del Nivel del Servicio), por ejemplo, una disponibilidad del 99,99%, con una recuperación de fallas de 50 ms.
- Para poder implementar distintas políticas de comportamiento en el *backbone* y principalmente para que el proveedor ofrezca al cliente se deben tomar en cuenta parámetros que definen la Calidad de Servicio.

#### **5.8.1. Localización geográfica y cobertura de la red**

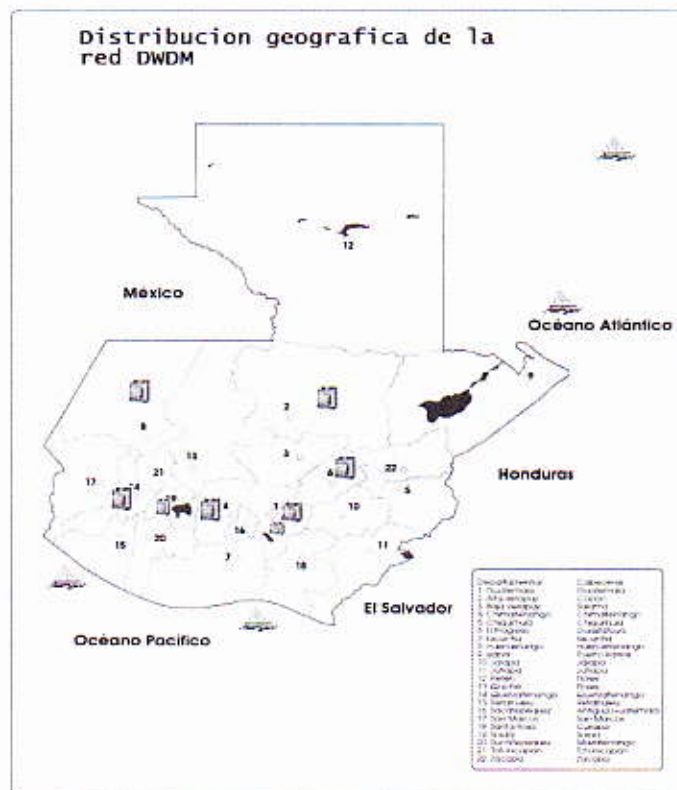
Dado que la tecnología escogida presenta sus mejores características con una arquitectura que permite cambiar su configuración para crecer y adaptarse, no sería recomendable implementar una red *DWDM* en nodos donde fuera innecesario, más bien en aquellos nodos donde se presente mayor concentración de tráfico.

De acuerdo al historial de la demanda del operador, las mayores cargas de tráfico se centralizan en las cabeceras de los departamentos de Guatemala, Chimaltenango, Quezaltenango, Sololá, Progreso, Huehuetenango, Cobán.

El operador cuenta con una red desplegada actualmente con tecnología *SDH*, los trayectos en los que se optimizara el ancho de banda dado por la fibra óptica instalada recorren siete departamentos de Guatemala, en los cuales se encuentran las estaciones designadas para realizar el diseño de la red *DWDM*.

De tal manera que la localización geográfica se tomará como se muestra en la figura 112.

Figura 112. **Distribución geográfica para nodos de la red DWDM**



Fuente: elaboración propia.

### 5.8.2. Análisis de tráfico

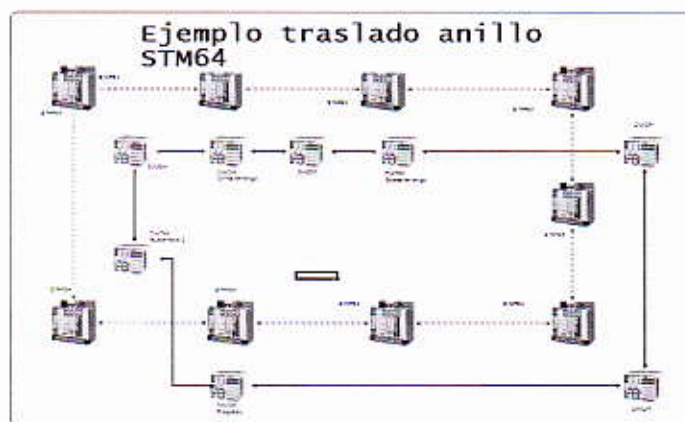
En lo que respecta a la demanda de tráfico, se puede decir que el crecimiento del mercado de las telecomunicaciones en Guatemala ha experimentado un vertiginoso crecimiento en los últimos cinco años.

Esto se debe a que se ha incrementado el número de clientes y el ancho de banda requerido para cursar las aplicaciones que día a día va creciendo, a medida que las necesidades de las empresas aumentan.

La presente red *DWDM* óptica debe ser capaz de soportar este crecimiento vertiginoso y así aliviar contratiempos técnicos y económicos, como puede ser congestión dentro de la red, incapacidad de soportar la demanda e inversión en nuevos equipos y fibra óptica a corto tiempo.

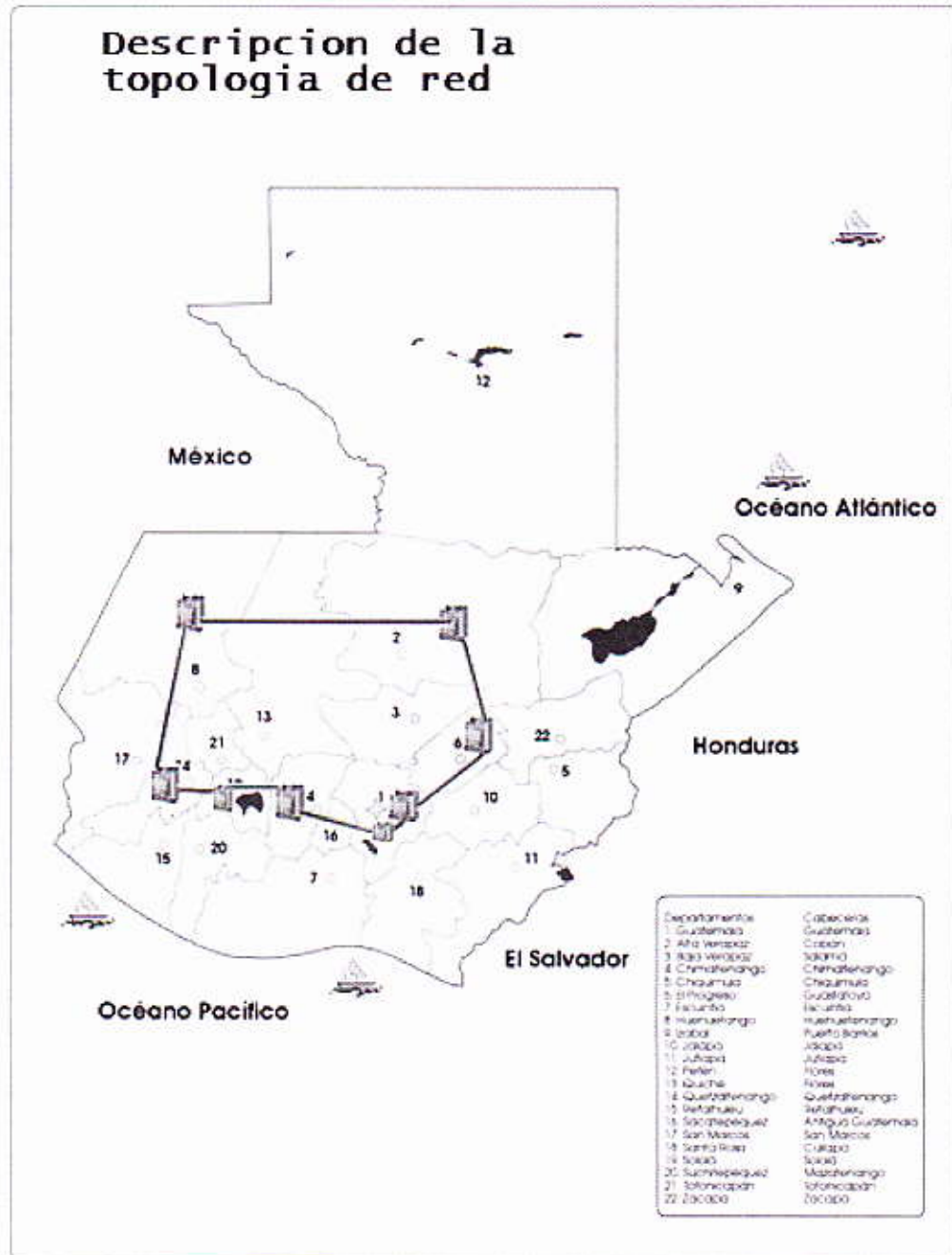
Como plan de acción del diseño de la red, se trasladará tráfico de alta importancia a la red *DWDM*, la capacidad de las interface de la tecnología alcanzada es de hasta 2,5 Gbps por lambda asignada. Se realiza el cambio de dos anillos STM64 (20 Gbps), figura 113, un anillo con la capacidad de STM16 (2,5 Gps), cada uno de estos en cuatro trayectos ópticos con sus respectivas lambdas de protección y dos interfaces 10 GBETH sin protección. Capacidad que alcanza a cubrir con 14 lambdas.

