



**Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo**

**Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería**

---

**Proyecto: Red de Intercomunicación de Fibra Óptica para la Compañía  
Luz y Fuerza del Centro**

**TESIS**

Que para obtener el Título de  
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Presenta:

Salvador Ariel Hernandez Garcia

Asesor: Ing. Francisco Javier Cuellar Ortega

Pachuca de Soto, Hidalgo Junio 2009










UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
COORDINACIÓN ADJUNTA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

P.D.I.E.T. Salvador Ariel Hernandez Garcia  
P R E S E N T E.

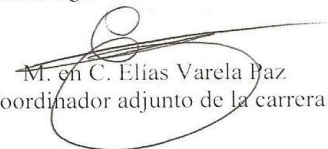
Por este conducto le comunico que el jurado que le fue asignado al trabajo de titulación denominado **“Proyecto: Red de intercomunicación de fibra óptica para la compañía Luz y Fuerza del Centro”**, y que después de revisarlo en reunión de sinodales han decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de los integrantes del jurado:

PRESIDENTE:	Ing. Miguel A. Rosas Yacotú	
PRIMER SINODAL:	Ing. Francisco Javier Cuellar Ortega	
SEGUNDO SINODAL:	M. en C. Elías Varela Paz.	
TERCER SINODAL:	Ing. Omar Samperio Vazquez	
SECRETARIO:	Ing. Jaime Barrera Rodriguez	
PRIMER SUPLENTE:	Ing. José Salvador Avila Flores	
SEGUNDO SUPLENTE:	Ing. Atanasio Muños Neri	

Sin otro particular, reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

A T E N T A M E N T E.  
"AMOR, ORDEN Y PROGRESO  
Pachuca, Hgo. a 29 de Junio del 2009.

  
M. en C. Elías Varela Paz  
Coordinador adjunto de la carrera

C.c.p. Integrantes del Jurado  
C.c.p. Expediente

Ciudad Universitaria  
Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 C.P. 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
Tel. 01771 71-720 00 Ext. 6320 Fax 01771 71-7 21 09  
e-mail: [evarela@uaeh.reduaeh.mx](mailto:evarela@uaeh.reduaeh.mx)

A quines no solo me dieron la vida si no que día a día con su cariño, ejemplo, apoyo, comprensión y entrega por la superación constante. Mis padres Gloria y Salvador.

A ustedes que con sus enseñanzas han fortalecido en mí el espíritu profesional. Mis Maestros.

## ÍNDICE

Objetivo general.....	xv
Justificación .....	xv
Introducción.....	xvi

### **CAPÍTULO 1 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN ÓPTICOS**

1.1 Sistemas de larga distancia.....	1
1.1.1 Enlace típico de larga distancia.....	3
1.1.1.1 Pérdidas por tramo.....	5
1.1.2 Compensación por dispersión de banda ancha.....	6
1.1.3 Administración de la dispersión óptica no lineal.....	9
1.1.4 Amplificación en banda ancha.....	10
1.2 Fibras para Sistemas Metropolitano y Sistemas de Acceso.....	12
1.3 Requerimientos de la Fibra óptica.....	13
1.4 Tipos de Fibra Óptica.....	14
1.4.1 Sistema de cableado OPGW.....	15
1.4.1.1 Sistemas ópticos aéreos.....	15
1.4.1.2 Ventajas del sistema de cableado OPGW.....	15
1.4.1.3 Tecnología de Cables Compuestos Tierra Ópticos OPGW.....	16
1.4.1.3.1 Monocorona.....	17
1.4.1.3.2 Doble corona.....	17
1.4.1.3.3 Monotubo central.....	18
1.4.1.3.4 Tubos de acero.....	19
1.4.2 Sistema de conexión para cable tierra-óptico OPGW.....	20
1.4.2.1 Cajas de empalme.....	20
1.4.2.2 Repartidores terminales.....	21
1.4.2.3 Repartidores Slim.....	21
1.4.2.4 Repartidores Modulares.....	21
1.4.2.5 Conjunto de suspensión.....	22

1.4.2.6 Conjunto de amarre.....	23
1.4.2.7 Grapa de bajada.....	23
1.4.2.8 Amortiguador.....	24
1.4.2.9 Caballete.....	24
1.5 Conexiones de fibra óptica: uniones y acopladores.....	26
1.6 Empalmes de Fibra.....	26
1.7 Pérdidas en empalmes de fibras multimodo.....	28
1.7.1 Eficiencia Lateral.....	28
1.7.2 Eficiencia angular.....	29
1.7.3 Eficiencia longitudinal.....	30
1.8 Pérdidas en empalmes de fibras monomodo.....	30
1.9 Tipos de empalmes o uniones fijas entre fibras.....	31
1.9.1 Conexiones por empalme.....	31
1.9.1.1 Conectores para Fibra.....	34
1.9.1.1.2 Tipos de conectores.....	34
1.9.2 Acopladores o adaptadores.....	36
1.9.3 Conectores de proximidad.....	36
1.9.4 Conectores de haz expandido.....	38
1.10 Diseño del sistema.....	38
1.10.1 Limitaciones en la potencia recibida.....	38
1.10.2 Limitaciones en el transmisor de potencia.....	39
1.10.3 El ancho de banda utilizable de la fibra óptica.....	39
1.10.4 El ancho de banda de un sistema multimodo.....	40
1.10.5 El ancho de banda de un sistema monomodo.....	41
1.11 Fuentes de Luz y detectores.....	42
1.11.1 Láser.....	42
1.11.2 Láser para Luz visible.....	43
1.11.3 Láseres monomodo para las comunicaciones.....	43
1.11.4 LED Diodo emisor de Luz.....	44

1.11.5 Diodos PIN.....	44
1.12 Componentes de fibra óptica y dispositivos.....	45
1.12.1 Receptor de enlace óptico.....	45
1.12.1.1 Detectores para sistemas ópticos.....	45
1.12.1.1.1 Detectores fotodiodos.....	46
1.12.1.1.2 Tiempo de Respuesta.....	46
1.12.2 Fotodiodo avalancha.....	47
1.12.3 Análisis de ruidos en el receptor ruido térmico y cuántico.....	48
1.12.4 Receptor ideal.....	49
1.13 Modulación de potencia y modulación coherente.....	50
1.13.1 Ruido de multiplicación por avalancha.....	51
1.13.2 Otros ruidos e interferencia Inter símbolo.....	52
1.14 Circuito del detector.....	53
1.15 Transmisor de enlace óptico.....	55
1.15.1 Láser semiconductor para sistemas ópticos.....	55
1.15.1.1 Tipos de láser digresión.....	55
1.15.1.2 Características de los emisores.....	56
1.15.1.3 Propiedades modales de emisión.....	58
1.15.1.4 Circuito de alimentación del emisor.....	59
1.15.1.5 Circuito de polarización.....	59
1.15.1.6 Diagrama a bloques de un conversor eléctrico-óptico.....	61
1.16 Amplificadores de fibra y otros componentes.....	62
1.16.1 Amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA).....	62
1.16.2 Compensadores de dispersión.....	63
1.16.3 Conmutación.....	64
1.16.4 Modulador óptico.....	66
1.16.5 Fenómeno termoeléctrico.....	67
1.16.6 Rejillas de la Fibra.....	67
1.16.6.1 Aplicaciones de las rejillas en la Fibra.....	69

1.16.6.1.1 Estabilización de la longitud de onda del láser.....	69
1.16.7 Filtros y Demultiplexores.....	71
1.16.8 Técnicas de compensación de dispersión implementadas en el transmisor.....	72
1.16.8.1 Prechirping.....	72
1.16.8.2 Filtros ópticos lineales.....	72
1.16.9 Control y gestión de redes ópticas WDM.....	73
1.16.10 La capa óptica su interoperabilidad y seguridad.....	73
1.16.11 Gestión del rendimiento y de Fallas en WDM.....	74

**CAPÍTULO 2 PROTECCIÓN DE ANILLOS DE FIBRA ÓPTICA Y APLICACIONES DE REDES ÓPTICAS**

2.1 Protección de anillos de fibra óptica.....	77
2.2 Protección y restauración.....	78
2.2.1 Métodos de recuperación.....	79
2.2.1.1 Método de recuperación SONET/SDH.....	80
2.2.1.2 Comparación entre Anillo y Malla.....	83
2.3 Sincronismo.....	84
2.3.1 Relojes involucrados en una red de sincronismo definiciones según G.810.....	84
2.3.1.1 Características de un reloj TNC y LNC.....	86
2.3.2 Sincronismo de equipos SDH.....	86
2.3.3 Programación del sincronismo.....	86
2.3.4 Loop de sincronismo.....	87
2.3.5 Proceso de cambio de dirección del flujo de reloj.....	88
2.4 Actualidad y futuro de las redes ópticas.....	89
2.4.1 Aplicaciones de WDM.....	92
2.4.2 Televisión por cable.....	92
2.4.3 Sistemas de radio sobre fibra óptica.....	93
2.4.4 Telemedicina.....	95
2.4.5 Videoconferencia.....	95

2.4.6 Fibra oscura.....	95
-------------------------	----

### **CAPÍTULO 3 PROYECTO**

3.1 Esbozo del Proyecto.....	96
3.2 Cálculos de Enlace Óptico.....	102

### **CAPÍTULO 4 CARACTERIZACIÓN Y MEDICIONES EN REDES ÓPTICAS**

4.1 Caracterización de redes de fibra óptica.....	109
4.1.1 Mediciones con OTDR (Reflectómetro Óptico en el dominio del tiempo).....	110
4.1.2 Sucesos en el OTDR.....	110
4.1.3 Índice de refracción y coeficiente de dispersión de una fibra.....	114
4.1.4 Ancho de pulso y resolución.....	115
4.2 OLTS (optical loss test set) Equipo de prueba de pérdida óptica.....	116

<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>118</b>
--------------------------	------------

### **APÉNDICE A INSTALACIÓN DE FIBRA ÓPTICA**

A-1 Instalación aérea del cable de fibra óptica.....	120
A-1.1 Estrategias de extracción de cables.....	120
A-1.2 Instalación en configuración de enrollado retractable/fijo.....	121
A-1.3 Ubicación de la guía de instalación.....	122
A-1.4 Instalación del remolque.....	122
A-2 Enrollado retractable/Fijo Paso del poste y guinche mecánico.....	122
A-2.1 Métodos para el guinche mecánico.....	122
A-2.2 Atadura de cables y cable adicional para empalme y reubicación futura.....	122
A-2.3 Acople de la abrazadera de atadura de cables.....	123
A-2.4 Paso del atador de cables en el poste.....	123
A-2.5 Método de instalación con desplazamiento de carrete y atadura de cables.....	124
A-2.6 Paso por el poste.....	125



A-2.7 Instalación del cable autoportado.....	125
A-2.7.1 Método el de instalación con desplazamiento de carrete.....	125
A-2.8 Enrollado retractable/Fijo.....	126
A-3 Instalación del cable de fibra óptica en conducto.....	127
A-3.1 Empuje neumático del cable de fibra óptica.....	127
A-3.2 Largas extracciones a través del conducto.....	128
A-3.2.1 Extracción en etapas a ubicaciones intermedias.....	128
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>129</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>131</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Avances en la capacidad de los sistemas y las tecnologías.....	2
<b>Figura 1.2</b> Sistema de transmisión óptica simple, compuesta de N tramos concatenados.....	3
<b>Figura 1.3</b> Efectos de, (a) distancia del tramo, (b) pérdidas en la fibra, (c) figura de ruido en el amplificador, (d) requerimientos de relación señal a ruido por canal, potencia requerida para un enlace 4000km de distancia con tramos de 80km.F= 5dB para (a) y (b).....	4
<b>Figura 1.4</b> Espectro típico de un cable de fibra óptica que indica la pérdida de las regiones asociadas con las bandas de transmisión C y L.....	6
<b>Figura 1.5</b> Comparación de la dispersión espectral de varias fibras tipo NZDF (G.655).....	7
<b>Figura 1.6</b> Mejora de la dispersión de los residuos de baja pendiente (LS) y área efectiva (LA) NZDF después de la compensación de un DCF comercial (RDS aprox. 0.009) con un extra alta pendiente en comparación con un estándar DCF (RDS aprox. 0.009). La región sombreada indica la ventana de funcionamiento de tramos de 100Km a 40Gbps.....	8
<b>Figura 1.7</b> Mapas de dispersión: a) compensación de la dispersión por tramo debajo de 90%, b) compensación de la dispersión por tramo al 100%, c) compensación de la dispersión por tramo al 110%.....	10
<b>Figura 1.8</b> Factores Q para los tres mapas de dispersión.....	10
<b>Figura 1.9</b> $Q$ contra $A_{eff}$ , para un $P_{ch}$ con rango de 0dBm a 7.5dBm. sistema de 7 canales de 40Gbps, espaciado 100GHz, NRZ, 6 X 120Km, $n_{sp} = 2$ y una haz de 500mW de potencia. Indica que el mejor $Q$ en el mejor rango de $P_{ch}$ es saciado con $A_{eff}$ moderada ( $50 - 60 \mu m^2$ ). .....	12
<b>Figura 1.10</b> Características de dispersión de Fibras, no se señala escala.....	14
<b>Figura 1.11</b> Características de pérdida en Fibras.....	15

<b>Figura 1.12</b> Cable compuesto tierra óptico OPGW Monocorona.....	17
<b>Figura 1.13</b> Cable compuesto tierra óptico OPGW Doble corona.....	18
<b>Figura 1.14</b> Cable compuesto tierra óptico OPGW Monotubo central.....	19
<b>Figura 1.15</b> Cable compuesto tierra óptico OPGW Tubos de acero.....	19
<b>Figura 1.16</b> Cajas de empalme.....	20
<b>Figura 1.17</b> Repartidores murales.....	21
<b>Figura 1.18</b> Repartidores Slim.....	21
<b>Figura 1.19</b> Repartidor modular.....	22
<b>Figura 1.20</b> Conjunto de suspensión.....	22
<b>Figura 1.21</b> Conjunto de amarre.....	23
<b>Figura 1.22</b> Grapa de bajada.....	23
<b>Figura 1.23</b> Amortiguador.....	24
<b>Figura 1.24</b> Caballete.....	24
<b>Figura 1.25</b> Sistema de Cableado OPGW.....	25
<b>Figura 1.26</b> Posible causas de no alineamiento, a) Longitudinal, b) Lateral, c) angular.....	27
<b>Figura 1.27</b> Atenuación por alineamiento incorrecto.....	29
<b>Figura 1.28</b> Acoplamiento entre dos fibras separadas longitudinalmente.....	30
<b>Figura 1.29</b> Empalme por arco voltaico.....	32
<b>Figura 1.30</b> El fenómeno del auto alineamiento.....	33
<b>Figura 1.31</b> Técnicas para conexión de fibras sin utilizar fusión.....	33
<b>Figura 1.32</b> Tipos de conectores para Fibra Óptica.....	35
<b>Figura 1.33</b> Conector Alberino de Diamond.....	35
<b>Figura 1.34</b> Tipos de acopladores.....	36
<b>Figura 1.35</b> Conectores de camisa concéntrica: (a) estructura de un conector básico, (b) estructura de un conector con salida de precisión.....	37
<b>Figura 1.36</b> Esquema simplificado del funcionamiento de un conector de haz expandido.....	38
<b>Figura 1.37</b> Tiempo de subida corto necesita ancho de banda amplio.....	40

Con formato: Español (España)

<b>Figura 1.38</b> Tipos de Láser.....	43
<b>Figura 1.39</b> Encapsulado de Led's y Cubierta SMA.....	44
<b>Figura 1.40</b> Absorción de luz y tiempo de respuesta de los detectores de luz.....	46
<b>Figura 1.41</b> Esquema de los detectores PIN y APD para señales ópticas.....	47
<b>Figura 1.42</b> Características eléctricas de los detectores ópticos.....	50
<b>Figura 1.43</b> Diagrama de detectores ópticos.....	54
<b>Figura 1.44</b> Circuito detector óptico. Un equipo de fibras ópticas SDH, la unidad de transmisión y recepción óptica y un detalle del detector.....	54
<b>Figura 1.45</b> Diversos tipos de emisores Láser.....	55
<b>Figura 1.46</b> Características eléctricas de los emisores ópticos.....	57
<b>Figura 1.47</b> Diagrama de los emisores Láser.....	60
<b>Figura 1.48</b> Amplificador EDFA.....	62
<b>Figura 1.49</b> Fibra de $\lambda$ más alta tiene dispersión negativa.....	63
<b>Figura 1.50</b> Diagrama de un multiplexor.....	64
<b>Figura 1.51</b> Equipos y fabricantes.....	64
<b>Figura 1.52</b> Diagrama de un OXC.....	65
<b>Figura 1.53</b> Propiedades del OXC.....	66
<b>Figura 1.54</b> Componentes de óptica integrada.....	68
<b>Figura 1.55</b> Forma de hacer una rejilla en un lado de la fibra.....	69
<b>Figura 1.56</b> Espectros de transmisión y reflexión de una fuerza moderada de rejillas en fibra.....	70
<b>Figura 1.57</b> Técnica activamente para la estabilización de la longitud de onda sintonizable de un reflector de Bragg distribuido (DBR) de láser con una reja.....	71
<b>Figura 2.1</b> Capacidades básicas de recuperación.....	78
<b>Figura 2.2</b> Efecto de la topología en la capacidad de restauración.....	79
<b>Figura 2.3</b> Opciones de la conmutación automática de protección (APS Automatic protection switching).....	80
<b>Figura 2.4</b> Anillo con trayectoria conmutada (ejemplo basado en OC-48 UPSR)...	82