Figura 113. Traslado anillo STM64



Fuente: elaboración propia.

Figura 114. Descripción de topología



Fuente: elaboración propia.

## 5.9. Características del equipo *SPECTRAL WAVE DWDM4000*

El sistema *Spectral Wave 40* permite a los proveedores de la red construir trayectos de larga distancia a través de las redes de transmisión óptica. Puede ser utilizado entre nodos ópticos STM4/16/64, equipos STM4/16/64 o equipos *giga-bit-Ethernet* en un canal de 1,55  $\mu\text{m}$ , la señal óptica multiplexada es impulsada para la línea de transmisión.

El diseño del equipo *Spectral-Wave* suporta sistemas *Full- Open*, Integrado, Espalda-Espalda (*Back to Back*), protegido, y sistemas *ADM*, cada uno habilitado en aplicaciones de 2-fibras.

Estos sistemas se componen de elementos de la red; cada elemento de la red está equipado con una combinación de sub-bastidores que determinan su configuración operacional (*TERM* o *IL AMP*).

Los diferentes tipos de sistemas limitan el equipo en número de canales para los sistemas de larga distancia de transmisión.

- Un sistema *Spectral Wave Full-Open* consiste de dos terminales finales (elementos de red equipados como *TERMs*) con un máximo de (n) intervenciones de amplificadores de línea (elementos de red equipados como *IL AMPs*).
- Un sistema *Integrado Spectral Wave* consiste de dos terminales finales (elementos de red equipados como *TERMs*) con un máximo de (n) intervenciones de amplificadores de línea (elementos de red equipados como *IL AMPs*). El paquete *TPND (transponder)* no es utilizado como un

TERM. El paquete de interface coloreado STM-16 es requerido para un equipo SMS-2500A.

- Un sistema *Back-to-Back Spectral Wave* (regenerador) consiste de dos sistemas *Full-Open* conectados como STM4/16/64 expres entre dos elementos de red TERMS. Para señales STM4/16/64 el elemento TERM se conecta al sistema *Full-open*, usando TPND para terminar UHC (canal óptico).
- Para un sistema de protección *Spectral Wave* consiste de dos terminales finales (elemento de red equipados como *Dual-Terms*), con un máximo de (n) intervenciones de amplificadores de línea (elementos de red equipados como amplificador de línea).
- Cuando usamos el paquete *OADM6C*, la composición *OADM* con inserción/extracción es posible utilizar 6 ondas. Por otra parte, por 2 sets de *OMUX/DMUX/TPND/AMP* como *Dual-TERM*.
- Es posible la composición de un *Full-OADM* con inserción/extracción para un máximo de 40 lambdas (por dirección). Una longitud de onda aleatoria puede ser seleccionada por un canal de inserción y extracción.
- El *Full-OADM* puede insertar/extraer ochenta señales ópticas stm 4/16/64 (40 canales por cada lado *TERM-A* y *TERM-B*), en una fibra óptica mediante la asignación de seis longitudes de onda de la banda de 1,550 nm (banda c). (El sistema *Full OADM* consiste de el mismo paquete tal como en el sistema *Dual-TEM*).

- Los elementos de red *TERM* son designados por configuración operacional. Terminal A y terminal B son terminales finales en los sistemas *Full-Open*, integrados y espalda-espalda. Dual – *TERM* son terminales intermedios en sistemas espalda con espalda. Dual-*TERM-A* y Dual-*TERM-Z* son terminales finales en sistemas de protección. Los elementos de red *IL AMP* son designados por un número secuencial de amplificadores de línea: *IL AMP* (n).
- Los nombres de línea (Línea 1, Línea 2) en el sistema *Spectral Wave* solo muestra dirección. El tráfico viaja sobre la línea 1 del terminal A a terminal Z. Y el tráfico que viaja sobre la línea 2 viaja del terminal Z al terminal A.

#### 5.9.1. Elementos de red

El número y tipos de sub-bastidores instalados en un determinado elemento de red es configurado operacionalmente como terminal (terminal final y terminal intermedio) o una amplificador lineal (*IL AMP*).

Cada terminal final STM-4/16/64 de la red en la banda C , en sistema *Full-Open* de dos fibras consiste de los siguientes sub-bastidores montados en uno o dos *racks*.

PDP: este sub-bastidor distribuye -48 VDC (-60 VDC para sistemas de -60 V) para otro sub-bastidor en el *rack*.

COM: el sub-bastidor es usado para multiplexar /demultiplexar, y amplificación de señales ópticas, el sub-bastidor COM controla y monitorea el rendimiento del equipo, solamente un sub-bastidor COM es requerido por sistema.

OMUXC: el paquete OMXC recibe la señal óptica de conversión del paquete TPND en el sub-bastidor OPT, y multiplexan la señal dentro de señales de agregación óptica y las envía al amplificador TXA40C.

TXA40C: el paquete TXA40C recibe una señal de agregación óptica del paquete OMXC en el sub-bastidor COM, amplifica ésta, y la transmite como una señal *WDM* para la línea de transmisión.

RXA40C: el paquete RXA40C recibe la señal *WDM* de la línea de transmisión y amplifica esta luego la envía al paquete ODMUXC. El paquete ODMUXC demultiplexan la señal y la separa en señales STM-4/16/64 de 1,5  $\mu\text{m}$ . Dentro el ODMUXC, una rejilla de longitudes de onda, demultiplexa la señal en 40 señales ópticas de 1,5  $\mu\text{m}$  de longitud de onda y envía estas a el TPND en el otro lado del terminal intermedio.

DCF: compensa la dispersión de la señal óptica. El DCF es usado para la mezcla de las señales ópticas STM-4/16/64.

OPT: el sub-bastidor OPT es usado para recibir/transmitir señales ópticas.

TPND: el lado de transmisión de TPND convierte una señal entrante de 1,3  $\mu\text{m}$  a 1,5  $\mu\text{m}$  de longitud de onda que cumplen con las especificaciones ITU-T, y envía las señales ópticas convertidas para el OMXC en el rack COM. El lado receptor de TPND recibe una señal óptica de longitud de onda de 1,5  $\mu\text{m}$  de el ODMUXC en el bastidor COM, y convierte ésta para una señal STM-4/16/64 de la banda 1,3  $\mu\text{m}$ , y la salen las señale para el equipo cliente. La tabla XIII nos muestra los elementos de red que componen los cuatro sistemas que se utilizan en el *Spectral Wave 40*.