Con formato: Español (España)

<b>Figura 2.5</b> Anillo genérico con trayectoria de conmutación.....	82
<b>Figura 2.6</b> Ejemplos de topología en anillo.....	83
<b>Figura 2.7</b> Propagación del sincronismo en la red SDH.....	87
<b>Figura 2.8</b> Reconfiguración del sincronismo en una red y un anillo.....	89
<b>Figura 2.9</b> Generalized Multiprotocol Label Switching.....	90
<b>Figura 2.10</b> Modelo Overlay y modelo Peer.....	91
<b>Figura 2.11</b> Control centralizado y control distribuido.....	91
<b>Figura 2.12</b> Aplicaciones de WDM.....	92
<b>Figura 2.13</b> Sistema de Televisión por Cable.....	93
<b>Figura 2.14</b> Sistemas de radio sobre fibra óptica.....	94
<b>Figura 3.1</b> Rack para cableado estructurado y equipo de telecomunicaciones.....	98
<b>Figura 3.2</b> Cuarto de telecomunicaciones.....	98
<b>Figura 3.3</b> Anillo 1.....	99
<b>Figura 3.4</b> Anillos 2.....	100
<b>Figura 3.5</b> Anillo 3.....	101
<b>Figura 3.6</b> Enlace entre dos puntos.....	102
<b>Figura 3.7</b> Curva de atenuación en la fibra óptica.....	103
<b>Figura 3.8</b> Enlace óptico de dos sitios.....	104
<b>Figura 3.9</b> Cálculo de la pérdida total para la ruta B.....	104
<b>Figura 4.1</b> Traza del OTDR con solo una reflexión de inicio y otra de fin.....	111
<b>Figura 4.2</b> Traza con eventos entre dos puntos.....	111
<b>Figura 4.3</b> Reflexión por inserción (pulso de entrada).....	111
<b>Figura 4.4</b> Reflexión por fin de fibra (pulso de salida).....	112
<b>Figura 4.5</b> Ruptura de una fibra.....	112
<b>Figura 4.6</b> Reflexión por conexión.....	113
<b>Figura 4.7</b> Perdida por empalme de fusión.....	113
<b>Figura 4.8</b> Ganancia por empalme de fusión.....	113
<b>Figura 4.9</b> Fisura en la fibra.....	114
<b>Figura 4.10</b> Medición de inicio de fibra con un cable auxiliar.....	114

Con formato: Español (España)

<b>Figura 4.11</b> Traza con pulsos cortos.....	115
<b>Figura 4.12</b> Traza con pulsos largos.....	116
<b>Figura 4.13</b> OLTS Equipo de prueba de pérdida óptica EXFO.....	117
<b>Figura A.1</b> Medio punto de la instalación.....	121
<b>Figura A.2</b> Desenrollado del cable.....	121
<b>Figura A.3</b> Instalación en configuración de enrollado retractable/fijo.....	122
<b>Figura A.4</b> Abrazadera de atadura.....	123
<b>Figura A.5</b> Paso del atador de cables en el poste.....	124
<b>Figura A.6</b> Método de instalación con desplazamiento de carrete y atadura de cables.....	124
<b>Figura A.7</b> Bucle de alivio de Tensión.....	125
<b>Figura A.8</b> Paso por el poste.....	125
<b>Figura A.9</b> Instalación del cable autoportado con el método de instalación con desplazamiento de carrete.....	126
<b>Figura A.10</b> Instalación del cable autoportado con método de Enrollado retractable/Fijo.....	127
<b>Figura A.11</b> Extracciones largas a través del conducto, técnica de extracción a medio punto.....	127
<b>Figura A.12</b> Desenrollado del cable.....	128
<b>Figura A.13</b> Extracción en etapas a ubicaciones intermedias.....	128

Con formato: Español (España)  
 Con formato: Derecha, Interlineado: 1.5 líneas

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Aproximación relativa de la pendiente de la dispersión ( $\text{nm}^{-1}$ ) valores varios fibras tipo G.655 y G.652.....	9
<b>Tabla 1.2</b> Características de Cables Compuestos Tierra Ópticos OPGW.....	16
<b>Tabla 1.3</b> Corrimiento de los parámetros con la temperatura.....	58
<b>Tabla 1.4</b> Comparación de características de Láser y Led.....	59
<b>Tabla 2.1</b> Métodos de recuperación SONET.....	80
<b>Tabla 2.2</b> Señales y velocidades binarias SONET.....	81
<b>Tabla 3.1</b> Cálculos anillo 1.....	106
<b>Tabla 3.2</b> Cálculos anillo 2.....	107
<b>Tabla 3.3</b> Cálculos anillo 3.....	108
<b>Tabla 4.1</b> Relación distancia-resolución de muestreo.....	116

Con formato: Español (España)

### **Objetivo general**

Diseñar una red de fibra óptica para la compañía Luz y fuerza del Centro, en la ciudad de México que permita optimizar los sistemas de comunicaciones y mostrar las grandes ventajas que tendrá el diseño de esta red, ya que complementara la red existente agregando funcionalidad.

### **Justificación**

La actual red de telecomunicaciones de la compañía Luz y Fuerza del Centro necesita ser ampliada y modernizada a fin de poder hacer frente a la demanda y proporcionar un respaldo a su red de telecomunicaciones actual.

Instalar una red de fibra óptica en un lugar implica una gran inversión, ya que es costoso para la empresa que desea instalarla, la dotación de servicios de comunicaciones mediante fibra óptica tendrá un valor agregado a futuro abaratando los costos en sus comunicaciones, al no tener que depender de una red externa que proporciona el servicio de telecomunicaciones.

Con este proyecto se pretende dar un gran crecimiento y desarrollo al manejo de la información y las comunicaciones de Luz y Fuerza del Centro y así hacer más fácil y eficaz el desarrollo de las actividades cotidianas de la empresa.



## **Introducción**

La industria de las comunicaciones ópticas ha experimentado un crecimiento fenomenal durante los últimos años, estimulando un importante mercado comercial en los componentes ópticos y sistemas de telecomunicación. Este crecimiento se ha extendido en todos los campos de aplicación, desde distancias transoceánicas y transcontinentales a las redes locales para campus universitarios y cableados en edificios.

La explosión de la demanda por la banda ancha ha sido impulsada por el crecimiento de la Internet y el manejo de información por vía electrónica, a medida que mas hogares tienen conexión a Internet, y mas negocios hacen transacciones en línea. Las consecuencias de este crecimiento van más allá de simplemente incrementar la cantidad de información que puede ser transmitida entre dos puntos.

El transporte de datos a través de Internet presenta diferentes patrones de tráfico que el tráfico de voz que dominó las telecomunicaciones hasta finales de los años 90's. El tráfico de voz típicamente se mantiene en una región local o metropolitana donde fue generada. Además de que el ancho de banda para voz solo requiere de 64Kbps, así que la transmisión de Terabits a larga distancia era considerado innecesario.

Ahora los datos generados en la Internet toman diferentes formatos, como audio, videoclips y archivos de computadora grandes. Este tipo de datos es igual a que viajen grandes distancias como a que sean enviados en forma local. Por lo tanto la necesidad de transmisión de alta capacidad a larga distancia ha crecido tan rápido como la Internet misma.

A su vez, el crecimiento explosivo en el eje óptico ha creado una mayor demanda de la red de larga distancia. Esto empuja a que los requerimientos de ancho de banda en aplicaciones de corto alcance, así la necesidad de conectividad al usuario final mediante fibra óptica esta cada vez más cerca. Como los límites de la tecnología óptica se acercan, requisitos para la fibra óptica y los componentes ópticos se están convirtiendo en componentes específicos para aplicaciones específicas.

Por ejemplo, las fibras de transmisión actuales son subóptimas para la próxima generación de redes de larga distancia que remitirá la información a terabits por segundo, la velocidad a lo largo de miles de kilómetros. Mientras tanto el deseo de utilizar componentes de bajo costo para las arquitecturas de corto alcance ha impulsado el desarrollo de fibras de un ancho de banda muy amplio. Nuevos diseños de fibra han ido evolucionando para hacer frente a características tales como la dispersión cromática, óptica no lineal, el sistema de costos y óptica de ancho de banda que es específico a determinadas aplicaciones y arquitecturas.

De hecho muchos de los proveedores de cable y Fibra óptica en todo el mundo han comenzado a comercializar diseños de fibra para aplicaciones específicas.

---

## CAPÍTULO 1

### SISTEMAS DE COMUNICACIÓN ÓPTICOS

#### 1.1 Sistemas de larga distancia

Las distancias típicas entre la mayoría de los centros de interconexión están en el orden de los 1600Km en Estados Unidos, mientras que en Europa las distancias típicas son de 400Km. De cualquier manera, con la llegada de esta tecnología de conmutación óptica o fotónica a estos centros, la transmisión electrónica a grandes distancias sin regeneración puede llegar a los miles de kilómetros en ambos casos, con espacio para la aplicación de estos sistemas, se ha extendido en las redes regionales. Tal y como las distancias ultra largas han sido históricamente reservadas para enlaces de fibra submarina punto a punto, donde las distancias transoceánicas son típicamente 10000Km 4000Km, para rutas Trans-pacíficas y Trans-Atlánticas, respectivamente. Dado que estas distancias no son abordadas en aplicaciones terrestres, no es descabellado pensar en utilizar un sistema similar para aplicaciones terrestres.

Tanto en sistemas de larga distancia y submarinos, dependen en gran medida en la Multiplexación por división en longitudes de onda densas (DWDM), para alcanzar señales de alta capacidad de transporte.

DWDM es un medio muy efectivo de compartir los costos cuando la transmisión de fibra y otros componentes comunes, tales como amplificadores ópticos dominan la sistemática general de los costos.

Como se muestra en la figura 1.1, la capacidad total de una sola fibra óptica puede aumentar ya sea por el aumento en la tasa de bits, o por el aumento del número de canales usando longitudes de onda con DWDM.

Lo primero requiere el desarrollo de nueva electrónica de alta velocidad, mientras que DWDM permite a fibra y amplificadores ser compartidos entre todos los canales, haciendo disminuir el costo total del sistema por canal. Ya que la información debe ser codificada en la longitud de onda de los canales, hoy en día los sistemas de larga distancia combinan la Multiplexación por división de tiempo (TDM) con DWDM, aprovechando los avances de la alta velocidad de TDM para seguir reduciéndole costo del sistema por bit y por canal.

Los avances en la electrónica de alta velocidad han permitido aumentar las tasas de datos de 0.0622Gbps a 2.48Gbps a 10Gbps. Sin embargo el aumento de las tasas de datos más allá de los 10Gbps y 40Gbps podría tener una disminución de regreso en términos de costos como uno emigra de la esfera de componentes electrónicos para la multiplexación, demultiplexación, la modulación, y detección óptica a la de las técnicas de procesamiento que actualmente se prevé para 160Gbps y más allá.

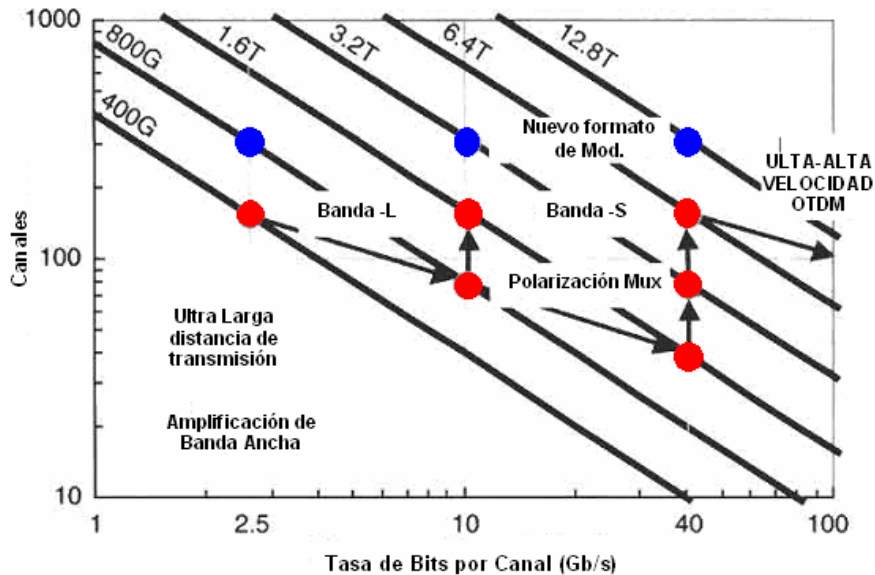


Figura 1.1 Avances en la capacidad de los sistemas y las tecnologías.

Actualmente el desarrollo de sistemas de larga distancia se ha enfocado en la ultra banda ancha DWDM y el transporte ultra largo. Estos sistemas activan los nuevos formatos de modulación, amplificación de banda ancha, compensación de dispersión y la utilización de la codificación de corrección de errores hacia delante. En su conjunto, estos sistemas entregaran el menor costo por bit transmitido sobre las distancias más grandes.

La fibra óptica es un componente integral de todo el sistema. Los parámetros de la fibra tienen un impacto significativo en los costos y los resultados en influir en la elección de la mayoría de los otros componentes, tales como amplificadores y compensadores.

De hecho el uso la ultra banda ancha DWDM, sobre largas distancias ha elevado los requisitos de la fibra en términos de la gestión de la dispersión, los rendimientos no lineales, distribución de ganancia y pérdida espectral, el modo de dispersión y la polarización (PMD).

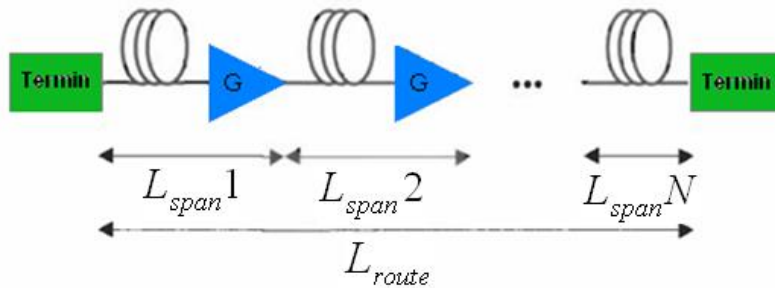


Figura 1.2 Sistema de transmisión óptica simple, compuesta de N tramos concatenados.

### 1.1.1 Enlace típico de larga distancia

Un enlace típico de larga distancia se muestra en la figura 1.2. En donde  $L_{route}$  es la distancia total entre los dos extremos de las terminales que contienen los transmisores de señal, y  $L_{span}$  es la distancia entre los amplificadores. En un sistema con ganancia unitaria el amplificador de ganancia  $G$  está configurado para compensar exactamente la pérdida del tramo. La pérdida en el tramo es la suma de la atenuación de la fibra de planta exterior y las pérdidas debidas a empalmes y diversos componentes utilizados para la gestión de propiedades y la integridad de la señal, como los filtros de ganancia dinámica (DGEFs), módulos de compensación de dispersión (DCMS), multiplexores ópticos de aumento y disminución (OADMs), y los conectores en el amplificador de sitio. La extensión de la fibra no puede ser concatenada indefinidamente, ya que los amplificadores añaden ruido al sistema y desde las sanciones asociadas con el modo de polarización cromática o la diafonía no lineal se acumulan con la longitud.