Tabla XIV. Elementos de red

SYSTEM	NETWORK ELEMENTS	SYSTEM	NETWORK ELEMENTS
Full-Open System	End TERM (Single-TERM)	Back-to-back system	Intermediate TERM (Dual-TERM)
	End TERM (Dual-TERM/Full)		OADM
	IL AMP	Protected system	End TERM (Dual-TERM)
	OADM		IL AMP
Integrated system	End TERM (Single-TERM)		OADM
	IL AMP /OADM	-----	-----

Fuente: Nec Corporation, Manual operations SpectralWave, p.150.

**5.10. Diseño de anillo y estudio de los factores de propagación que afectan al diseño de los sistemas ópticos DWDM**

La transmisión de luz en fibra óptica presenta varios retos que deben tratarse. Atenuación, que es la caída de fuerza de la señal, o pérdida de la potencia de luz, a medida que la señal se propaga por la fibra. Dispersión cromática, que es la ampliación de los pulsos de luz a medida que viaja por la fibra.

Y las no linealidades que son efectos acumulativos de la interacción de la luz con el material a medida que viaja por la fibra, cuyos resultados son cambios de la longitud de onda e interacciones entre longitudes de onda. Cada uno de estos efectos tiene varias causas, y es importante considerar en el diseño de sistemas DWDM. Si bien esto ya se mencionó en los capítulos anteriores, aquí se analizan las mediciones relacionadas con la transmisión de luz en fibra óptica y se pondrán en práctica los criterios técnicos, con el objetivo

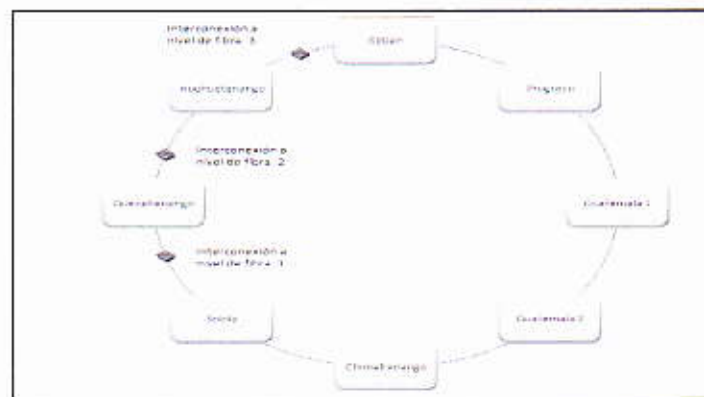
de encontrar las soluciones y diseños más adecuados para minimizar su efecto en el desempeño de los sistemas *DWDM*.

### 5.10.1. Recuento de ruta (medición)

Los efectos que se denotan en la fibra debido a la interacción con la luz afectan en el diseño del anillo *DWDM*, por lo que es importante mencionar en este punto que las líneas de fibra que se asignaran a este anillo, tienen tres puntos intermedios donde se realiza una interconexión a nivel de fibra, introduciendo elemento conectores, lo cual influirá en pérdidas para el diseño.

En la figura 115 se muestra el diagrama y la posición de las tres interconexiones, estos tramos de fibra, fueron sometidos a distintas mediciones plasmadas en la tabla XIV las cuales incluyen, mediciones de distancia entre estaciones, medición de perdidas en la fibra por tramo, incluyendo pérdidas de conectores y distribuidores, se realiza la prueba de coeficiente de dispersión en [ps/(nm\*km), para 1 550 nm, G.652] y por último el coeficiente de *PMD* [ps/km].

Figura 115. Interconexiones anillo *DWDM*



Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Mediciones de fibra óptica anillos DWDM

Enlace  (Estacion - Estacion)	Distancia (Km)	PMD		Dispersion		Fiber Loss	
		Calculated PMD (TERM to TERM) [ps]/(Referenc e Calculation)	PMD Coefficient [ps/Km <sup>1/2</sup> ] (Actually Measured)	Dispersion Coefficient [ps/(nm*Km), at 1550nm, G.652] (Actually Measured)	Fiber Dispersion [ps/nm] (Calculated)	Calculated Fiber Loss [dB/Km] (Reference Calculation)	Actual Fiber Loss [dB] (Actually Measured, including Connector Loss & Splice Loss)
GTM1 - GTM2 - CMT - SOL - QTG - HUE - COB - PGS - Ring							
GTM1- GTM1	5,138	0,976	0,19	86,13	16,763	0,09	0,21
GTM1- CMT	57,112	16,216	0,284	964,16	16,882	0,05	0,34
CMT - SOL	78,184	16,367	0,209	1303,48	16,672	0,05	0,5
SOL - QTG	67,419	14,942	0,222	1137,14	16,846	0,07	0,56
SOL - INTERCONEXION FIBRA 1	38,039	8,246	0,217	647,08	17,011	0,1	0,62
INTERCONEXION FIBRA 1 - QTG	29,38	6,696	0,228	490,05	16,68	0,04	0,2
QTG - HUE	104,837	23,557	0,225	1746,27	16,657	0,13	1,37
QTG - INTERCONEXION FIBRA 2	6,1	1,708	0,28	102,48	16,8	0,1	0,25
INTERCONEXION FIBRA 2 - HUE	98,737	21,849	0,221	1630,54	16,514	0,17	1,66
HUE - COB	172,077	34,5	0,2	2893,77	16,825	0,04	0,56
HUE - INTERCONEXION FIBRA 3	55,066	12,512	0,227	927,75	16,848	0,03	0,19
INTERCONEXION FIBRA 3 - COB	117,011	23,671	0,202	1966,02	16,802	0,06	0,65
COB - GTT	158	40	0,253	2654,4	16,8	0,1	1,26
GTT - CEN	89,987	23,337	0,259	1507,64	16,754	0,06	0,58

Fuente: elaboración propia.

Para las mediciones descritas en la tabla XV, estas mediciones para la transmisión DWDM, se realizaron con el equipo cuyas características y referencias mostramos a continuación en la tabla XVI.

Tabla XVI. Características y referencias de equipo de medición

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
Fuentes, receptores ópticos	Fabricate/ Modelo: GN Nettest GNN/5250. RT 1310/1550NM SINGLEMODE LIGHT SOURCE.
Atenuadores	Fabricante/ Modelo: ACTA/OLA-15,A. Descripción: Atenuador óptico SINGLE-MODE P/N 2239/01, Conectores FC VARIABLE 1260-1600 NM
Medidores de BER desde E1 hasta STM 64	Fabricante /Modelo : ACTA/ANT-20SE,BB SONET/SDH Test Set Características: GPIB Medidor de red avanzado con OC48/STM-64 JITTER (2488 MBPS) Medición de BER hasta STM-0/1/4/16/16C/64 y OC1/3/12/12C48/48C, COLOR TOUCHSCREEN DISPLAY,32MB RAM
Analizadores de espectro óptico	Fabricante/ modelo: ANR/MS9710C Analizador de espectro óptico Conectores W/FC Rango Dinámico 600 TO 1750 NM. 70 DB . Sensitividad de Recepción óptica -90 DBM, Medición de pulso óptico OPCION de conectores 37 FC
Maletín de herramientas básico	Destornilladores de Precisión, Juego Destornilladores (Pala y Estrella), Juego Llaves Bristol, Juego Llaves Boca Fija (8mm a 24mm), Alicates, Cortafrios (Grande), Pinza Plana (Grande), Pinzas Pico Loro, Hombre Solo 10", Llaves de Expansión de 8", Llaves de Expansión de 12", Juego Limas, Cautín 50W, Bisturí, Milímetro y Laptop.
OTDR Empalmadora Analizador Espectro	Mini OTDR + Medidor de Potencia Óptica + Fuente de Luz ANRITSU MT9081D EMPALMADORA POR FUSION FSM-50S ANALIZADOR STM-64 MP159OP

Fuente: elaboración propia.