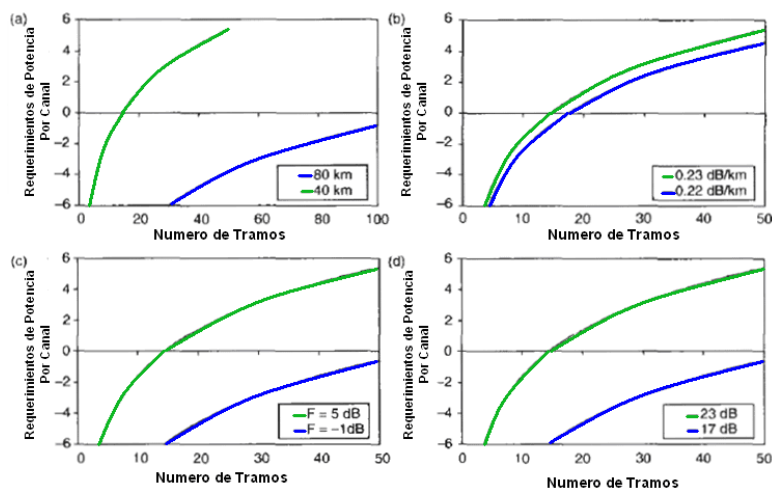
Un compromiso entre la longitud e y la distancia de la ruta tiene que hacerse en el orden de optimizar un sistema en términos de costo y desempeño. Este efecto puede ser entendido mediante la investigación del enlace óptico de la relación señal a ruido (OSNR) aproximado por:

$$OSNR[dB] = 58(dBm) + P_{ch}(dBm) - F(dB) - L_{span}(dB) - 10\log_{10}(N_{span}) \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde  $P_{ch}$  es la potencia por canal puesto en marcha en un lapso en dBm asumiendo una ganancia unitaria para el tramo,  $F$  es la figura de ruido efectiva del tramo,  $L_{span}$  es la pérdida en dB del tramo, y  $N$  es el total de tramos en la ruta. Hay muchas maneras de optimizar el rendimiento de una ruta basada en esta ecuación. Típicamente, la relación señal a ruido de un receptor dada, es necesaria para lograr el funcionamiento libre de errores para una determinada velocidad de transmisión. Por ejemplo se podría requerir una relación señal a ruido de 23dB para un sistema DWDM transmitiendo a 10Gbps.

Para una determinada  $P_{ch}$  y  $F$ , una ruta larga se puede alcanzar mediante tramos cortos (Figura 1.3a), menor pérdida en fibra (Figura 1.3b), mejora en la figura de ruido (Figura 1.3c), o requerimiento menor de la relación señal a ruido (Figura 1.3d).

La figura 1.3 muestra que para una ruta de 4000km, al reducirla longitud del tramote 80km a 40km reduce los requerimientos de potencia por canal por mas de 6dB. Esta potencia óptica menor por canal, ayuda a reducir las sanciones a causa de la distorsión no lineal o podrían utilizarse para aumentar el número total de canales en sistemas de potencia limitada, como las encontradas en aplicación de los amplificadores ópticos de ganancia de saturación de ganancia. El inconveniente de la reducción del espaciamiento del amplificador aumenta el costo del sistema por la misma distancia de la ruta. Por ejemplo en la Figura 1.3a dos veces se requerirá muchos amplificadores ópticos lineales para los 40Km del tramo, caso comparado con los tramos de 80Km. En la Figura 1.3b indica que una reducción de 0,01 dB/Km en el tramo de fibra la pérdida se traduce en una disminución de la potencia óptica requerida por canal por cerca de 1 dB por 80Km del tramo. Alternativamente, si el sistema está limitado a 0dBm de potencia por canal (por ejemplo, a causa de la distorsión no lineal), a continuación, una ruta con pérdida media 0.22dB/Km permitirá 3 tramos mas que una ruta con 0.23dB/Km con pérdida media. Figura 1.3c, ilustra el impacto de una reducción de la  $F$  de 5dB a -1dB. Del mismo modo, una reducción en la relación señal a ruido requerida por el receptor de 23dB a 17dB tendrá el mismo efecto. Dicha reducción se puede lograr usando FEC (Forward Error Correction).



**Figura 1.3** Efectos de, (a) distancia del tramo, (b) pérdidas en la fibra, (c) figura de ruido en el amplificador, (d) requerimientos de relación señal a ruido por canal, potencia requerida para un enlace 4000km de distancia con tramos de 80km.  $F= 5$ dB para (a) y (b).

Una alternativa a la reducción de  $F$ ,  $L$  y la relación señal a ruido, es a aumentar  $P_{ch}$ . para transporte a largas distancias, de cualquier manera, severas limitaciones surgen debido a pérdidas ópticas no lineales, tales como auto-modulación de fase (SPM), modulación por fase cruzada (XPM) y la mezcla de cuarto de onda (FWM), que genera distorsión de la señal e interferencia que no se puede deshacer en el receptor. Estos efectos resultan en sanciones que disminuyen la relación señal a ruido en el receptor. Por lo tanto,  $P_{ch}$  es limitado por la tolerancia de la relación señal a ruido del receptor de la señal a la degradación de la diafonía no lineal.

Como tal, hay una pérdida de potencia incorporada típicamente generada en la relación señal a ruido para un  $P_{ch}$  dado, la diafonía y la distorsión de ópticos no lineales, no son las únicas fuentes de la degradación de la relación señal a ruido. Dispersión por modo de polarización (PMD) genera interferencia ínter símbolo, resultando en pérdidas de potencia del sistema. La dispersión puede ser administrada en muchos casos usando compensadores discretos pero aumenta el costo del sistema.

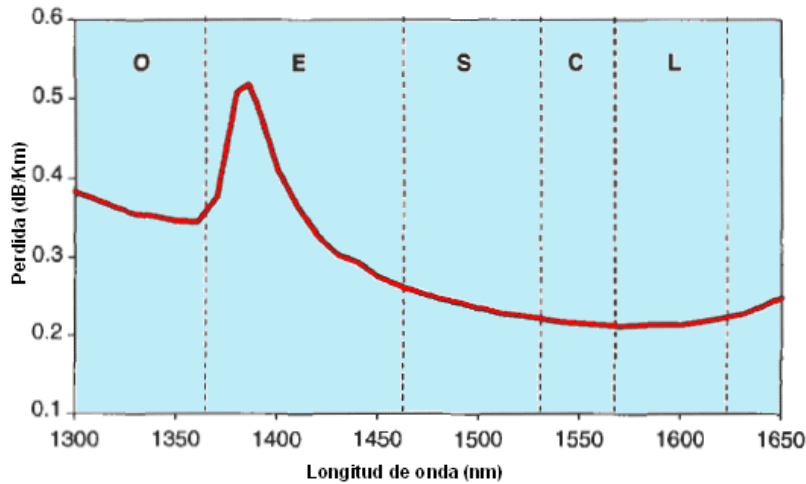
Cada uno de los impedimentos se ilustra en la Figura 1.3 se ven fuertemente afectados por el diseño de la fibra. Esto sugiere que los parámetros de la fibra tales como la dispersión  $D$  (ps/nm\*Km), la pendiente de la dispersión (ps/nm<sup>2</sup>\*Km), el modo de campo de área efectiva  $A_{eff}$  (μm<sup>2</sup>) y la atenuación espectral  $\alpha$  (dB/Km), puede ser optimizado para sistemas con arquitecturas específicas.

#### 1.1.1.1 Pérdidas por tramo

La atenuación de la fibra es espectralmente dependiente, mostrando un mínimo alrededor de 1550nm. Los sistemas diseñados en lo 80's se enfocaban en esta región, y es coincidencia de la naturaleza que uno de los más eficientes medios de amplificación óptica, el amplificador óptico erbio-dopados, opera en esta región.

Por lo tanto, los sistemas de larga distancia se desarrollará en primer lugar en la banda C (1530nm a 1565nm) y, después en la banda L (1565nm a 1625nm) las regiones se muestran en la Figura 1.4.

Sin embargo, la pérdida por tramo se ve afectada por algo más que las pérdidas intrínsecas asociadas con la fibra. El Cableado provoca pérdidas a través de la curva y efectos relacionados con el diseño de la fibra con una mayor sensibilidad en la curva superior que muestra al momento de la instalación añade la pérdida dentro de un cable, sobre todo cuando las temperaturas disminuyen por debajo de 0° C. como tal las especificaciones vinculadas con la pérdida máxima individual de cada fibra del cable, en lugar de la máxima pérdida promedio de fibra es fundamental en asegurar la pérdida de los tramos. El diseño del embalaje como la cinta o estructuras de tubo sueltas, afecta la densidad del cable de fibra y significativamente los impactos inducidos por las pérdidas de cable.



**Figura 1.4** Espectro típico de un cable de fibra óptica que indica la pérdida de las regiones asociadas con las bandas de transmisión C y L.

Empalmes de fusión en segmentos del cable añade pérdidas adicionales. Desde que los cables son suministrados típicamente en segmentos de 2Km a 6Km, un tramo de 80Km podrá tener más de 40 empalmes. Las pérdidas por empalme pueden ir desde 0.02dB para fibras individuales hasta 0.06dB. Incluso a 0.02dB por empalme, la pérdida acumulada alcanza 1dB por tramo. Por último la planta exterior está conectada a un amplificador en línea a través de Jumper ópticos con conectores mecánicos se agrega unas cuantas décimas de dB por la pérdida.<sup>1</sup>

### 1.1.2 Compensación por dispersión de banda ancha

La distorsión de la señal y la interferencia que se acumula durante la transmisión, influenciada por la relación señal a ruido en el receptor. En la Figura 1.5 se compara la dispersión nominal de varios ITU G.655 comerciales o fibra de dispersión de no paso por cero (NZDF).

En términos de rendimiento del sistema, un nivel demasiado bajo de dispersión en la banda de interés del DWDM no es la adecuada para evitar que las interferencias no lineales como la mezcla de ondas de cuarto de banda.

Alternativamente, un nivel muy alto de dispersión resulta en interferencia ínter símbolo (ISI). La Interferencia ínter símbolo atribuida a la dispersión cromática se puede corregir utilizando un módulo de compensación de dispersión (DCM). De cualquier forma estos

dispositivos no son capaces de compensar exactamente la dispersión a través de una banda muy amplia de canales, resultando en dispersión residual que limita el alcance del sistema o el número de canales. Típicamente la compensación de la dispersión en la fibra es de cerca de 0.5dB/Km, aunque la longitud requerida es proporcional a la dispersión en la fibra.

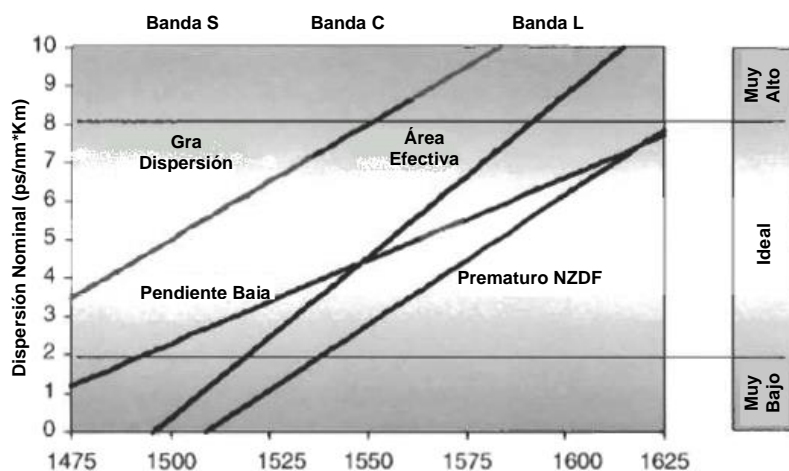


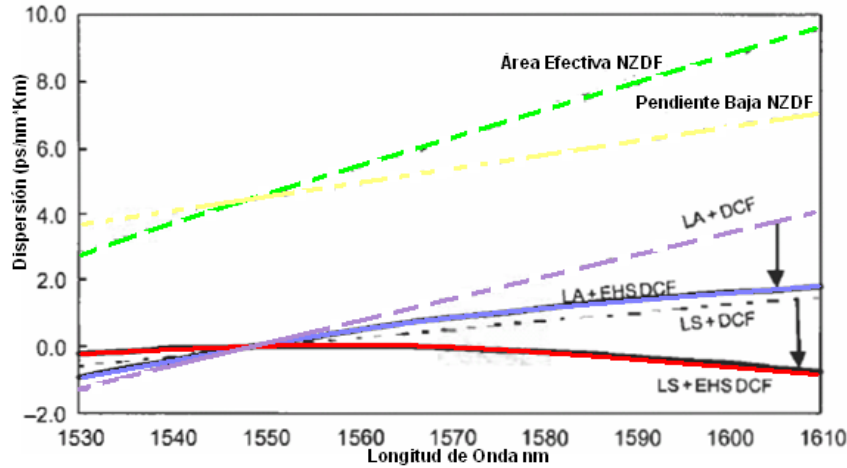
Figura 1.5 Comparación de la dispersión espectral de varias fibras tipo NZDF (G.655).

La compensación de 100Km fibra mono modo estándar implica una pérdida de hasta 10dB. Por lo tanto, un nivel demasiado alto de dispersión en la fibra da como resultado en el costo mayor del DCM y añadir un amplificador de ganancia es necesario para superar la pérdida de inserción en el DCM.

La figura 1.6 muestra la dispersión residual de dos tipos de Fibras NZDF (pendiente baja y área efectiva) junto con dos DCM comerciales. Como se ve en la figura la pendiente baja de la NZDF permite una mayor longitud de onda de la banda de compensación comparada con el área efectiva de la NZDF.

El parámetro permisible dispersión residual crece como aumenta la tasa de bits de 10Gbps a 40Gbps desde que la tolerancia de dispersión en el receptor disminuye como  $1/B^2$  donde B es la tasa de bits. Mientras que un sistema de 10Gbps puede tolerar 1000ps/nm de dispersión residual, un sistema de 40Gbps requerirá aproximadamente 60ps/nm de dispersión residual para el mismo nivel de la relación señal a ruido óptico o disminución de potencia.





**Figura 1.6** Mejora de la dispersión de los residuos de baja pendiente (LS) y área efectiva (LA) NZDF después de la compensación de un DCF comercial (RDS aprox. 0.009) con un extra alta pendiente en comparación con un estándar DCF (RDS aprox. 0.009). La región sombreada indica la ventana de funcionamiento de tramos de 100Km a 40Gbps.

Para una compensación completa a través de un ancho de banda amplio, ambas la dispersión  $D$  y la pendiente de la dispersión del DCF con los de la transmisión en la fibra. En otras palabras, la relación de estos valores, la pendiente relativa de la dispersión RDS donde  $RDS = D/S$  deben ser iguales.

$$RDS_{Transmisión} = RDS_{DCF} \quad \text{Ec. 1.2}$$

Como se muestra en la figura 1.6, el RDS es un indicador de la facilidad relativa de crear un DCM para operación de banda ancha de un WDM.

Por lo tanto menor es el RDS, lo mejor para la compensación de la dispersión en banda ancha. Los valores típicos de RDS se muestran en la tabla 1.1 para longitud de onda de interés en bandas S, C, y L. Nótese que muchas de las combinaciones del tipo de fibra y ancho de banda deseado no pueden ser acomodados por los DCM actualmente disponibles, que tienen valores de RDS menores a  $0.009 \text{ nm}^{-1}$ , como se muestra en la figura 1.6. También a pesar de la fibra monomodo estándar (SSMF o tipo G.652) tiene el RDS mas bajo en todas la bandas, es su nivel absoluto de dispersión, demasiado alta para que se muestre en la figura 1.5 y figura 1.6, agrega un costo adicional a la compensación en los sistemas de transmisión.

	<b>Banda S</b> 1500nm	<b>Banda C</b> 1550nm	<b>Banda L</b> 1590nm
<b>Casi NZDF</b>	NA	0.024	0.012
<b>Pendiente baja NZDF</b>	0.019	0.009	0.007
<b>Área Eficaz NZDF</b>	NA	0.018	0.011
<b>Dispersión alta NZDF</b>	0.012	0.008	0.006
<b>G.652 SSMF</b>	0.005	0.004	0.003

**Tabla 1.1** Aproximación relativa de la pendiente de la dispersión ( $\text{nm}^{-1}$ ) valores varios fibras tipo G.655 y G.652.

Una alternativa en el uso de banda ancha DCM, es dividir las bandas del DWDM y compensarlas individualmente. Este enfoque requiere un filtro adicional para separar las bandas a la entrada y salida de los amplificadores agregando más de 3dB de pérdida por tramo. Esta pérdida de rendimiento en la ruta de acuerdo a la Ec. 1 y que se muestra en la figura 1.3b. Un aumento de pérdida de 3dB es equivalente a 3dB de pérdida por canal, que esencialmente recorta el alcance del sistema a la mitad.

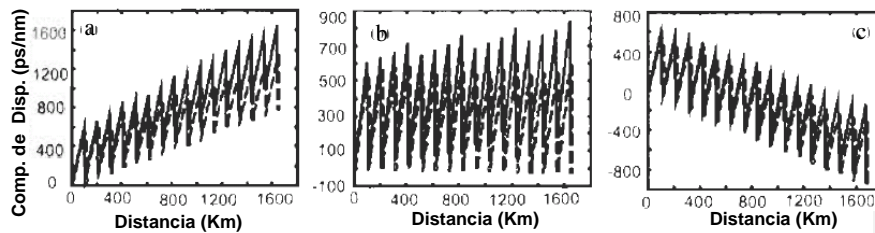
### 1.1.3 Administración de la dispersión óptica no lineal

Aunque la aparición de la interferencia no lineal dependen en gran medida de la intensidad óptica. La interacción de la fase de estas señales con otros canales y dentro de un canal es igual de importante. En el peor de los casos la interacción se produce cuando las frecuencias están en fase durante la propagación de la señal. La dispersión interrumpe la relación de fase desde diferentes frecuencias se propagan a diferentes grupos de velocidades y reducen la interacción de la longitud. Por lo tanto, la interferencia no lineal puede ser efectivamente controlada, administrando la dispersión a lo largo de la ruta, por ejemplo introduciendo periódicamente un componente con dispersión negativa, como un modulo de compensación de dispersión, a lo largo de la ruta.

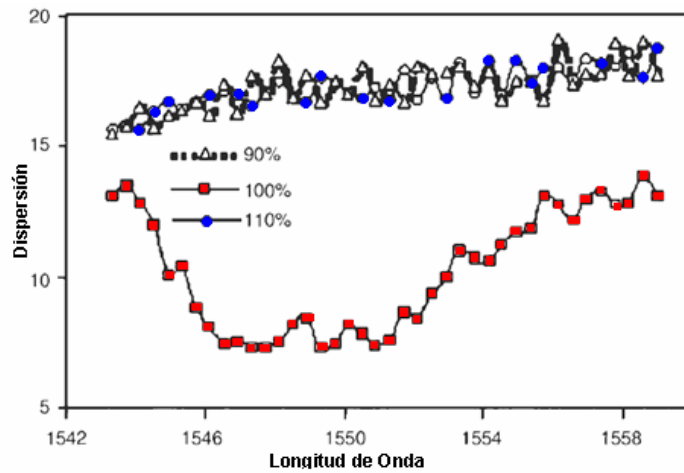
La localización óptima de los DCM's para la administración de la dispersión esta en el punto de cada amplificador. La comparación de mapas de dispersión de un sistema con 1600Km se muestra en la Figura 1.7. El caso de 100% de compensación por tramo (Figura 1.7b) resulta en la más baja Q (Figura 1.8), o en la más alta interferencia no lineal. Desde que las señales fueron reajustadas una con otra al final de cada tramo, resultando en una condición de fase. Las otras condiciones al 90% y 110% de compensación por tramo resultaron en la más baja interferencia y por lo tanto más alta Q.

La administración de la dispersión es una herramienta muy útil en la superposición no lineal de frecuencias en sistemas de transmisión, pero mucha dispersión podría ser demasiado costosa en términos de componentes u otras distorsiones. ¿Es aquí una cantidad óptima de dispersión la que balancea el rendimiento y costo del sistema? La

respuesta a esta pregunta es la dependencia del correcto acomodo de los parámetros del sistema.



**Figura 1.7** Mapas de dispersión: a) compensación de la dispersión por tramo debajo de 90%, b) compensación de la dispersión por tramo al 100%, c) compensación de la dispersión por tramo al 110%.



**Figura 1.8** Factores Q para los tres mapas de dispersión.

#### 1.1.4 Amplificación en banda ancha

El efecto de la SRS (Dispersión Estimulada de Raman (por su sigla en inglés Stimulated Raman Scattering)) en el de generara luz dispersada de energía ligeramente disminuida, o longitud de onda mayor que la luz incidente. Si una señal de la sonda se encuentra cerca de la dispersión de longitud de onda, la onda se amplificará. Este efecto puede ser usado para ganar ventaja contra el haz de luz propagado en la fibra a una longitud de onda adecuada para crear ganancia en el DWDM. El ancho de banda del espectro de ganancia Raman asociados con SRS es del orden de 100nm, así que la amplificación de Raman distribuida (DRA), permite una mayor de la banda de aproximadamente de 40nm.

La eficiencia de de la ganancia de Raman esta asociada con el  $A_{eff}$  de la fibra y el  $GeO_2$  contenido en el núcleo. Alcanzando el contenido de  $GeO_2$  incrementa el coeficiente de ganancia de Raman, pero esto requerirá alto contenido de  $GeO_2$  para tener un impacto significativo de este valor. La ganancia de Raman  $G$  a una frecuencia  $f$  es muy sensible a  $A_{eff}$  dado por:

$$G(f) = \exp\left\{C_R(f) \cdot P_{haz} \frac{1 - \exp(-\alpha_{haz} L_{Tramo})}{\alpha_{haz}}\right\} \quad \text{Ec. 1.3}$$

Donde  $\alpha_{haz}$  es el coeficiente de perdida de la fibra del haz de luz y  $P_{haz}$  es la potencia del haz.  $C_R(f)$  es el coeficiente de ganancia de Raman a un frecuencia dada por:

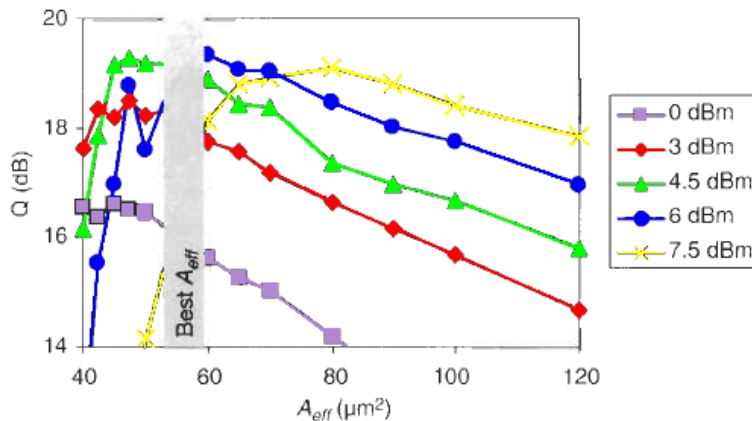
$$C_R(f) = \frac{1}{k_{pol}} \frac{g_R(f_{haz} - f)}{A_{eff}} \frac{f_{haz}}{f_{ref}} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Donde  $f_{haz}$  es la frecuencia del haz  $k_{pol} = 2$  para haz despolarizado y frecuencias de señal y  $g_R$  es la medida de eficiencia de Raman a una frecuencia de referencia  $f_{ref}$ . En la figura 1.9 se ilustra el efecto de  $A_{eff}$  en la ganancia de Raman de acuerdo a la ecuación 3 para equivalentes  $\alpha_{haz}$  y  $g_R$ . Aquí la moderada  $A_{eff}$  de la pendiente baja de NZDF permite una mejora significativa en la ganancia comparada con el área efectiva de NZDF para la misma potencia del haz. Esto incrementa la ganancia y consecuentemente el mejoramiento de OSNR se puede considerar fuera para haces con potencia reducida, por lo tanto ahorro en el costo del sistema. Especialmente, una  $G$  y una OSNR dados, se puede lograr una potencia de haz menor, moderando  $A_{eff}$  comparado con una  $A_{eff}$  mayor.

La adicción de una ganancia DRA mantiene la potencia de la señal más alta en todo el tramo de las fibras, comparándolo si no tuviera un DRA. Esta potencia elevada de la señal aumenta  $Q$ .

La fuente de ruido dominante originada por retro dispersión de cualquier haz o señal y es proporcionalmente inversa a  $A_{eff}$ . Este ruido es adicionado a al ASE (Amplificación de Emisión Espontánea) de los amplificadores discretos. Aumentar aun mas la potencia del haz, aumentará el ruido retro dispersado y limita el pico del OSNR mejora asociada con el DRA. De cualquier forma los efectos de la red son muy significantes para mejorar la OSNR. Desde que la ganancia en el DRA reduce la necesidad de amplificadores discretos de ganancia, que agregan más ruido. Por lo tanto el uso de DRA reduce la figura de ruido efectiva total del sistema.

Aunque la reducción de  $A_{eff}$  afecta negativamente al rendimiento interferencia no lineal del ruido en un enlace DRA, los beneficios para la OSNR de una efectiva ganancia y reducción en la figura de ruido efectiva, mejora positivamente el sistema. Para determinar la desventaja entre estos efectos, el impacto de  $A_{eff}$  en un canal espaciado 100GHz, 7 canales de 40Gbps es mostrado en la Figura 1.9.



**Figura 1.9**  $Q$  contra  $A_{eff}$ , para un  $P_{ch}$  con rango de 0dBm a 7.5dBm. sistema de 7 canales de 40Gbps, espaciado 100GHz, NRZ, 6 X 120Km,  $n_{sp} = 2$  y una haz de 500mW de potencia. Indica que le mejor  $Q$  en el mejor rango de  $P_{ch}$  es saciado con  $A_{eff}$  moderada ( $50 - 60 \mu\text{m}^2$ ).

Aquí un haz Raman hacia atrás de 500mW es agregado al amplificador al final del tramo. En la Figura 1.9 el resultado indica que una  $A_{eff}$  moderada resulta en la mejor opción para una  $Q$  par una gama amplia de  $P_{ch}$ .

## 1.2 Fibras para Sistemas Metropolitano y Sistemas de Acceso

El acceso a redes de larga distancia ocurre típicamente en áreas metropolitanas donde la información es agregada para transmisión de larga distancia o demultiplexación para su distribución. Los requerimientos en este espacio son significativamente diferentes de la transmisión de larga distancia, ya que la densidad de la población y geografía necesitan menos capacidad que los robustos tubos de larga distancia pero gran flexibilidad en la distribución. Estas redes llamadas Metropolitanas toman el tráfico fuera de la distribución de las redes de larga distancia, para ser distribuidas a una empresa, residencia o acceso a negocios.

Este ambiente es mucho más complejo operacionalmente que los de larga distancia, ya que la interacción de la demografía, cuestiones reglamentarias, y sensibilidad de costo.

Los sistemas metropolitanos, son caracterizados ampliamente como “acceso metropolitano o Edge” (de 20Km a 50Km). Una tercera categoría llamada “regional” algunas veces usada para cobertura mayor en área metropolitana (200Km a 300Km) o partes de una ciudad vecina “metroplex”.

Los sistemas de acceso incluidos los sistemas de local intercambio y transporte, negocios específicos y residenciales en un rango de 0Km a 20Km, quizás sean punto a punto (PTP), o punto multipunto como en redes ópticas pasivas. Adicionalmente, sistemas de acceso de banda ancha CATV, que entregan video y datos, al instalar nodos de fibra híbrida dentro de unos pocos Kilómetros del subcriptor, y la terminal principal que quizás este ubicado a no menos de 75Km de los nodos de fibra.

### 1.3 Requerimientos de la Fibra óptica

Los requerimientos para fibra metropolitana difieren de las de larga distancia en características significantes:

- A diferencias de las de larga distancia, las fibra metropolitanas deben soportar los multiservicios o triple-play, múltiples anchos de banda, múltiples protocolos de trafico, múltiples velocidades de bits. Estos incluyen el STM-1 (OC-3 equivalente Americano) al STM-64 (OC-192 equivalente Americano), Ethernet, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet (GbE), 10Gigabit Ethernet (10GbE), ESCON, FICON, todos en diferentes longitudes de onda.
- Las fibras metropolitanas necesitan deben ser enfocadas hacia el emergente de estándares de WDM (DWDM), robusto WDM (CWDM), pero también debe ser compatible con sistemas existentes actualmente.
- Aunque el 90% de los anillos de las redes metropolitanas son de menos de 100Km de perímetro., la distancia máxima entre nodos puede ser tan alta como 200Km, dependiendo en los mecanismos de protección y la malla de interconexión. Mayor grado de transparencia óptica es deseable, pero la necesidad de ser balanceado con facilidad, la versatilidad de la expansión de las redes y actualización del servicio.
- Desde que la planta externa (ductos) disminuyo los costos en redes metropolitanas, son al menos 2 veces mayor que las de larga distancia, fibras metropolitanas no se espera que sean reemplazadas frecuentemente. Por lo tanto la adaptación de la tecnología es la clave para prevenir que se obsoleta.

Los accesos residenciales y para negocios los requerimientos difieren de las metropolitanas:

- El bajo costo es el factor principal. Así que las tecnologías CWDM y fibras que operan con empalmes, fuentes de bajo costo es importante.
- Múltiples formatos de señal como QAM y VSB-AM, quizás serán transmitidos en la misma fibra así que la no linealidad de la fibra debe ser baja.

Algunas veces el conflicto entre requerimientos no deben de ser manipulados por un tipo de fibra. En tal caso un cableado híbrido ampliamente practicado que incorpora dos tipos de fibra dentro del mismo cable puede ser efectivo en cuanto a costo.

#### 1.4 Tipos de Fibra Óptica

Los tipos de Fibra a ser considerados dentro de las aplicaciones de sistemas metropolitanos y de acceso son:

- SSMF (Fibra estándar mono modo, G652).
- LWPF (Fibra sin pico de agua, G625.5)
- NXDF (Fibras de dispersión de no paso por cero, NZDSF G655).
- NDF (Fibras de dispersión negativa, NZDSF G655).

Todas las fibras deben ser ampliamente categorizadas en los fundamentos de su dispersión y pérdida mostrados en las figuras 1.10 y 1.11. ambas fibras SSMF y LWPF tienen el mismo perfil de dispersión a lo largo de toda la banda de transmisión la magnitud de que es el doble de la dispersión de NDF a 1550nm y al menos 4 veces que la NZDF.

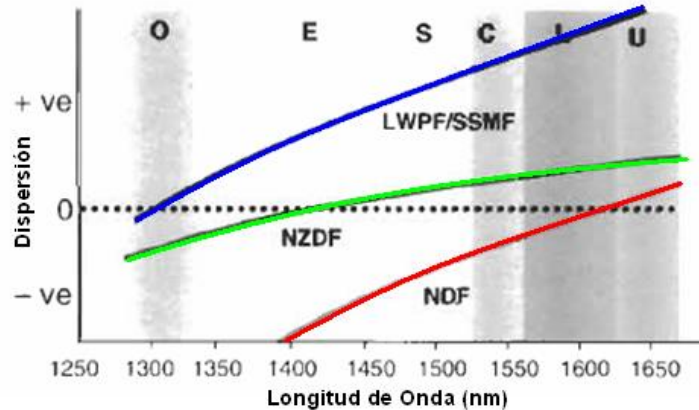


Figura 1.10 Características de dispersión de Fibras, no se señala escala.

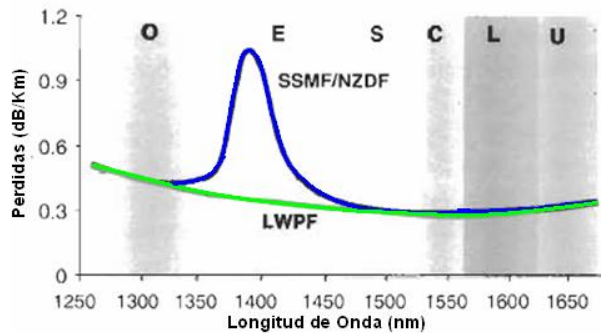


Figura 1.11 Características de pérdida en Fibras.

Las Fibras NDF tienen dispersión negativa en toda la región de 1300-1600nm, mientras que NZDF la dispersión cruza por cero alrededor de los 1450nm.

#### 1.4.1 Sistema de cableado OPGW

La solución para la integración de las Telecomunicaciones en las líneas aéreas de alta tensión. Los sistemas aéreos de cable de fibra óptica se han convertido en factor clave en la implantación de las redes de telecomunicación de los operadores. La ausencia de obra civil y los derechos de paso ya existentes permiten minimizar los costes y, lo que es más importante, el tiempo de puesta en servicio de la red.

##### 1.4.1.1 Sistemas ópticos aéreos

Sistema de cableado OPGW es un sistema de cable compuesto tierra-óptico, para instalación en líneas eléctricas de alta tensión.

Sistema de cableado Autosoportado es un sistema de cable óptico autosoportado para todo tipo de líneas: eléctricas, catenarias de ferrocarriles, etc.