### 5.10.2. Cálculos de diseño

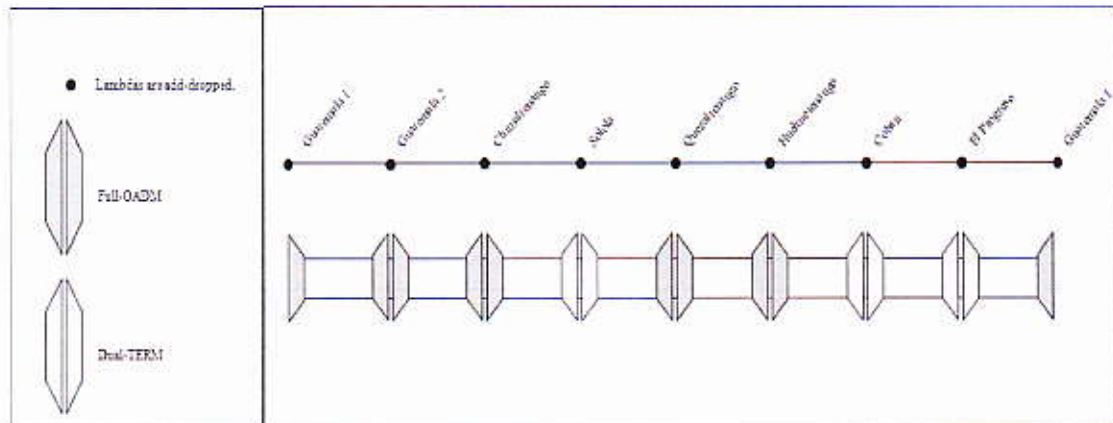
Analizando las mediciones de los once tramos de fibra que conforman el anillo y tomando como referencia valores de comparación estándares establecidos para la transmisión de datos en fibra óptica, se realizaron los cálculos del diseño del anillo *DWDM*, optimizando el número de nodos y equipamiento, reflejando esta optimización de los recursos económicos.

Las características del diseño están basadas en fibra de estándar G. 652 (SMF) en la banda C. Las interfaces para las que se diseña el enlace están distribuidas para cubrir ocho canales STM-64, cuatro canales STM-16 y dos canales 10 GbE, el equipo está diseñado para soportar un máximo de cuarenta lambdas.

Para las ocho estaciones se ha diseñado con opción de agregación y extracción de lambdas, en cinco de las ocho estaciones se utiliza la configuración del *Spectral Wave Full-OADM*, las estaciones que cuentan con este diseño son Guatemala 1, Guatemala 2, Chimaltenango, Quezaltenango, Huehuetenango, para completar las ocho estaciones se utiliza la configuración Dual-TERM para las estaciones Sololá, Cobán, El Progreso, en la figura 116 se describe gráficamente la distribución de la configuración.

Haciendo uso de las mediciones realizadas a los tramos de fibra se efectúan los cálculos del diseño, iniciando por el cálculo de la atenuación de fibra por tramo, obteniendo este valor de la división de las pérdidas de fibra dadas en dB entre la distancia del tramo de fibra en kilómetros. El siguiente paso es sumar de pérdidas totales (pérdidas en el cable + margen de pérdida por cable + pérdida por ODF).

Figura 116. Configuración por nodo



Fuente: elaboración propia.

El cálculo de la dispersión por sección se debe al coeficiente de dispersión cromática en la banda de 1 550 nm G. 652 esto multiplicado por la distancia de la sección en kilómetros.

La dispersión total de terminal a terminal se aproxima del cálculo de la dispersión por sección al valor entero inmediato superior, el valor dado en esta operación se compara contra la referencia, para una transmisión de 2,5 Gbps la máxima dispersión debe alcanzar 12 800 ps/nm y para una transmisión óptica de 10 Gbps debe alcanzar máximo  $\pm 300$  ps/nm con DCF.

El primer tramo entre GTM1 y GTM2 debido a su valor por debajo del máximo para 10 G no utilizará DCF, los siete tramos restantes se diseñan con un DCF por tramo, estos valores son el resultado del estudio realizado por el departamento de desarrollo de NEC Japón, el objetivo del estudio es obtener el valor de la remanencia de dispersión por debajo del nivel estándar para transmisiones de 10Gbs.

Por último determinamos valor promedio de *PMD* por sección este lo comparamos contra el valor estándar aceptable para el *PMD* para transmisiones de 10Gbs, el valor máximo permitido es de 10ps. Se muestran a continuación en la tabla XVII, los valores para el diseño del anillo *DWDM*.

Tabla XVII. Cálculos de diseño

GTM1 <==== GTM2 <==== CMT <==== SOL <==== QTG <==== HUE <==== COB <==== PGS <==== GTM1									
Distance (Actual Data)	(km)	5.1	57.1	78.2	87.4	104.6	172.1	189.0	30.0
Fiber Attenuation (Calculated)	(dB/km)	0.19	0.28	0.21	0.21	0.22	0.20	0.25	0.26
Cable Loss (Actual Data, including Splice Loss & ODF Loss)	(dB)	0.96	16.22	16.27	14.63	23.56	34.50	41.00	21.34
MARGIN for Cable (Specified by Operator)	(dB)	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
ODF Loss (Yenolab)	(dB)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.80	2.00
<b>TOTAL LOSS</b>	<b>(dB)</b>	<b>6.48</b>	<b>21.72</b>	<b>21.87</b>	<b>19.39</b>	<b>29.86</b>	<b>40.80</b>	<b>45.80</b>	<b>28.84</b>
Chromatic Dispersion Coefficient @ 1550nm (2112) (Actual Data)	(ps/nm/nm)	16.78	16.88	16.67	16.65	16.66	16.83	16.83	16.75
Cable Dispersion @ Section (Calculated)	(ps/nm)	86.1	964.2	1303.5	1136	1746	2895.2	2654	1508
<b>TOTAL DISPERSION (TERM 1+ TERM)</b>	<b>(ps/nm)</b>	<b>86</b>	<b>964</b>	<b>1303</b>	<b>1136</b>	<b>1746</b>	<b>2895</b>	<b>2654</b>	<b>1508</b>
DCF (250 Application)	(ps)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Remaining Dispersion	(ps/nm)	86	364	1303	1136	1746	2895	2654	1508
DCF (100 Application)	(ps)								
Remaining Dispersion	(ps/nm)	86	64	103	136	46	195	354	189
<b>PMD Coefficient (Actual Data)</b>		<b>0.09</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>	<b>0.07</b>	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>	<b>0.10</b>	<b>0.06</b>
Average PMD in Section	(ps)	0.20	0.38	0.53	0.57	1.03	0.52	1.26	0.57
Average PMD (TERM 1+ TERM)	(ps)	0.20	0.38	0.53	0.57	1.03	0.52	1.26	0.57

Fuente: propuesta presupuestal, p.2.

El requisito mínimo de potencia del receptor se llama sensibilidad del receptor, R. En este caso se debe asegurar que la potencia de transmisión es suficientemente alto para que pueda mantener la potencia de la señal >R en el extremo receptor, para definir el tipo de amplificador con el que se debe diseñar cada tramo del anillo, nos basamos en la pérdidas totales descritas en la tabla de cálculos.

Apoyándose como referencia en la tabla XVIII para definir el modelo de amplificación necesario, así como las potencias de transmisión.

Tabla XVIII. Diseño de amplificación

Cable Loss	<55dB	< 8.5 dB	< 22dB	22.01 dB to 25dB	25.011 dB to 27 dB	25.011 dB to 30 dB	25.011 dB to 33 dB	25.011 dB to 40 dB	25.011 dB to 45 dB
TX AMP Type	TXS	TXS	TX 22/25	TX 22/25	TX 30/33	TX 30/33	TX 30/33	TX 30/33	TX22/25
TX Powe (dBm)	NA	NA	3	3	5	5	5	5	3
Booster Amp (Ext)	Not necessary	Not necessary	Not necessary	Not necessary	Not necessary	Not necessary	Not necessary	Not necessary	Not necessary
TX Powe (dBm)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	10
RX AMP Type	RX30	RX33	RX22	RX25	RX25	RX30	RX33	ILA40c (40 dB)	ILA40c (40 dB)
RX Power (dBm)	-25	-28	-19	-22	-22	-25	-28	-35	-35
Gain (dB)	5.5	8.5	22	25	27	30	33	40	45

Fuente: propuesta presupuestal, p.3.

Los valores del diseño de transmisión y recepción para los siete nodos quedan distribuidos como muestra en la figura 117, conforme sube el nivel de perdida en el cable se deben compensar las pérdidas por medio de una correcta amplificación, los valores indicados en la tabla RT son estándares de fabricación que se aplican en fabricación del equipamiento *Spectral Wave*.

Figura 117. Potencias del diseño de transmisión



Fuente: elaboración propia.



### 5.10.3. Estableciendo lambdas

Para la asignación de recorridos ópticos estáticos, pondremos primero la ruta del camino más largo y luego la ruta del recorrido óptico más corto.

La seguridad aquí es la continuidad de longitud de onda, por el cual ninguna conversión de longitud de onda en nodos intermedios es efectuada. Otra de las soluciones para establecer recorridos ópticos estáticos es mediante la asignación de recorridos con la distancia más corta del primer salto. Para establecer los recorridos del anillo, se tomo en cuenta las normas UIT-T, como se observa en la figura 118, se utilizan los canales siete (7) al (20) de la rejilla UIT-T G.694.1 para sistemas DWDM con 50 GHz y 100 GHz de separación entre longitudes de onda.

Figura 118. Diseño de lambdas

Guatemala ANILLO DWDM HUE-COBAN-PRO-GTM1-GTM2-CMT-SOL-QTN-HUE Ring DW4040										
Station Ring	Path	Lambda	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8
			ADM	ADM	ADM	ADM	ADM	ADM	ADM	ADM
STM-64 RING	GTM1 - GTM2 (Working)	Ch-7, 1557.36nm								
	GTM1 - GTM2 (Protection)	Ch-8, 1556.86nm								
	GTM2 - CMT (Working)	Ch-9, 1555.75nm								
	CMT - SOL (Working)	Ch-10, 1554.94nm								
	SOL - QTN (Working)	Ch-11, 1554.13nm								
STM-64 RING	SOL - QTN (Protection)	Ch-12, 1553.33nm								
	GTM1 - GTM2 (Working)	Ch-13, 1552.52nm								
	GTM2 - CMT (Working)	Ch-14, 1551.72nm								
	CMT - SOL (Working)	Ch-15, 1550.92nm								
	SOL - QTN (Working)	Ch-16, 1550.12nm								
STM-16 RING	GTM2 - CMT (Protection)	Ch-17, 1549.32nm								
	CMT - SOL (Working)	Ch-18, 1548.51nm								
	SOL - QTN (Working)	Ch-19, 1547.72nm								
	QTN - GTM1 (Working)	Ch-20, 1546.92nm								
	QTN - GTM1 (Protection)									
10 GBETH										
10 GBETH										

Fuente: propuesta presupuestal, p.3.

#### 5.10.4. Descripción del costo de los equipos

Una parte importante del diseño para el proyecto de anillo *DWDM*, es la pre ingeniería de venta, la cual se enfoca en la sección de costos del equipamiento, el cual es el último eslabón para que el cliente evalúe sus opciones, esta se realiza una vez se hayan planteado los escenarios y requerimientos necesarios para la satisfacción técnica del proyecto.

Se brinda una información substancial e integrada del escenario técnico en conjunto con el costo, se plantea la información contenida en la hoja presupuesta del diseño de cada uno de los nodos, estos están relacionados con el monto total que representaría el nodo en el anillo *DWDM*.

Desde la perspectiva económica, la posibilidad de suministrar potencialmente una capacidad de transmisión ilimitada es la ventaja más obvia de la tecnología *DWDM*. La oferta presupuestal está compuesta de la descripción del equipamiento, el precio FOB, la cantidad de los dispositivos requeridos por estación, así como el valor total por elemento del sistema incluido. De las subdivisiones en la oferta, se obtienen los porcentajes correspondientes, para dar así una perspectiva del valor de la oferta.

La sección ETS V/Rack, representa un 0,59% del valor total de la oferta, la sección *SpectraWave DW4000 DWDM* esta subdividida en once bloques, como se explicó anteriormente en ésta denominación se encuentran los dispositivo activos del diseño, los componentes comunes representan un 7,51% del precio final, la etapa de OMUX & ODMUX tiene una representación del 10,62%, la sección amplificadora de transmisión TX AMP tiene un valor del 11,97% en el contenido del equipamiento activo de la propuesta, en su contraparte se tienen

los elementos de amplificación de recepción RX AMP alcanzando un valor de 7,85%.

La sección de *TRANSPONDER*, esta es una de las etapas mas importantes del sistema ya que acá es donde se define o convierte a los diferentes canales coloreados, cuenta con un valor del 31,29% de la oferta, acoples 0,84%, amplificadores de línea 3,22%, DCF 3,72%, la suma de kits de cables, licencias y *software* 4,12%.

Por último encontramos U-Node *BBM/WBM interface card* con un 19,99%, llegando así a totalizar la oferta del proyecto por un valor de US\$1,447,385,89 incluyendo en este monto los servicios, con un valor del 38,5%.

Ampliando el panorama de la propuesta se detalla el valor de cada uno de los nodos del anillo en cuestión, el equipamiento de los nodos como se especificó en el diseño técnico varía según los requerimientos, y directamente relacionado a esto cambia el valor económico de inversión en la estación, expresadas en porcentajes las estaciones económicamente se plantean así.

Guatemala I con el 10%, Guatemala II 12,33%, Chimaltenango 12,96%, Sololá con un 12,82%, Quezaltenango con 10,65%, Huehuetenango 9,46%, Cobán con 10,81%, Progreso con un 9,38% y finalmente un 12% de equipo de repuesto, llegando así al cien por ciento del valor de la oferta, estos valores se muestran en la figura 119, de lo anterior se puede apreciar que cada una de las estaciones tiene una configuración diferente de acuerdo a los requerimientos y distancias entre cada una de ellas.

Figura 119. Porcentajes de inversión por estación



Fuente: elaboración propia.

#### 5.10.5. Análisis de recuperación de costos

Para que se optimice la toma de la decisión de la factibilidad del proyecto es necesario realizar un análisis de la recuperación de los costos del proyecto. El período de recuperación de la inversión es el que se requiere para que los ingresos netos de la inversión sean iguales al costo de la misma es decir, en que tiempo el flujo de efectivo se igualara al valor desembolsado en un inicio.

Los flujos de efectivo del operador, antes de implementar el proyecto están formados por el volumen de ingresos y gastos, respecto a los egresos, se mencionara que el operador utiliza siete tramos de fibra en calidad de arriendo (fibra oscura) por un pago mensual, lo cual representan un gasto constante. Luego de la implementación de la tecnología *DWDM* el operador arrendara menos fibras, ya que la optimización de fibras es una de las principales características de esta tecnología, los ingresos aumentaran debido a la mayor capacidad que provee el diseño del anillo *DWDM*.