Sistema de cableado Adosado es un sistema de cable óptico que va adosado al cable de tierra o al cable de fase de las líneas eléctricas.

Sistema de cableado OPPC es un sistema de cable compuesto fase-óptico, para líneas eléctricas de alta tensión, hasta 66kV.

##### 1.4.1.2 Ventajas del sistema de cableado OPGW

Elevada fiabilidad avalada por los más de 25.000Km instalados, con sistemas en funcionamiento desde el año 1987.



Facilidad de implantación al abarcar todo el conjunto de elementos que completan el sistema extremo a extremo. El sistema de cableado OPGW es idóneo para redes de alta tensión. El uso de cables OPGW (Optical Power Ground Wire) en estas líneas aéreas optimiza las inversiones realizadas, básicamente por:

- Su explotación en redes de telecomunicaciones, lo cual genera un valor añadido que supera ampliamente su uso original.
- Su función tradicional como cable de tierra.
- Su uso para los servicios de tele-medidas y telecontrol del operador de la red eléctrica.
- No requiere de puesta a tierra de señales como ocurre con los alambres de cobre que quedan en contacto con ambientes metálicos.

#### 1.4.1.3 Tecnología de Cables Compuestos Tierra Ópticos OPGW

La tecnología empleada para la fabricación de cables OPGW ha demostrado su elevada calidad y fiabilidad, con instalaciones en funcionamiento, a plena satisfacción desde el año 1987. Además, la continua investigación en nuevos materiales y la experiencia acumulada, permiten una evolución constante. Los cables actualmente suministrados combinan, una elevada protección de la fibra, un buen equilibrio entre sus características eléctricas y mecánicas, unos diseños altamente fiables.

Condiciones operativas	Riesgos para la fibra óptica	Soluciones adoptadas en el diseño
Viento, temperatura, acumulación de hielo	Aumento de atenuación o rotura por alargamiento y/o compresión	Protección holgada de las fibras que permite el alargamiento o compresión del cable sin afectar a las fibras
Generación de Hidrógeno en la estructura metálica.	Aumento de atenuación por absorción de hidrógeno en la fibra óptica	Relleno del núcleo con gel absorbente de hidrógeno
Humedad y lluvia	Aumento de atenuación por penetración de agua en la fibra óptica	Estanqueidad radial intrínseca del tubo extraído de aluminio. Gel taponante en el núcleo óptico.
Cortocircuito de la línea Impacto de rayos	Aumento de atenuación o rotura de los hilos de AS o AA por exceso de temperatura o por el impacto de la carga transferida	Diseño con alto contenido de aluminio. Selección de hilos de AS o AA. Protección térmica del núcleo. Adecuado preformado de hilos que impide que el cable se desintegre en caso de rotura de los mismos

(\*) AS= Acero recubierto de aluminio. AA= Aleación de aluminio.

**Tabla 1.2** Características de Cables Compuestos Tierra Ópticos OPGW.

### 1.4.1.3.1 Monocorona

Los cables OPGW Monocorona, son los más comúnmente utilizados. Su diseño se adapta perfectamente a las necesidades más habituales de instalación consiguiendo una óptima relación calidad-precio.

Su estructura cuenta con un Núcleo óptico, absorbente de hidrógeno y protecciones metálicas.

1. Soporte central dieléctrico.
2. Fibras ópticas.
3. Tubos de protección holgada de las fibras, taponados con gel anti-humedad.
4. Cintas de protección térmica.
5. Tubo de aluminio extraído.
6. Corona con dos posibilidades de hilos:
  - Acero recubierto de aluminio.
  - aleación de aluminio.



Figura 1.12 Cable compuesto tierra óptico OPGW Monocorona.

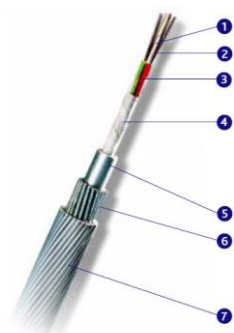
### 1.4.1.3.2 Doble corona

Los cables OPGW Doble Corona, se aplican cuando los requisitos especifican una elevada carga de rotura y/o una elevada corriente de cortocircuito.

Su estructura cuenta con un Núcleo óptico, absorbente de hidrógeno y protecciones metálicas.

1. Soporte central dieléctrico.
2. Fibras ópticas.
3. Tubos de protección holgada de las fibras, taponados con gel anti-humedad.
4. Cintas de protección térmica.

5. Tubo de aluminio extraído.
6. Corona con tres posibilidades de hilos:
  - Acero recubierto de aluminio.
  - Aleación de aluminio.
  - Acero galvanizado.
7. Corona adicional con tres posibilidades de hilos:
  - Acero recubierto de aluminio.
  - Aleación de aluminio.
  - Acero galvanizado.



**Figura 1.13** Cable compuesto tierra óptico OPGW Doble corona.

#### 1.4.1.3.3 Monotubo central

Los cables OPGW Monotubo central están especialmente diseñados para aplicaciones donde se requiere un cable con un diámetro y un peso reducidos.

Su estructura cuenta con un Núcleo óptico, absorbente de hidrógeno y protecciones metálicas.

1. Fibras ópticas.
2. Tubo de protección holgada de las fibras, taponado con gel anti-humedad.
3. Cintas de protección térmica.
4. Tubo de aluminio extraído.
5. Corona con dos posibilidades de hilos:
  - Acero recubierto de aluminio.
  - Aleación de aluminio.

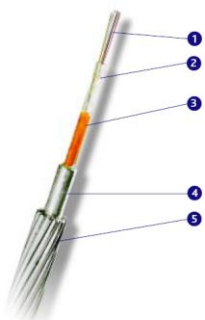


Figura 1.14 Cable compuesto tierra óptico OPGW Monotubo central.

#### 1.4.1.3.4 Tubos de acero

Los cables OPGW con Tubos de acero están especialmente diseñados para aplicaciones donde se requiere un diámetro de cable muy reducido.

Su estructura es la más sencilla para cables OPGW.

1. Fibras ópticas.
2. Tubos de acero taponados con gel anti-humedad, que albergan y protegen las fibras ópticas.
3. Hilos con dos posibilidades:
  - Acero recubierto de aluminio.
  - Aleación de aluminio.

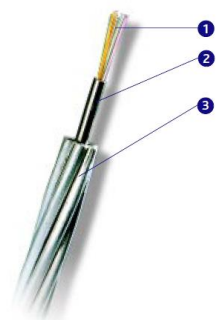


Figura 1.15 Cable compuesto tierra óptico OPGW Tubos de acero

## 1.4.2 Sistema de conexión para cable tierra-óptico OPGW

### 1.4.2.1 Cajas de empalme

Las cajas de empalme están especialmente diseñadas para garantizar la máxima estanqueidad, fiabilidad y durabilidad a los empalmes de los cables OPGW. Su versatilidad permite utilizarlas tanto en sistemas OPGW como en otros tipos de sistemas de cableado óptico.

1. Caja. Esta construida de una aleación de aluminio, junta de neopreno antienvejecimiento, la fijación de la tapa es mediante 4 tornillos de acero inoxidable y placas de fijación de los elementos centrales de los cables.
2. Organizador de empalmes. Tiene una capacidad para hasta 32 empalmes de fusión por organizador y un control del radio mínimo de curvatura de las fibras.
3. Entradas de cable OPGW. Esta constituida por prensaestopas de latón niquelado, un anclaje del cable sobre la armadura, puesta a tierra de la armadura y anillos de estanqueidad de neopreno. El dieléctrico es una boquilla de aluminio y un tubo termorretráctil para el sellado del cable.
4. Sujeción del cable OPGW. Consiste en un sistema de puentes de aluminio adaptados al cable y la derivación a tierra del cable.
5. Protección exterior. La protección adicional contra los rayos solares y los impactos.
6. Anclaje a la torre. Esta caja permite el anclaje tanto vertical como horizontal.

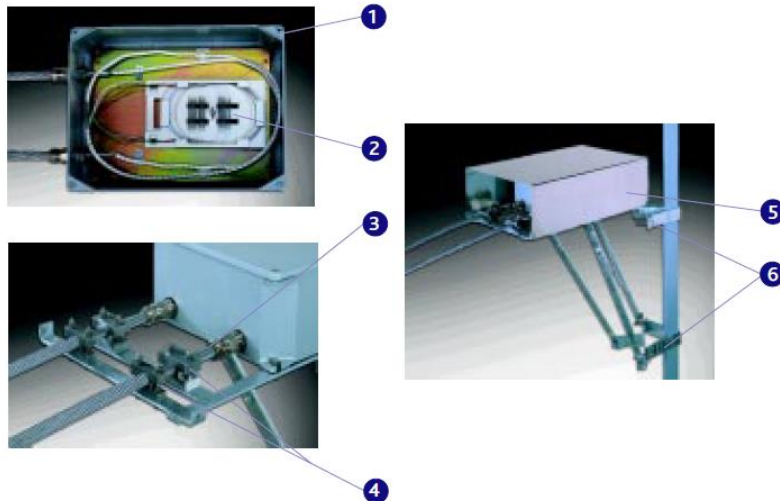


Figura 1.16 Cajas de empalme.

### 1.4.2.2 Repartidores terminales

Repartidores murales. Para ser instalados tanto en edificios como a la intemperie y con capacidad de hasta 72 fibras, permiten tanto la terminación de cables como la transición desde el exterior al interior del edificio. Las funciones incorporadas son:

- Fijación y puesta a tierra de cables
- Alojamiento de empalmes de fusión y/o mecánicos
- Terminación de conectores/adaptadores
- Limitación del acceso a la zona de empalmes



Figura 1.17 Repartidores murales.

### 1.4.2.3 Repartidores Slim

El repartidor Slim es un repartidor de técnica vertical con capacidad para 80 fibras ópticas y 4 cables y hasta 160 empalmes. El sistema diferencia claramente las distintas zonas:

- Terminación de conectores en adaptadores.
- Áreas de almacenaje de los pig-tails y patch-cords.
- Zona de anclaje de cables.
- Zona de empalmes.



Figura 1.18 Repartidores Slim.

### 1.4.2.4 Repartidores Modulares

Sistemas modulares diseñados para instalarse indistintamente que permiten la terminación y/o segregación de hasta 256 fibras ópticas. Incorporan todas las funciones necesarias:

- Fijación y puesta a tierra de cables.
- Alojamiento de empalmes de fusión y/o mecánicos.
- Terminación de conectores/adaptadores.
- Almacenaje de cordones de fibra.



Figura 1.19 Repartidor modular.

#### 1.4.2.5 Conjunto de suspensión

El conjunto con grapa de suspensión armada y recubrimiento interno de neopreno, especialmente diseñado para OPGW. Incluye grapas de puesta a tierra para conexión a la torre.

1. Grillete recto (Acero).
2. Eslabón revirado (Acero).
3. Grapa conexión paralela.
4. Grapa suspensión armada (Aluminio).
5. Varillas preformadas (Aluminio o acero recubierto de aluminio).
6. Grapa conexión a tierra (Aluminio).

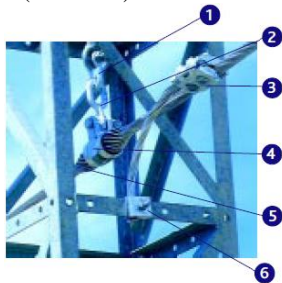


Figura 1.20 Conjunto de suspensión.

### 1.4.2.6 Conjunto de amarre

El conjunto de amarre tipo preformado especialmente diseñado para OPGW contiene grapas de puesta a tierra para conexión a la torre, cuando la distancia entre dos torres de amarre supera la longitud máxima de fiabilidad del sistema, existen conjuntos de amarre especiales para instalación en torres de suspensión.

1. Grillete recto (Acero).
2. Tirante (Acero).
3. Retención de anclaje (Acero recubierto de aluminio).
4. Guardacabos (Fundición de acero).
5. Empalme de protección (Acero recubierto de aluminio).
6. Grapa conexión a tierra (Aluminio).

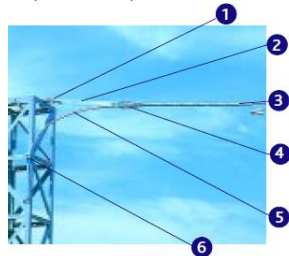


Figura 1.21 Conjunto de amarre.

### 1.4.2.7 Grapa de bajada

Las grapas de bajada se utilizan para fijar el cable a la torre en las bajadas a caja de empalme.

1. Grapa (Aluminio).
2. Varilla M-12 (Acero galvanizado).
3. Cuerpo soporte (Acero galvanizado).
4. Tornillo de fijación (Acero inoxidable).



Figura 1.22 Grapa de bajada.



### 1.4.2.8 Amortiguador

Los amortiguadores se utilizan para amortiguar la vibración del cable. El número de amortiguadores se determinará teniendo en cuenta las condiciones climáticas, la distancia entre torres, el tipo de cable OPGW y los parámetros de instalación.

1. Cuerpo (Aluminio).
2. Cable preformado (Acero galvanizado).
3. Contrapesos (Acero forjado galvanizado).



Figura 1.23 Amortiguador.

### 1.4.2.9 Caballete

Cuando la torre presenta dificultades para fijar los cables OPGW, este accesorio es apto tanto para conjuntos de suspensión como de amarre.



Figura 1.24 Caballete.

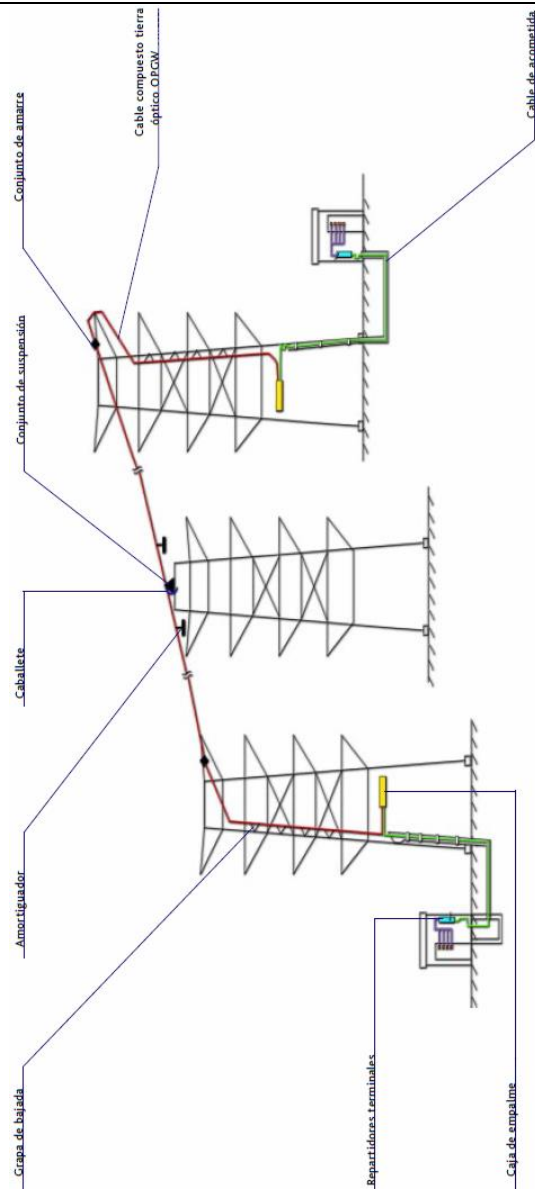


Figura 1.25 Sistema de Cableado OPGW.

### 1.5 Conexiones de fibra óptica: uniones y acopladores

Los enlaces de comunicaciones ópticas tienen en común como en cualquier otro tipo de transmisión unos requerimientos para la unión entre cables y para la terminación de la línea. La cantidad de conexiones entre fibras para un enlace dependerá de la longitud del enlace, de la longitud que tengan los rollos de cables y de la longitud máxima de cable que pueda manejarse.

Aunque se pueda producir de forma continua un rollo de 1000Km de fibra va a ser difícil que se pueda instalar un enlace de 1000Km sin partir la fibra, los tramos tan grandes de fibra tan sólo servirán para enlaces marítimos.

Actualmente los enlaces tienen un rango de 100Km de distancia, para velocidades de 1GHz hasta 50GHz, y dado el gran desarrollo de la fibra también se deben desarrollar componentes para su interconexión.

### 1.6 Empalmes de Fibra

A diferencia de los empalmes en conductores eléctricos la alineación tiene gran importancia en los empalmes de fibra óptica, ya que el haz de luz que sale de una fibra va a seguir su recorrido en la otra, aun cuando las dos fibras están perfectamente cortadas y alineadas, un porcentaje del haz de luz transmitido por la primera fibra será reflejada no incidirá sobre la superficie de la segunda debido a la apertura numérica (el haz de luz saldrá con la misma distribución angular con la que entro) o errores de alineamiento.