Los datos que se utilizan para llegar a definir el tiempo que se recurrará la inversión se determinan del estado de resultados del proyecto a futuro: los resultados contables (utilidad neta o pérdida neta) ingresos, gastos, la depreciación, las amortizaciones de activos diferidos. La depreciación, las amortizaciones de activos nominales y las provisiones, son rubros (costos y/o gastos) que no generan movimiento alguno de efectivo (no alteran el flujo de caja) pero si reducen las utilidades operacionales del proyecto. Esta es la razón por la cual se deben sumar en el estado de flujo neto de efectivo.

#### **5.10.5.1. Ingresos**

Los ingresos se generan debido al préstamo del servicio de capacidad de transmisión a los clientes, generalmente empresas u organizaciones, cobrando un valor promedio de \$3 ,000.00 por E1, mensualmente. La demanda de capacidad transmitida prevista a partir del sexto mes (finalizada la instalación de la red *DWDM*) es del 57% de la capacidad instalada (3 ,272 E1s), con la proyección de un crecimiento en la demanda de transmisión de cien por ciento de la capacidad instalada (5 ,796 E1s) a partir del treceavo mes.

El ingreso de los primeros seis meses del inicio del proyecto no se reflejara en el flujo de caja, debido a que en este ejercicio solamente se evalúa la rentabilidad del proyecto, sin incluir anteriores inversiones.

#### **5.10.5.2. Gastos de inversión**

El monto de la inversión que realiza el operador es de \$ 1 447 385,89. La forma de pago para liquidar el valor del proyecto y reflejarlo en el flujo de caja se establece en las condiciones comerciales.

Según condiciones comerciales, sección forma de pago; se contempla un primer pago contra entrega en bodega del operador del 45% del costo del proyecto, transcurridos 60 días de entrega en bodega y al no haberse reportado la finalización de la instalación de la red, se deberá cancelar un segundo pago del 35% del valor total de proyecto, y finalmente un tercer pago del 20% tras la entrega por parte del proveedor, de las actas de aceptación, en conformidad de los servicios de instalación realizados.

#### **5.10.5.3. Gastos operativos**

Los gastos operativos son los salarios, alquiler de local, compra de suministros para mantenimiento, son aquellos destinados a mantener un activo en su condición existente o modificarlo para que vuelva a estar en condiciones de trabajo.

Los gastos administrativos del personal, relacionado con el funcionamiento activo del proyecto, suma un gasto anual de \$46 560 000,00 anuales contribuyendo con un 76% del gasto operativo conformado por una planilla de 300 empleados, 100 en el área de gestión administrativa con un sueldo promedio de

\$9 000.00, el área de ingeniería de proyectos con 80 empleados con un sueldo promedio de \$12 000,00 y en el área técnica 120 empleados con un sueldo promedio de \$8 750,00.

Las funciones de mantenimiento generan un gasto promedio de \$11 040 000,00 anuales reflejando el 24% de los gastos de operación. Tomando en cuenta que la infraestructura es propiedad del operador y se debe de realizar un mantenimiento de ocho estaciones de la red *DWDM* mensualmente.

#### **5.10.5.4. Alquiler de fibra oscura**

El gasto de alquiler de fibra oscura se refleja en el flujo de caja como un egreso, se estima que el proveedor de fibra mantendrá sus precios en los próximos 24 meses, para la red *DWDM* únicamente se utilizarán dos líneas de fibra, una como línea de trabajo y otra como protección, el precio de alquiler mensual es de \$70 00 por kilómetros. La suma de los tramos de fibra utilizados para cerrar la red *DWDM* es de 733 kilómetros.

#### **5.10.5.5. Depreciación**

El método de depreciación utilizado en el ejercicio para reflejarlos en el flujo de caja es lineal, el equipamiento se deprecia a 10 años plazo. Dando una depreciación anual de \$144 738,59.

#### **5.10.5.6. Análisis de la inversión**

En el modelo de evaluación del análisis de la inversión, casi siempre se piensa en términos de análisis de la rentabilidad, tomando técnicas financieras

como las distintas medidas de riesgo y rentabilidad, el cálculo de los flujos de caja, los dos métodos más utilizados para evaluar la viabilidad de una inversión son el V.A.N. (valor actual neto) y el T.I.R (Tasa interna de rentabilidad).

En este caso los flujos de efectivos mensualmente son irregulares, el período de recuperación se calcula mediante el flujo acumulado, es decir, se suman los flujos netos de efectivo desde el mes uno, hasta el último en que se considera durará la inversión, y consecuentemente, el tiempo en que la suma de los flujos de efectivo igualen a la inversión será el número de meses que se necesita el operador para recuperar la inversión.

Basados en el flujo de caja presentado en el anexo, se define que el plazo de recuperación de la inversión total del proyecto, cierra su ciclo en el onceavo mes llamando a este indicador *payback*, tomando como tiempo de partida el momento en que se hace entrega del equipamiento al operador en sus bodegas.

El VAN es el rendimiento actualizado de o flujos de caja, el índice VAN para la inversión de la red *DWDM* analizada, para los dos primeros años de operación es de \$ 43 327 542,26, para una tasa de actualización del 12% tomando en cuenta que esta tasa debe incluir el interés que se puede obtener del dinero en inversiones sin riesgo más la tasa inflacionaria.

Este valor lo se puede interpretar como una inversión que crea valor, dependiendo de las decisiones financieras del operador sobre el financiamiento del proyecto este valor puede elevarse, para lo cual se tendrán que evaluar si se debe realizar el proyecto con capital propio o utilizar un apalancamiento financiero.



Por otro lado la tasa interna de rentabilidad analizada para los primeros 24 meses de operación nos indica la rentabilidad relativa de la inversión en la red *DWDM*, el método considera que una inversión es aconsejable si la TIR resultante, en nuestro caso del 16%, es igual o superior a la tasa exigida por el operador (12%). Concluyendo en base al análisis de la inversión y los valores obtenidos que la inversión es positiva y genera valor a la organización.

## CONCLUSIONES

1. El mundo de las redes de telecomunicaciones está cambiando velozmente.
2. Una vez que se alcanzan los Kbits la demanda es de Mbits, y cuando se tiene Mbits se requieren Gbits. A medida que las empresas intentan extender las capacidades de sus redes, la creciente necesidad de disponer de mayores anchos de banda está llegando también a las redes metropolitanas, el disparo en la demanda del ancho de banda de la red de los proveedores de servicio es entonces en gran parte al crecimiento del tráfico de datos, específicamente del protocolo de internet (*IP*) en estos incluimos las aplicaciones comerciales como *eBanking*, *eGovernance*, *eProcurement*.
3. Desde la perspectiva técnica y económica, la posibilidad de suministrar potencialmente una capacidad de transmisión ilimitada es la ventaja más obvia de la tecnología *DWDM*.
4. La actual inversión en fibra no sólo puede ser preservada sino también optimizada. A medida que la demanda cambia, se puede añadir más capacidad, con el solo hecho de ir aumentando el número de longitudes de onda de la fibra sin costos adicionales, la veloz eliminación de múltiples capas de servicio y aumento de capacidad en el medio de transporte provoca una reducción en el número de tipos de elementos de red, dando como resultado una reducción en el capital de costos de operación, en la red del operador. Interfaces de transporte de un

especifico protocolo y tasa de bits ya no serán requeridos, reduciendo costo del inventario en la red del proveedor he incrementado la flexibilidad de la red.

5. Un aspecto importante que tiene *DWDM* es simplicidad en el sentido que reduce drásticamente el uso de regeneradores de las señales ópticas, de esta manera los sistemas *DWDM* simplifican en mucho la expansión de la capacidad de la red. El único requerimiento es instalar interfaces adicionales o de mayor velocidad en los sistemas *DWDM* en el extremo de la fibra. En algunos casos sólo será necesario aumentar el número de longitudes de onda de la fibra en las interfaces existentes.
  