Los posibles efectos por los que se tienen una pérdida en la señal son:

El primer efecto se conoce como reflexión de Fresnel y este nos dice que la magnitud del haz de luz reflejada (suponiendo que no se excede el ángulo crítico que se obtiene por la ley de Snell) es:

$$r = \left( \frac{n_1 - n}{n_1 + n} \right)^2 \quad \text{Ec. 1.5}$$

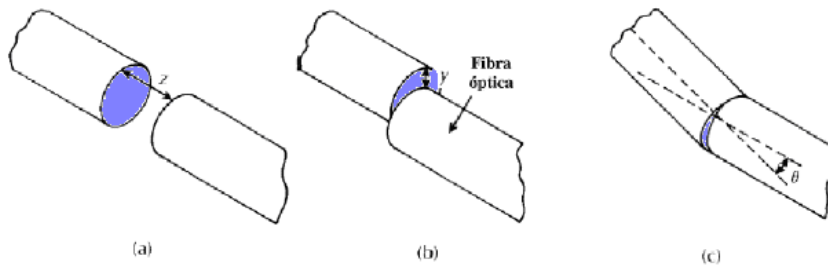
Donde  $r$  es la fracción de luz reflejada,  $n_1$  es el índice de refracción del medio por el que se mueve la luz y es el medio al que pasa la luz. La pérdida en dB es:

$$Perdida_{fres} = -10 \log_{10}(1-r) \quad \text{Ec. 1.6}$$

Para solucionar esta pérdida por reflexión los dos índices de refracción deben ser iguales. Este se puede conseguir mediante el uso de un gel con el mismo índice de refracción que las dos fibras.

Desafortunadamente la reflexión de Fresnel no es la única fuente de atenuación, otra causa de esta atenuación es el problema de alineamiento entre las fibras, tanto longitudinal, axial o angular. Pero no solo los problemas geométricos afectan sino también las diferencias entre parámetros ópticos como:

- Diferencias entre el diámetro del núcleo el recubrimiento.
- Distintas aperturas numéricas.
- Distintos perfiles en los índices de refracción.
- Problemas en la fibra (no circularidad del núcleo, excentricidad del núcleo frente al revestimiento, y muchas más).



**Figura 1.26** Posible causas de no alineamiento, a) Longitudinal, b) Lateral, c) angular.

Los mejores resultados al hacer empalmes de dos fibras se consiguen si estas son idénticas y de la misma calidad (con fibras de características idénticas y del mismo fabricante), se puede reducir la atenuación resultante debido a los problemas geométricos.

Las pérdidas de potencia óptica resultan de los tres tipos de error en el alineamiento dependen del tipo de fibra y en particular del diámetro del núcleo y de la distribución de potencia entre los modos permitidos.

Como se ve en la Figura 1.26 se puede observar gráficamente los errores de alineamiento e igualmente se observa como cada uno de estos errores afecta numéricamente la atenuación.

Esta claro que pequeños errores en el alineamiento causa atenuaciones significativas y esto es cierto conforme los núcleos de las fibras van reduciendo. Debido a esto es que las fibras de núcleos grandes  $> 150\mu m$  resultan poco afectadas y por ello las fibras plásticas son tan fáciles de conectar. Hay grandes diferencias entre la utilización de fibras monomodo y multimodo debido a la diferencia entre el tamaño de los núcleos de estas.

## 1.7 Pérdidas en empalmes de fibras multimodo

### 1.7.1 Eficiencia Lateral

Los errores por no alineamiento lateral reducen la región de solapamiento entre los núcleos de las fibras. Para calcular la eficiencia de la conexión entre las fibras  $n_{lat}$  puesto que la separación entre los núcleos  $y$  y el radio del núcleo  $a$ . La eficiencia lateral se calcula de la siguiente manera:

$$n_{lat} = \frac{16 \left( \frac{n_1}{n} \right)^2}{\left( 1 + \left( \frac{n_1}{n} \right) \right)^4} \frac{1}{\pi} \left\{ 2 \cos^{-1} \left( \frac{y}{2a} \right) - \left( \frac{y}{a} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{y}{2a} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad \text{Ec. 1.7}$$

El resultado de la atenuación en dB es:

$$Perdida_{n_{lat}} = -10 \log_{10} n_{lat} \text{ dB} \quad \text{Ec. 1.8}$$

En algunas ocasiones se puede encontrar la ecuación 7 simplificada eliminando la primera fracción lo que equivale a considerar que  $n_1 = n$  y esto solo puede ser si se tiene un gel intermedio que tiene el mismo índice de refracción que el núcleo de las fibras, o se supone que están tan juntas que no hay aire de en medio, de todas formas la ecuación 7 a fibras de índice abrupto. El mismo cálculo pero para fibras de índice gradual y considerando que no hay diferencias entre los índices de refracción  $n_1 = n$  sería:

$$n_{lat} = 1 - \frac{2}{\pi} \left( \frac{y}{a} \right) \cdot \left( \frac{\alpha + 2}{\alpha + 1} \right) \quad \text{Ec. 1.9}$$

Para el cálculo de la atenuación en dB se utilizaría la ecuación 8 con un perfil parabólico se tendría  $\alpha = 2$  y por lo tanto:

$$n_{lat} = 1 - 0.85 \left( \frac{y}{a} \right) \quad \text{Ec. 1.10}$$

Pero para un perfil abrupto y con la misma fórmula:

$$n_{lat} = 1 - 0.64 \left( \frac{y}{a} \right) \quad \text{Ec. 1.11}$$

Esta solución coincide prácticamente con la ecuación 7 con lo cual puede apreciarse que las pérdidas son mayores para la fibra gradual que para la abrupta.

Se acepta como norma que para tener pérdidas de inserción menores a 0.5dB (lo máximo aconsejable) debidas a errores de alineamiento por desplazamiento lateral estos deberán ser menores al 5% del diámetro del núcleo de la fibra.

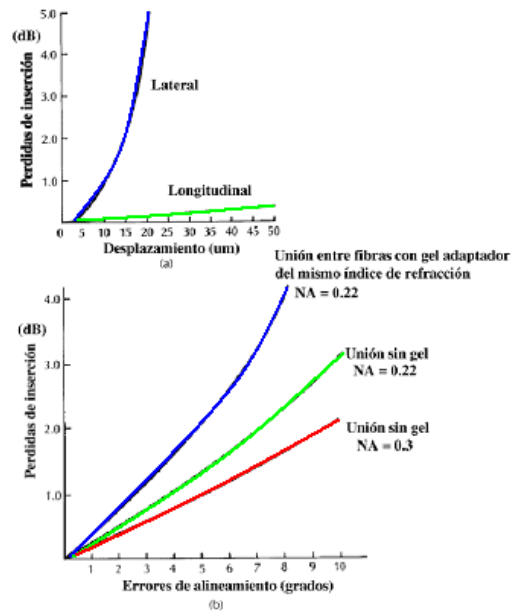


Figura 1.27 Atenuación por alineamiento incorrecto.

### 1.7.2 Eficiencia angular

La fórmula siguiente predice con exactitud suficiente la eficiencia de acoplamiento angular  $n_{ang}$

$$n_{ang} = \frac{16 \left( \frac{n_1}{n} \right)^2}{\left( 1 + \left( \frac{n_1}{n} \right) \right)^4} \left[ 1 - \frac{n\theta}{\pi n_1 (2\Delta)^{1/2}} \right] \quad \text{Ec. 1.12}$$

Se puede observar que este tipo de errores disminuye utilizando fibras con NA alto. Esta solución no es perfecta ya que en este caso se estropea la eficiencia por separación longitudinal.

### 1.7.3 Eficiencia longitudinal

La distribución angular a la salida de la fibra sigue el mismo patrón que el haz de luz que ha sido guiada desde la entrada, a la entrada tenemos que la apertura numérica nos indica el patrón angular ya citado, de tal forma que a la salida tendremos un cono cuyo ángulo viene determinado por la apertura numérica como se observa en la figura 1.28. y por tanto un incremento de la NA disminuirá la eficacia de este empalme en oposición de lo que ocurre en la eficacia angular.

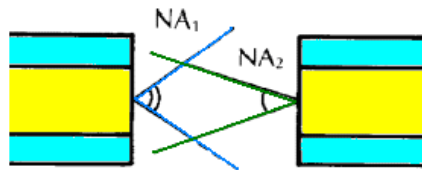


Figura 1.28 Acoplamiento entre dos fibras separadas longitudinalmente.

### 1.8 Pérdidas en empalmes de fibras monomodo

Debido a que las dimensiones son reducidas en el núcleo de una fibra monomodo las atenuaciones producidas por errores de alineamiento serán mucho mayores que en fibras multimodo, la fórmula simplificada para calcular esta atenuación será:

$$Loss_{lat} = 2.17 \left( \frac{y}{\omega} \right)^2 \text{ dB} \quad \text{Ec. 1.13}$$

Donde  $\omega$  es el tamaño del punto normalizado para el modo fundamental y tiene el valor:

$$\omega = a \frac{\left( 0.65 + 1.62V^{-\frac{2}{3}} + 2.88V^{-6} \right)}{\sqrt{2}} \quad \text{Ec. 1.14}$$

Donde  $a$  es el radio del núcleo de la fibra y  $V$  es la frecuencia normalizada.

Cabe destacar que para las fibras monomodo las pérdidas dependen en gran medida de la frecuencia normalizada de la fibra especialmente en los errores de alineamiento angular en este caso y para fibras de baja atenuación es importante que la desviación sea menor de  $1^\circ$ .

## 1.9 Tipos de empalmes o uniones fijas entre fibras

La unión permanente entre dos fibras se utiliza para alargar las conexiones cuando la distancia de esta no es lo suficientemente larga, cuando no es necesario ni amplificar la señal ni conectar ni desconectar en ese punto. Hay dos tipos de uniones permanentes, que son la unión por fusión y la unión mecánica.

El empalme por fusión se efectúa mediante el calentamiento de dos extremos prealineados consiguiendo que se reblandezcan y se fusionen, posteriormente dejándolos enfriar. Las uniones mecánicas consisten en mantener alineadas las fibras, puede conseguirse por varios métodos que incluyen el uso de tubos en los que se introducen las fibras o ranuras en forma de V en las que se fijan los extremos de las fibras.

En término medio, la atenuación producida por este tipo de uniones en fibras monomodo suele estar entre el 0.1dB y el 0.2dB que es mejor que si se usa conectores. En los empalmes por fusión no hay ningún tipo de intercara y en la unión mecánica se utiliza gel de índice de refracción adecuado para que tampoco haya variación del índice.

Una característica que se requiere en las fibras que van a ser unidas en forma permanente es que sus extremos deben ser suaves y su superficie ortogonal con el eje de la fibra. La preparación de los extremos de la fibra se hace con herramientas especiales que rayan la superficie de la fibra (la herramienta debe de tener punta de diamante) para que una vez que la raya hecha se extienda al interior de la fibra debido a la tensión que se ejerce sobre ella, el proceso puede realizarse sobre superficies planas o curvas y posteriormente se puede pulir la superficie.

### 1.9.1 Conexiones por empalme

Los empalmes de fibras implica el calentamiento de hasta el punto de fusión de los extremos de dos fibras preparadas con la aplicación de suficiente presión axial. Es de suma importancia que las fibras sin revestimiento (sin capas protectoras) están correctamente posicionadas y alineadas para que en el punto de fusión haya continuidad y sin errores de alineamiento.

Los sistemas de calentamiento pueden ser varios, aunque los mas usados son los arcos voltaicos, esta técnica ofrece la ventaja de ser un método de calentamiento puntual fácil de controlar.

Como se aprecia en la figura 1.29, se ilustran los pasos para realizar un empalme con arco voltaico. En la parte superior de la figura se aprecia el método de alineamiento mediante micro posicionadores mientras que en la parte inferior se observa que inicialmente se acercan los extremos de las fibras, el segundo paso la prefusión, en la que los extremos de la fibra quedan adecuadamente preparados para realizar el empalme, después se acercan las fibras y haciendo presión entre ellas se descarada de nuevo el



arco eléctrico produciéndose así el empalme. En este tipo de empalmes se han conseguido atenuaciones menores a 0.1dB.

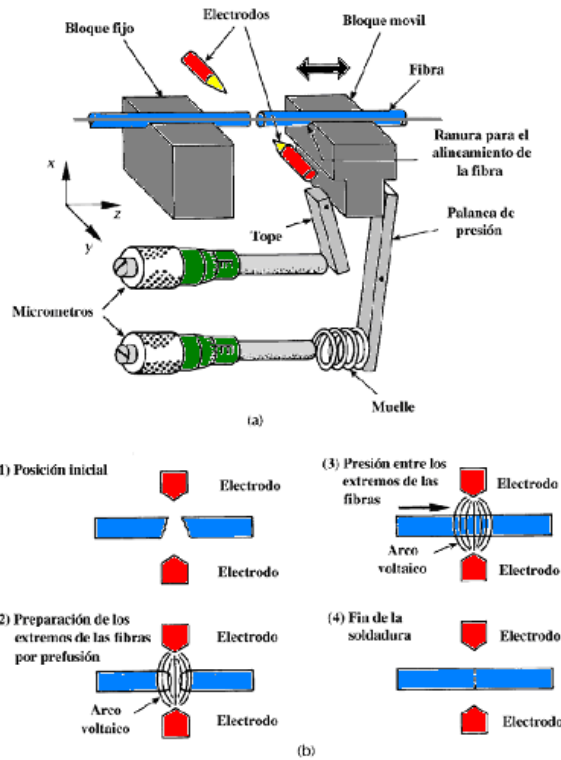
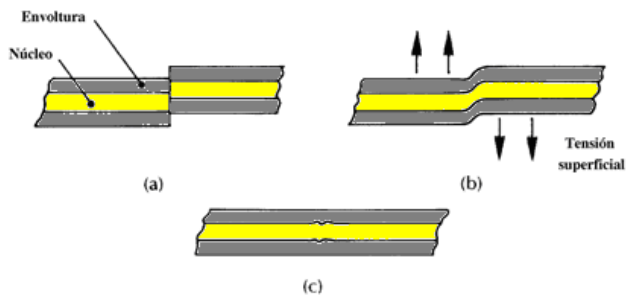


Figura 1.29 Empalme por arco voltaico.

El problema aparece cuando se intenta empalmar fibras monomodo ya que los núcleos tienen dimensiones menores de  $10\mu m$  y por tanto se necesitan errores menores de  $1\mu m$ . Para resolver este problema, el fenómeno de la tensión superficial que va a conseguir un auto alineamiento gracias al cual se consiguen pérdidas de 0.3dB

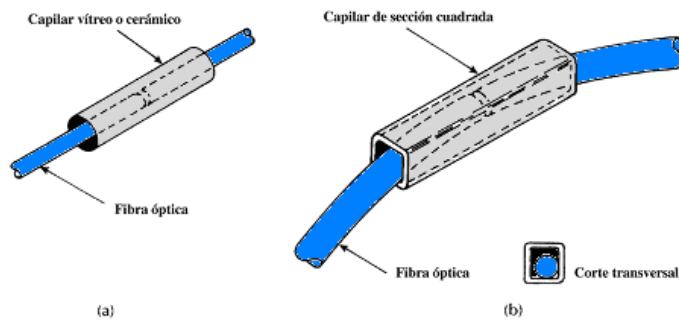
Uno de los inconvenientes en este tipo de empalmes es que el calor necesario para fundir los extremos de las fibras debilita las zonas próximas al empalme, de forma que la fragilidad de la fibra aumenta y como la fibra está desnuda será el punto en el que con mayor facilidad pueda producirse la ruptura. Pero también hay ventajas adicionales ya

que las empalmadoras automáticas permiten hacer esta tarea en el exterior donde se requiera hacer un empalme.



**Figura 1.30** El fenómeno del auto alineamiento

Hay varios métodos para hacer empalmes fijos mecánicos. El método más común es la utilización de un capilar que puede ser cilíndrico o rectangular, la idea es introducir la fibra de manera que el alineamiento este forzado a rellenar el capilar con un adhesivo transparente (resina) con el índice de refracción de la fibra, con este tipo de uniones se han conseguido atenuaciones medias de 0.1dB tanto en fibras monomodo como en multimodo. El problema en las cilindros aparece cuando la tolerancia de los capilares utilizados ya que en los productos comerciales las pérdidas suelen estar alrededor de los 0.5dB, para poder solucionar este problema se utilizan capilares cuadrados ya que con estos se han conseguido atenuaciones menores de 0.1dB.