6. Los beneficios obtenidos en la red de transporte del operador de telefonía, se encuentran reflejado principalmente en la reducción de costes de operación y arrendamiento de fibra oscura, debido a la optimización de la fibra óptica utilizada para desplegar el anillo *DWDM*, cubriendo la necesidad de transporte en un 50% de la región guatemalteca y parte de la transmisión de interconexión centroamericana.

## RECOMENDACIONES

1. En el proceso de implementación de la red de fibra es importante una adecuada nomenclatura. Se debe utilizar los diferentes colores que identifican a cada filamento del cable de fibra, señalizando por ejemplo, aquellos filamentos destinados al anillo principal, diferenciándolos de las protecciones de anillo.
2. En el trascurso de la caracterización de la fibra óptica, se deben realizar las mediciones de tramos de fibra óptica completos, incluyendo las uniones intermedias, para evitar así las pérdidas inesperadas que afecten el diseño del cálculo del equipo *DWDM*, ya que en la unión de los cables de fibra pueden existir pérdidas influyentes que se reflejaran luego de fabricados los elementos activos del equipamiento *DWDM*.
3. En el diseño y posteriormente en la implementación de la red de fibra óptica se deben utilizar las fibras *NZDSF* de acuerdo a las recomendaciones de la *UIT-T* en la norma G.655. Con esto se lograra también reducir en gran escala los efectos no lineales y de dispersión que afectan a los sistemas *DWDM*. En consecuencia no se tendrá problemas de retardos, *jitter* elevados y pérdida de paquetes logrando de esta manera cumplir los requerimientos del cliente.

4. Durante la elección de la marca de fabricante para implementación de proyectos futuros se debe investigar y confirmar la compatibilidad de puertos coloreados con los equipos de la tecnología *DWDM* ya integrados en la red, con los cuales tendrá que interactuar la tecnología del equipo seleccionado.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ASHWIN GUMASTE, Tony, Antony. *DWDM Network designs and engineering solution*. San Jose, California: Cisco System, 2002. 368p. ISBN:1-58705-074-9.
2. Cisco System. *Cisco transport planner DWDM operations guide release 9.0* [en línea], 9a. ed, San Jose, California: Cisco System Inc, 2006, diciembre 2010, [ref. enero 2011]. Disponible en Web: <[http://www.cisco.com/en/US/docs/optical/metroplanner/metroplanner\\_9\\_0/operations/guide/454mp90\\_operations.pdf](http://www.cisco.com/en/US/docs/optical/metroplanner/metroplanner_9_0/operations/guide/454mp90_operations.pdf)>. 78-18372-01.
3. DUTTA, Achyut K; DUTTA, Niloy K; FUJIWARA, Masahiko. *DWDM technologies optical networks*, Volumen III. Burlington, USA: Elsevier Academic Press, 2004. 336 p. ISBN:0-12-225263-.
4. JDSU Uniphase Corporation. *Reference Guide to Fiber Optic*, 2007. France: JDSU, 2007-2010. ISBN: 2110-5787.
5. KARTALOPOULOS, Stamatios V. *Introduction to DWDM Technology: Data in a Rainbow*. Bellingham, Washington USA: SPIE Optical Engineering Press, 2000. 252 p. ISBN: 0-81943-620-8.

6. LAUDE, Jean Pierre. *DWDM Fundamentals components, and applications*. Nortwood MA, Artech house, 2002, 273 p. ISBN:1-58053-177-6.
  
7. NEC Corporation. *Guide operations NEC corporation spectral wave 40-channel DWDM equipment* [en línea]. Tokyo, Japan: NEC corporation, Marzo 2003, septiembre 2007, [ref. enero 2010]. Disponible en Web: <<http://dc379.4shared.com/doc/dcu2wUzl/preview.html>>. DOI-S11254.

## ANEXO





La tabla muestra la rejilla ITU G.694.1 para sistemas DWDM con 50 Ghz y 100 Ghz de separacion entre longitudes de onda. Notese que el valor de "c" (velocidad de la luz) que deberia utilizarse para la conversion entre frecuencia y longitud de onda es de 2.99792458 X 10^8 m/s.