**Figura 1.31** Técnicas para conexión de fibras sin utilizar fusión.

Hay otros métodos para usuarios no expertos que consiguen pérdidas menores de 0.03dB y suelen ser usados en conexiones comerciales y que consiste en unos conectores asimétricos que mediante rotación y un adecuado sistema de medida encuentran el punto de unión con menos pérdidas y se amarran finalmente mediante un muelle. Este método conocido como de conexión rotatoria es el más utilizado en la actualidad.

### 1.9.1.1 Conectores para Fibra

Los conectores desmontables tienen una mayor complicación ya que deben mantener una mínima atenuación en numerosas conexiones. Por tanto el diseño del conector debe permitir la conexión y desconexión sin problemas de alineamiento, este proceso mecánico es fácil ver que puede llevar a la degradación de la unión.

Para mantener características óptimas los conectores también deben proteger a los extremos de las fibras del daño que pueden sufrir al manejarlos, debe ser insensible a factores ambientales (como humedad o polvo) y debe soportar la tensión del cable. También debe (idealmente) ser un componente de bajo costo y permitir la conexión de forma simple. El conector debe satisfacer las siguientes características:

- El punto de conexión, que ha de proteger el extremo de la fibra.
- El alineamiento entre fibras para conseguir un acoplamiento óptico óptimo.
- La carcasa, que mantiene la conexión y el alineamiento de las fibras, protege la parte desnuda de las fibras del ambiente y proporciona rigidez a la unión.

El uso de algún material con el índice de refracción del núcleo entre las dos fibras puede ser de ayuda ya que elimina la atenuación por reflexión Fresnel y mantiene los extremos de la fibra limpias de polvo. Sin embargo no son una solución ya que por otra parte no es práctica la existencia de ningún material no sólido en la zona en la que se conecta y desconecta ya que los fluidos se derramarán y además atraerán polvo, que no llegará a la fibra pero servirá como barrera al paso de la luz.

Hay muchos conectores para fibra en el mercado y que tienen pérdidas en el rango de 0.2 a 0.3dB. Pueden dividirse en dos categorías: los conectores de proximidad (*butt jointed connectors*) y los de haz expandido (*expanded beam connectors*). La funcionalidad de los primeros descansa en conseguir que los extremos de las fibras estén lo más cercanos posible de forma que los núcleos coincidan, los segundos hacen uso de lentes, deforma que el emisor expande el haz y el receptor lo enfoca al núcleo de su fibra.

#### 1.9.1.1.2 Tipos de conectores

Existen una gran variedad de conectores que se diferencian por sus aplicaciones o simplemente por su diseño: poseen una tapa para proteger la fibra de rayones y suciedad, con un gatillo para abrirla.

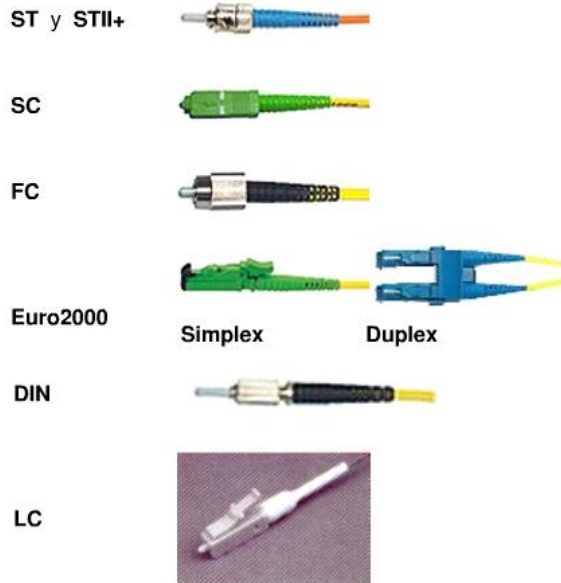


Figura 1.32 Tipos de conectores para Fibra Óptica.

Siguiendo a estos nombres vendrán siglas que indicarán alguna característica en particular. Cualquiera de estos conectores puede venir en las opciones de pulido PC ó APC (angular para video), en MM o SM, simples o dobles (una o dos fibras por conector), PM (polarisation maintaining), etc. Cada conector consta de:

- Férula: es el cilindro que rodea la fibra a manera de PIN.
- Cuerpo.
- El mango.

También existen conectores con el cuerpo intercambiable según la necesidad, como el Alberino de Diamond:



Figura 1.33 Conector Alberino de Diamond.

### 1.9.2 Acopladores o adaptadores

Son como pequeños tambores o cajas que reciben un conector de cada lado produciendo el acople óptico, con la mínima pérdida posible. Se utilizan en los distribuidores, para facilitar la desconexión y cambio rápido, acoplando el pigtail que se haya empalmado al cable de fibra con el patchcord que se conecta a los equipos receptores/emisores. También se usan para conectar un tramo de fibra a los equipos de medición.

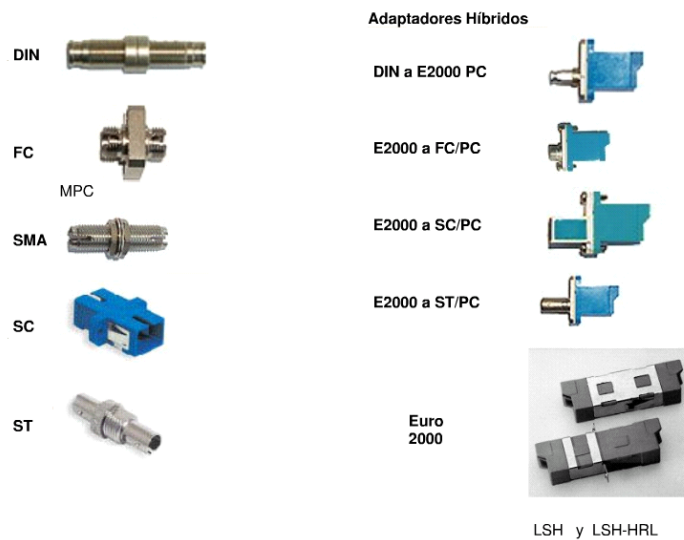


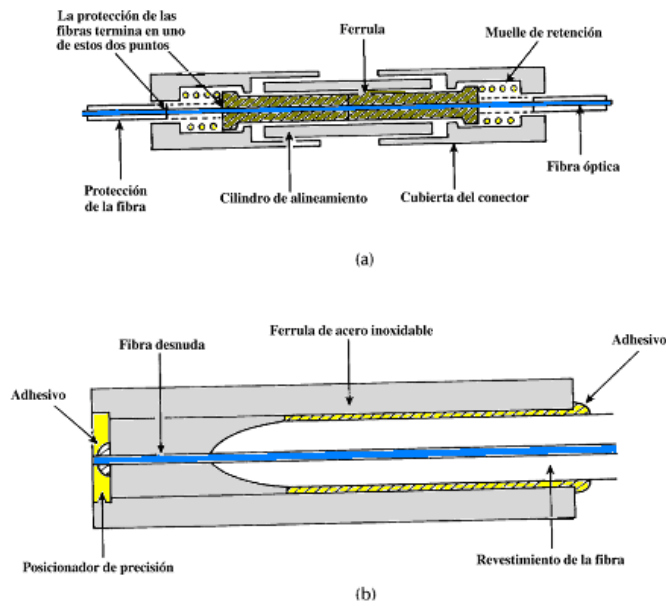
Figura 1.34 Tipos de acopladores.

### 1.9.3 Conectores de proximidad

Los conectores más utilizados son los de proximidad. Los conectores de camisa concéntrica (*Cylindrical ferrule connectors*), es el conector más simple, la fibra desnuda está pegada (con resina) a una férula (cilindro metálico) cuyo agujero central tiene el diámetro de la fibra. Una vez fijada la fibra (estos conectores son macho) se introducirán en un cilindro guía de precisión que permite que los extremos de las fibras estén pegados. Una vez colocado el conector se fija mediante un mecanismo de retención que puede ser un muelle. Para este tipo de conector es muy importante que los extremos de las fibras sean suaves y perpendiculares al eje de la fibra. Para conseguir esto se puede hacer de varias formas:

- Clivando la fibra antes de introducirla en la férula.
- Introducir la fibra en la férula y clivandola después, justo en el final de la férula.

- Utilizar cualquiera de los métodos anteriores y después pulir la fibra hasta que quede justo en el extremo de la férula.



**Figura 1.35** Conectores de camisa concéntrica: (a) estructura de un conector básico, (b) estructura de un conector con salida de precisión.

El último sistema es el que da mejores resultados pero es el más tedioso y complicado, sobre todo en campo abierto.

Los errores de alineamiento del sistema hacen que las pérdidas estén en el orden de 1 a 2dB con fibras multimodo.

Para solucionar problemas de alineamiento y simplificar la fabricación de las férulas se añade en el extremo del conector un terminador (watch jewel) de precisión que será el que en poco espacio hace el trabajo que antes hacía la férula, con este tipo de mejoras se consiguen atenuaciones entre 0.2 y 0.3dB. Comercialmente existen varios de estos tipos de conectores, los tipos más comunes son los ST (straight tip), SMA (subminiature assembly), FC (fiber connector), PC (physical contact) y SC (subscriber connector).

Este sistema de conector no es el único, también podemos encontrarnos con conectores de férula bicónicos, con los doblemente excéntricos y con conectores para dos fibras y para múltiples fibras.

### 1.9.4 Conectores de haz expandido

La alternativa a los conectores de proximidad son los conectores de haz expandido, su principio se puede ver en la figura 1.36, puede verse en la figura como la luz se expande debido a la apertura numérica de la fibra, el haz se convierte en un haz paralelo debido a una lente convergente con distancia focal adecuada y posteriormente otra lente convergente enfocará este haz en el núcleo de la segunda fibra.

El uso de la óptica convierte el alineamiento entre conectores en algo mucho menos crítico, la distancia entre fibras ya no es importante mientras que antes fuera crucial. Pero por supuesto esto no es gratuito y se hace a expensas de unas exigencias angulares mayores. Este tipo de conectores son muy útiles para conexión de múltiples fibras y para placas de circuito impreso donde los alineamientos lateral y longitudinal son difíciles de conseguir.

Estos conectores tienen como ventaja de utilización que sus resultados son muy repetitivos y consiguen sin problemas atenuaciones menores de 0.5dB.

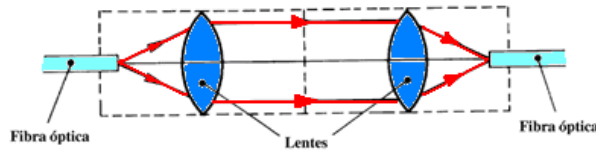


Figura 1.36 Esquema simplificado del funcionamiento de un conector de haz expandido

### 1.10 Diseño del sistema

En el diseño de un sistema, se deben tener muchos factores en cuenta, pero el más importante es que el transmisor sea lo suficientemente potente como para llevar la luz al otro extremo de la fibra y si el ancho de banda es suficiente para que el sistema de datos lleve a una tasa lo suficientemente alta. Si la señal es demasiado débil cuando se llega al extremo del sistema los datos serán difíciles de separar del ruido que ocasionara que el número de errores en los bits recibidos aumente. Si se produce un error una vez cada mil millones de bits que se dice que la tasa de error (BER) de  $10^{-9}$  y es el límite superior normal de aceptabilidad.

#### 1.10.1 Limitaciones en la potencia recibida

1. La potencia recibida debe ser lo suficientemente alto como para mantener el BER a un valor bajo.
2. La potencia recibida debe ser lo suficientemente bajo como para evitar daños en el receptor.

### **1.10.2 Limitaciones en el transmisor de potencia**

En los costos y los motivos de seguridad es bueno para mantener la potencia del transmisor al valor mínimo aceptable.

Un método para poder decidir la potencia que requiere el sistema a continuación se describe:

Encontrara las perdidas mínimas debido a la fibra conectores y empalmes. Estas cifras se obtienen del fabricante, ya sea en el catálogo o poniéndose en contacto con ellos.

Encontrar el máximo posible de las pérdidas. Esto incluirá el mínimo de pérdidas calculado con anterioridad, muchos componentes del sistema se deterioran durante su uso y es de gran importancia saber la su periodo de vida útil, de otro modo el sistema se bloqueará.

Las reparaciones son una cuestión de criterio en función del medio ambiente y el deterioro a los que la fibra se someterá. Es evidente que es de poca utilidad para diseñar un sistema que aunque funciona la primera vez que se pone en funcionamiento, que tiene tan poca capacidad de potencia de respaldo adicional que la pérdida sufrida por una simple reparación sería suficiente para hacer que el sistema colapse. Esta etapa es una suposición basada en la experiencia y asesoramiento.

Seleccione una fuente emisora de luz con suficiente potencia para que el sistema pueda operar en el peor de los casos con perdidas máximas. Luego, verifique si esto dañara el receptor en condiciones de perdidas mínimas.

Algunos de los valores utilizados son realmente estimados, es de esperar que otra persona logre resultados ligeramente diferentes.

### **1.10.3 El ancho de banda utilizable de la fibra óptica**

Para hacer que el sistema sea factible, no solo se debe tener una potencia óptica óptima sino también tener la certeza de que podemos lograr una tasa de transferencia de datos buena y esto significa tener un ancho de banda adecuado.

Si consultar fabricantes, catálogos, anchos de banda no parece un problema. La magnitud del problema de la dispersión aumenta con la longitud del cable y por lo que la tasa de transmisión y por lo tanto el ancho de banda, disminuye con la longitud de la fibra.

Para hacer un verdadero sistema también se necesita una fuente de luz y un receptor. Ambos tienen un límite de velocidad y cambio de la tasa de transmisión. No tiene



sentido comprar una fibra capaz de ofrecer un ancho de banda de 10GHz si el receptor en el otro extremo sólo puede cambiar a 5MHz.

Hay que hacer destacar que es el ancho de banda del sistema el que se utiliza, no solo el ancho de banda de la fibra, así que se necesita saber el efecto de la dispersión y la velocidad de conmutación del transmisor y el receptor.

Las fibras monomodo y multimodo responden diferente y deben ser considerado por separado.

#### 1.10.4 El ancho de banda de un sistema multimodo

Lo primero que se debe de hacer es encontrar el ancho de banda de la fibra multimodo, que se consigue de la hoja de especificaciones que proporciona le fabricante, una especificación típica sería 500MHz Km.

Nótese que la unidades usadas 500MHz Km, significa que el ancho de banda multiplicado por la distancia en kilómetros a 500MHz. Por lo tanto esta fibra tiene un ancho de banda de 250MHz si la distancia fuera de solo 2Km, pero se reduce a 50MHz si fuera de 10Km de distancia. Nótese como el sistema de 500MHz se reduce.

Encuentre el tiempo de subida de fibra, el tiempo de subida es el tiempo necesario para aumentar la luz del 10% al 90% de su valor final. Cuanto mayor sea la frecuencia de una onda más corto será el tiempo de subida, como se muestra en la Figura 1.37.

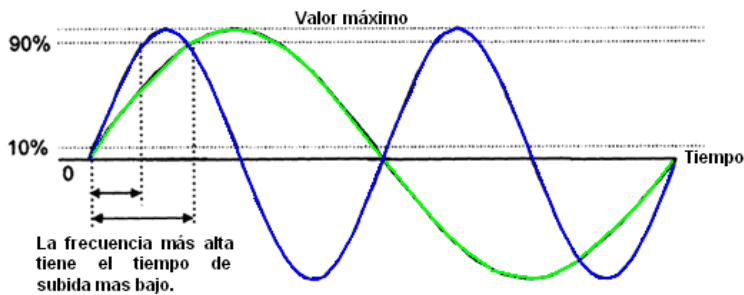


Figura 1.37 Tiempo de subida corto necesita ancho de banda amplio.

El tiempo de subida de la fibra se calcula utilizando el ancho de banda de la fibra:

$$t_r = \frac{0.35}{\text{Ancho de banda de la fibra}} \quad \text{Ec. 1.15}$$

Donde  $t_r$  es el tiempo de subida.

También es necesario saber a qué velocidad el transmisor y el receptor son capaces de responder. El tiempo de subida lo podemos encontrar en las especificaciones del fabricante, se muestra como tiempo de respuesta o tiempo de subida. Un valor típico para un láser es de  $0.3 \text{ ns}$  y para un LED  $5 \text{ ns}$ . Cuánto más rápido es el láser. Algunos receptores, en particular fototransistores, no todos son muy rápidos y deben ser seleccionados con cuidado.