Banda L		Banda L		Banda C		Banda C		Banda S		Banda S	
100-GHz Grid		50-GHz Offset		100-GHz Grid		50-GHz Offset		100-GHz Grid		50-GHz Offset	
THz	nm	THz	nm	THz	nm	THz	nm	THz	nm	THz	nm
186,00	1 611,79	186,05	1611,35	191,00	1 569,59	191,05	1 569,18	196,00	1 529,55	196,05	1 529,16
186,10	1 610,92	186,15	1610,49	191,10	1 568,77	191,15	1 568,36	196,10	1 528,77	196,15	1 528,38
186,20	1 610,06	186,25	1609,62	191,20	1 567,95	191,25	1 567,54	196,20	1 527,99	196,25	1 527,60
186,30	1 609,19	186,35	1608,76	191,30	1 567,13	191,35	1 566,72	196,30	1 527,22	196,35	1 526,83
186,40	1 608,33	186,45	1607,90	191,40	1 566,31	191,45	1 565,9	196,40	1 526,44	196,45	1 526,05
186,50	1 607,47	186,55	1607,04	191,50	1 565,50	191,55	1 565,09	196,50	1 525,66	196,55	1 525,27
186,60	1 606,60	186,65	1606,17	191,60	1 564,68	191,65	1 564,27	196,60	1 524,89	196,65	1 524,50
186,70	1 605,74	186,75	1605,31	191,70	1 563,86	191,75	1 563,45	196,70	1 524,11	196,75	1 523,72
186,80	1 605,74	186,85	1604,46	191,80	1 563,05	191,85	1 562,64	196,80	1 523,34	196,85	1 522,95
186,90	1 604,03	186,95	1603,60	191,90	1 562,23	191,95	1 561,83	196,90	1 522,56	196,95	1 522,18
187,00	1 603,17	187,05	1602,74	192,00	1 561,42	192,05	1 561,01	197,00	1 521,79	197,05	1 521,40
187,10	1 602,31	187,15	1601,88	192,10	1 560,61	192,15	1 560,2	197,10	1 521,02	197,15	1 520,63
187,20	1 601,46	187,25	1601,03	192,20	1 559,79	192,25	1 559,39	197,20	1 520,25	197,25	1 519,86
187,30	1 600,60	187,35	1600,17	192,30	1 558,98	192,35	1 558,58	197,30	1 519,48	197,35	1 519,09
187,40	1 599,75	187,45	1599,32	192,40	1 558,17	192,45	1 557,77	197,40	1 518,71	197,45	1 518,32
187,50	1 598,89	187,55	1598,47	192,50	1 557,36	192,55	1 556,96	197,50	1 517,94	197,55	1 517,55
187,60	1 598,04	187,65	1597,62	192,60	1 556,55	192,65	1 556,15	197,60	1 517,17	197,65	1 516,78
187,70	1 597,19	187,75	1596,76	192,70	1 555,75	192,75	1 555,34	197,70	1 516,4	197,75	1 516,02
187,80	1 596,34	187,85	1595,91	192,80	1 554,94	192,85	1 554,54	197,80	1 515,63	197,85	1 515,25
187,90	1 595,49	187,95	1595,06	192,90	1 554,13	192,95	1 553,73	197,90	1 514,87	197,95	1 514,49
188,00	1 594,64	188,05	1594,22	193,00	1 553,33	193,05	1 552,93	198,00	1 514,1	198,05	1 513,72
188,10	1 593,79	188,15	1593,37	193,10	1 552,52	193,15	1 552,12	198,10	1 513,34	198,15	1 512,96
188,20	1 592,95	188,25	1592,52	193,20	1 551,72	193,25	1 551,32	198,20	1 512,58	198,25	1 512,19
188,30	1 592,10	188,35	1591,68	193,30	1 550,92	193,35	1 550,52	198,30	1 511,81	198,35	1 511,43
188,40	1 591,26	188,45	1590,83	193,40	1 550,12	193,45	1 549,72	198,40	1 511,05	198,45	1 510,67
188,50	1 590,41	188,55	1589,99	193,50	1 549,32	193,55	1 548,91	198,50	1 510,29	198,55	1 509,91
188,60	1 589,57	188,65	1589,15	193,60	1 548,51	193,65	1 548,11	198,60	1 509,53	198,65	1 509,15
188,70	1 588,73	188,75	1588,30	193,70	1 547,72	193,75	1 547,32	198,70	1 508,77	198,75	1 508,39
188,80	1 587,88	188,85	1587,46	193,80	1 546,92	193,85	1 546,52	198,80	1 508,01	198,85	1 507,63
188,90	1 587,04	188,95	1586,62	193,90	1 546,12	193,95	1 545,72	198,90	1 507,25	198,95	1 506,87
189,00	1 586,20	189,05	1585,78	194,00	1 545,32	194,05	1 544,92	199,00	1 506,49	199,05	1 506,12
189,10	1 585,36	189,15	1584,95	194,10	1 544,53	194,15	1 544,13	199,10	1 505,74	199,15	1 505,36
189,20	1 584,53	189,25	1584,11	194,20	1 543,73	194,25	1 543,33	199,20	1 504,98	199,25	1 504,60
189,30	1 583,69	189,35	1583,27	194,30	1 542,94	194,35	1 542,54	199,30	1 504,23	199,35	1 503,85
189,40	1 582,85	189,45	1582,44	194,40	1 542,14	194,45	1 541,75	199,40	1 503,47	199,45	1 503,10
189,50	1 582,02	189,55	1581,60	194,50	1 541,35	194,55	1 540,95	199,50	1 502,72	199,55	1 502,34
189,60	1 581,18	189,65	1580,77	194,60	1 540,56	194,65	1 540,16	199,60	1 501,97	199,65	1 501,59
189,70	1 580,35	189,75	1579,93	194,70	1 539,77	194,75	1 539,37	199,70	1 501,21	199,75	1 500,84
189,80	1 579,52	189,85	1579,10	194,80	1 538,98	194,85	1 538,58	199,80	1 500,46	199,85	1 500,09
189,90	1 578,69	189,95	1578,27	194,90	1 538,19	194,95	1 537,79	199,90	1 499,71	199,95	1 499,34
190,00	1 577,86	190,05	1577,44	195,00	1 537,40	195,05	1 537,00	200,00	1 498,96	200,05	1 498,59
190,10	1 577,03	190,15	1576,61	195,10	1 536,61	195,15	1 536,22	200,10	1 498,21	200,15	1 497,84
190,20	1 576,20	190,25	1575,78	195,20	1 535,82	195,25	1 535,43	200,20	1 497,46	200,25	1 497,09
190,30	1 575,37	190,35	1574,95	195,30	1 535,04	195,35	1 534,64	200,30	1 496,72	200,35	1 496,34
190,40	1 574,54	190,45	1574,13	195,40	1 534,25	195,45	1 533,86	200,40	1 495,97	200,45	1 495,60
190,50	1 573,71	190,55	1573,30	195,50	1 533,47	195,55	1 533,07	200,50	1 495,22	200,55	1 494,85
190,60	1 572,89	190,65	1572,48	195,60	1 532,68	195,65	1 532,29	200,60	1 494,48	200,65	1 494,11
190,70	1 572,06	190,75	1571,65	195,70	1 531,90	195,75	1 531,51	200,70	1 493,73	200,75	1 493,36
190,80	1 571,24	190,85	1570,83	195,80	1 531,12	195,85	1 530,72	200,80	1 492,99	200,85	1 492,62
190,90	1 570,42	190,95	1570,01	195,90	1 530,33	195,95	1 529,94	200,90	1 492,25	200,95	1 491,88

### Flujo de caja proyectada

DESCRIPCION	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6
RESULTADO DEL EJERCICIO	\$ -	\$ -5,566,005,20	\$ -10,480,686,75	\$ -15,395,368,30	\$ -20,310,049,85	\$ -25,224,731,40
INGRESOS	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 9,828,000,00
TOTAL DISPONIBLE	\$ -	\$ -5,566,005,20	\$ -10,480,686,75	\$ -15,395,368,30	\$ -20,310,049,85	\$ -15,396,731,40
EGRESOS						
GASTO INVERSION	\$ 651,323,65	\$ -	\$ 506,585,06	\$ -	\$ 289,477,18	\$ -
GASTOS ADMINISTRATIVOS	\$ 3,648,000,00	\$ 3,648,000,00	\$ 3,648,000,00	\$ 3,648,000,00	\$ 3,648,000,00	\$ 3,648,000,00
GASTOS DE MANTENIMIENTO	\$ 1,152,000,00	\$ 1,152,000,00	\$ 1,152,000,00	\$ 1,152,000,00	\$ 1,152,000,00	\$ 1,152,000,00
PAGO FIBRA ARRENDADA	\$ 102,620,00	\$ 102,620,00	\$ 102,620,00	\$ 102,620,00	\$ 102,620,00	\$ 102,620,00
DEPRECIACION	\$ 12,061,55	\$ 12,061,55	\$ 12,061,55	\$ 12,061,55	\$ 12,061,55	\$ 12,061,55
TOTAL EGRESOS	\$ 5,566,005,20	\$ 4,914,681,55	\$ 4,914,681,55	\$ 4,914,681,55	\$ 4,914,681,55	\$ 4,914,681,55
SALDO FINAL	\$ -5,566,005,20	\$ -10,480,686,75	\$ -15,395,368,30	\$ -20,310,049,85	\$ -25,224,731,40	\$ -20,311,412,95

DESCRIPCION	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
RESULTADO DEL EJERCICIO	\$ -20,311,412,95	\$ -15,398,094,50	\$ -10,484,776,05	\$ -5,571,457,60	\$ -658,139,15	\$ 4,255,179,30
INGRESOS	\$ 9,828,000,00	\$ 9,828,000,00	\$ 9,828,000,00	\$ 9,828,000,00	\$ 9,828,000,00	\$ 9,828,000,00
TOTAL DISPONIBLE	\$ -10,483,412,95	\$ -5,570,094,50	\$ -656,776,05	\$ 4,256,542,40	\$ 9,169,860,85	\$ 14,083,179,30
EGRESOS						
GASTO INVERSION	\$ -	\$ -				
GASTOS ADMINISTRATIVOS	\$ 3,648,000,00	\$ 3,648,000,00	\$ 3,648,000,00	\$ 3,648,000,00	\$ 3,648,000,00	\$ 3,648,000,00
GASTOS DE MANTENIMIENTO	\$ 1,152,000,00	\$ 1,152,000,00	\$ 1,152,000,00	\$ 1,152,000,00	\$ 1,152,000,00	\$ 1,152,000,00
PAGO FIBRA ARRENDADA	\$ 102,620,00	\$ 102,620,00	\$ 102,620,00	\$ 102,620,00	\$ 102,620,00	\$ 102,620,00
DEPRECIACION	\$ 12,061,55	\$ 12,061,55	\$ 12,061,55	\$ 12,061,55	\$ 12,061,55	\$ 12,061,55
TOTAL EGRESOS	\$ 4,914,681,55	\$ 4,914,681,55	\$ 4,914,681,55	\$ 4,914,681,55	\$ 4,914,681,55	\$ 4,914,681,55
SALDO FINAL	\$ -15,398,094,50	\$ -10,484,776,05	\$ -5,571,457,60	\$ -658,139,15	\$ 4,255,179,30	\$ 9,168,497,75