Teniendo estos tres componentes, la fuente de luz, la fibra y el receptor, cada uno con su velocidad de conmutación propia. Cuando el pulso eléctrico se aplica a la fuente de luz esta empezará a aumentar su potencia de luz a la salida. La fibra sigue a su propio ritmo y finalmente la salida eléctrica del receptor comienza a subir. No es fácil ver cómo estas velocidades de reacción diferentes interactuarán para producir una respuesta general para el sistema.

Para esto combinamos los tiempos de respuesta.

$$t_{sist} = \sqrt{t_{r_{tx}}^2 + t_{r_{rx}}^2 + t_{r_{fibra}}^2} \quad \text{Ec. 1.16}$$

Esto da el tiempo de respuesta para el sistema completo. Ahora podemos obtener el ancho de banda del sistema, para hacer esto se utiliza la misma formula que para la fibra.

$$\text{Ancho de banda} = \frac{0.35}{t_{sist}} \quad \text{Ec. 1.17}$$

### 1.10.5 El ancho de banda de un sistema monomodo

Se ha mencionado anteriormente que hay un par de diferencias cuando se trata de encontrar el ancho de banda de un sistema de monomodo. Cuando nos fijamos en las fichas de datos, vemos que no hay cifras de ancho de banda de fibra monomodo. En lugar de esto se proporciona una cifra para la dispersión y características de esta, así que nosotros debemos obtener el ancho de banda. No es posible para las fabricantes hacer esto por nosotros porque la dispersión es dependiente del ancho espectral de la fuente de luz y la longitud de la fibra y ambos están mas aya de su control.

Comparado con el procedimiento para obtener el ancho de banda para un sistema multimodo es lo mismo solo se sustituye encontrar el ancho de banda de la fibra. Y todo lo demás es igual.

Lo primero que se debe hacer es encontrar la dispersión este dato lo proporciona el fabricante, el ancho espectral de la fuente de luz y de la longitud de fibra.

Para encontrar la dispersión lo hacemos con la siguiente formula:

Dispersión = Especificación de la dispersión  $\times$  ancho espectral de la fuente de luz  $\times$  longitud de la fibra **Ec. 1.18**

La combinación de estos tres factores (en donde la dispersión es en picó segundos) al ancho espectral en nanómetros y la longitud de la fibra en kilómetros, produce una unidad imprevista  $psnm^{-1}Km^{-1}$  (picó segundos por nanómetros por kilómetro).

Para encontrar el ancho de banda de la fibra utilizamos la siguiente formula:

$$\text{Ancho de banda de la Fibra} = \frac{0.44}{\text{Figura de dispersión}} \quad \text{Ec. 1.19}$$

El resultado es usualmente en GHz, pero solo en fibras multimodo, decepción que a menudo sigue, a menos que el transmisor y el receptor sean cuidadosamente elegidos.

Para terminar los cálculos se utilizan las mismas formulas que para el sistema multimodo las formulas 1.15, 1.16, 1.17.

## 1.11 Fuentes de Luz y detectores

La mayoría de las fuentes de luz y detectores son dispositivos electrónicos construidos a partir de los mismos materiales semiconductores que se utilizan en transistores y circuitos integrados.

### 1.11.1 Láser

La forma más común de diodo láser se llama diodo láser de inyección, ó solo diodo de inyección. La palabra inyección no es de interés, simplemente se refiere a una parte del proceso que ocurre dentro del material semiconductor.

Un láser proporciona una luz de longitud de onda fija la región que pueden ser visibles es de alrededor de 635 nm o en cualquiera de las tres ventanas de infrarrojos.

La luz tiene un ancho de banda muy estrecho, normalmente sólo unos pocos nanómetros de ancho. Esto asegura que la dispersión cromática se mantiene a un valor bajo, y esto con una conmutación rápida permite una alta tasa de transmisión de datos.

Como el propio dispositivo láser es apenas visible a simple vista, debe estar contenida en alguna forma de paquete. Dos ejemplos típicos se muestran en la Figura 1.38.

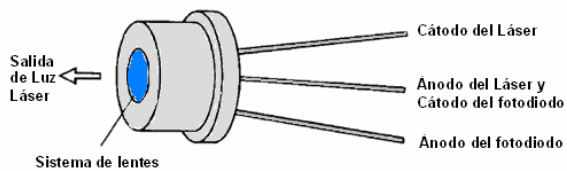
### 1.11.2 Láser para Luz visible

La luz es lanzada a través de un sistema de lentes que le permita concentrarse en un haz. La luz láser visible encuentra en aplicaciones en los lectores de códigos de barras, reproductores de CD, sistemas médicos y de comunicación. Por lo regular son equipados con un detector de luz incorporada

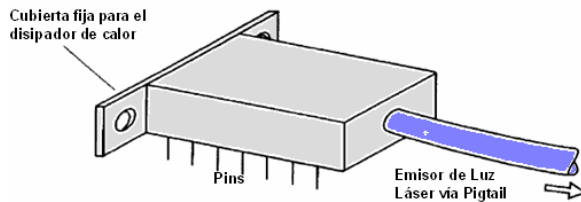
### 1.11.3 Láseres monomodo para las comunicaciones

El lanzamiento con éxito en fibras monomodo requiere una precisión muy alta y esto se logra mediante la optimización de la posición del pigtail adjunto que puede ser conectado a la red de fibra.

Una célula fotoeléctrica también se incluye como un dispositivo de control para medir la potencia de salida. Esto proporciona información para permitir el control automático de la potencia del láser a la salida.



Encapsulado típico para Láser visible y Láser de 850nm



Láser para uso multimodo

Figura 1.38 Tipos de Láser.

La potencia de salida de un láser se ve afectada por cualquier cambio en su temperatura, la disminución general en la potencia conforme aumenta la temperatura. Algunos módulos láser incluyen un sensor de temperatura para combatir este problema. Proporciona información sobre la temperatura interior que se utiliza para el control de un

termo-refrigerador eléctrico como un refrigerador pequeño, para mantener la temperatura estable. La estabilidad de la temperatura también es mejorada por el encapsulado del láser a algún tipo de disipador de calor como puede ser la cubierta.

#### 1.11.4 LED Diodo emisor de Luz

Los Led's pueden proporcionar luz en el espectro visible, como en los 850nm, 1350nm y los 1500nm.

Comparados con los láser tiene un potencia de salida menor, velocidad de conmutación mas baja y un mayor ancho espectral, por lo tanto mayor dispersión. Estas diferencias los hacen inferiores para su uso en enlaces de datos de alta velocidad y telecomunicaciones. Sin embargo, es ampliamente utilizado para corto y mediano rango en sistemas que utilizan fibras de vidrio o plástico, ya que es simple, barato, fiable y es menos dependiente de la temperatura. También es afectado por la energía de la luz entrante.

A pesar de que consume menos energía, hace que sea más seguro para usar, pero puede ser peligroso cuando la luz se concentra a través de un instrumento de visualización.

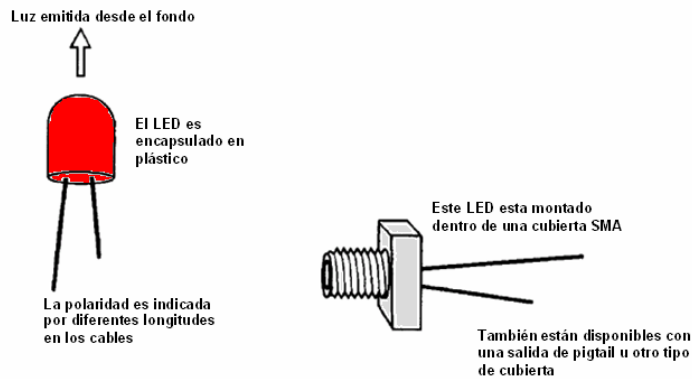


Figura 1.39 Encapsulado de Led's y Cubierta SMA.

#### 1.11.5 Diodos PIN

Un diodo PIN es el método más popular para la conversión de la luz recibida en una señal eléctrica. Su apariencia es similar a los Láser y Led. Pueden tener terminaciones con SMA, ST, SC, bicónica y una variedad de conectores o un pigtail. Se utiliza un material semiconductor, ya sea de germanio o de silicio. El material semiconductor puro se llama un semiconductor intrínseco. Para que trabaje, tenemos que agregar una

cantidad controlada de impurezas en el semiconductor para cambiar sus características. El semiconductor se convierte en dos tipos, uno llamado semiconductor tipo N y el otro tipo P.

Aunque se pueden adquirir diodos PIN directamente, lo más usual para esto es que tenga un amplificador dentro del módulo para proporcionar un nivel de señal a la salida más alto.

## **1.12 Componentes de fibra óptica y dispositivos**

### **1.12.1 Receptor de enlace óptico**

#### **1.12.1.1 Detectores para sistemas ópticos**

Existe una gran variedad de detectores de luz.

Detectores térmicos donde la radiación es absorbida y transformada en calor (responde al cambio de temperatura).

Detectores cuánticos: los que responden directamente a la densidad de fotones incidentes. Dentro de los detectores cuánticos podemos encontrar:

- Detectores fotoemisivos son los que aprovechan la emisión de electrones desde un material cuando inciden fotones según el efecto fotoeléctrico. Responden a fototubos de vacío con multiplicación interna.

Detectores fotoconductorivos en estos la densidad de fotones hace variar la conductividad del fotosensor. Existen los tipos, los fotorresistivos (elemento resistivo o un semiconductor intrínseco) y fotodiodos (semiconductores dopados).

Detectores fotovoltaicos, donde al incidir fotones se genera una tensión; tal el caso de las celdas solares.

La elección recae sobre los detectores cuánticos fotoconductorivos con semiconductores dopados. Las razones son, que tienen el menor peso y tamaño, son más robustos que los tubos de vacío. Tienen estabilidad térmica y temporal. Su costo es reducido. Tienen gran respuesta espectral, más linealidad y velocidad de conmutación.

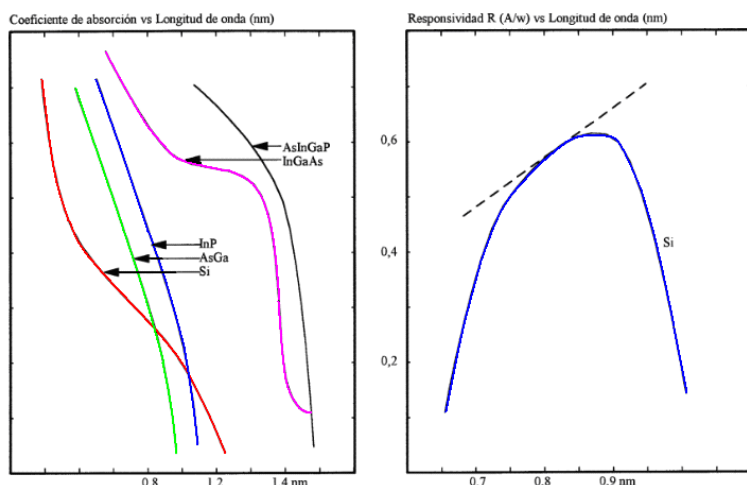


Figura 1.40 Absorción de luz y tiempo de respuesta de los detectores de luz.

#### 1.12.1.1.1 Detectores fotodiodos

La elección del semiconductor adecuado para la longitud de onda se realiza mediante la respuesta espectral. En la Figura 1.40 se representa el coeficiente de absorción  $\alpha$  en unidades de  $\text{cm}^{-1}$  para distintos semiconductores. La inversa del coeficiente es la longitud de penetración de la radiación en el material. Para lograr altas velocidades el valor de  $1/\alpha$  debe ser menor que  $1\mu\text{m}$ . El Si tiene en la primer ventana  $0.85\mu\text{m}$  un valor de  $1/\alpha = 10\mu\text{m}$ . Sin embargo, por el alto grado de conocimiento de este semiconductor se lo ha adoptado como detector en esta ventana.

#### 1.12.1.1.2 Tiempo de Respuesta

El tiempo de respuesta o factor de respuesta R es la relación que existe entre la corriente I que entrega el fotodiodo al circuito eléctrico y la potencia óptica P que recibe de aquél.

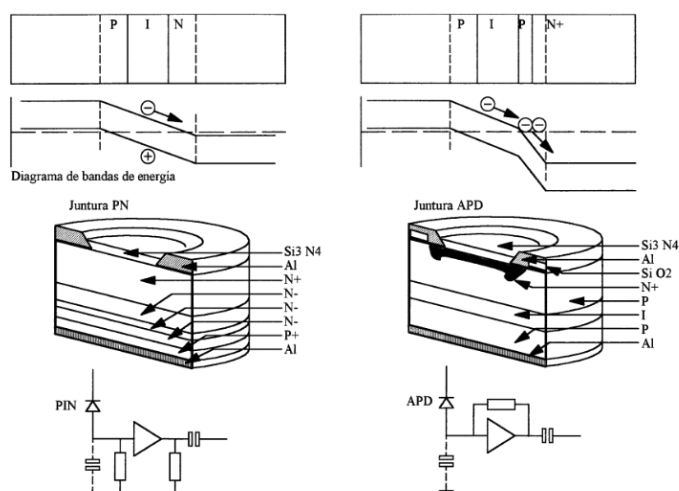
$$R = I / P = (e \cdot r_e) / (E \cdot r_f) = e \cdot \lambda \cdot \eta / h \cdot c \quad \text{Ec. 1.20}$$

Donde e es la carga del electrón, E la energía del fotón,  $r_e$  y  $r_f$  son el número promedio de electrones y fotones,  $\eta$  la eficiencia cuántica ( $r_e/r_f$ ). El valor de R se aproxima por:

$$R = 0.8 \lambda \cdot \eta \quad \text{Ec. 1.21}$$

Si la longitud de onda  $\lambda$  se mide en  $\mu\text{m}$ . Se observa que R aumenta con  $\lambda$  en forma lineal. Sin embargo, existe un valor de la longitud de onda donde los fotones tienen una

energía  $E$  inferior al salto entre las bandas BC-BV. A partir de este punto los pares electrón-laguna generados por los fotones disminuyen rápidamente. En el Si la  $R$  se torna insignificante más allá de  $1.1\mu\text{m}$ . Por ello debemos adoptar otros materiales para las longitudes de onda más largas. Entre los materiales posibles se encuentra el Ge y InP.



**Figura 41** Esquema de los detectores PIN y APD para señales ópticas.

En el mejor de los casos (con  $\eta=1$ ) se tiene que un fotón genera un par electrón-laguna. En condiciones normales este par se vuelve a recombinar. Para separarlo y extraer una corriente del material es necesario disponer de una juntura PN con una polarización inversa de forma que sólo hay corriente cuando incide luz. En la juntura existe una diferencia de potencial que separa al par.

En la Figura 1.41 se muestra las distintas formas de uniones. En una unión simple PN los pares creados fuera de la zona de juntura se vuelven a recombinar. Para incrementar la zona de detección se coloca una capa intermedia levemente dopada o intrínseca constituyendo un diodo PIN. Si ahora se agrega una capa adicional altamente dopada se crea una elevada diferencia de potencial que produce una ganancia interna debido a una avalancha de electrones, dando lugar al fotodiodo por avalancha APD.

### 1.12.2 Fotodiodo avalancha

La elevada diferencia de potencial del APD permite que algunos electrones cedan parte de la energía para formar otros pares adicionales, lo cual se logra cuando el campo eléctrico de la juntura supera los  $3.105\text{V/cm}$ . El proceso de multiplicación por avalancha



crea una ganancia interna  $M$  que es aleatoria. Desde el punto de vista eléctrico del APD se comporta como un diodo ideal en paralelo con un generador de corriente proporcional a la luz incidente. Cuando llega a un valor de tensión de polarización inversa que crea un campo interno suficiente para iniciar la avalancha, se produce un aumento de la fotocorriente. La tensión necesaria es de 150V a 400V en el Si y de 10V a 50V en el Ge.

Sin incidencia de luz se tiene una corriente residual de oscuridad, que resulta ser la suma producida por la difusión de portadores minoritarios generados térmicamente fuera de la zona de depleción y la tunelización de electrones entre la BV y BC. En resumen se usarán el Si en  $0.85\mu\text{m}$ ; y el Ge o InP en  $1.3\mu\text{m}$  ó  $1.55\mu\text{m}$  y con dos estructuras posibles el PIN o APD. En general se usa la estructura APD para el Si y Ge y la estructura PIN para los derivados del InP. En el diodo PIN la velocidad de los portadores en un campo típico de  $2\text{V}/\mu\text{m}$  es de  $84\mu\text{m}/\text{ns}$  para el electrón y de  $44\mu\text{m}/\text{ns}$  para las lagunas. Para un ancho de carga espacial de  $20\mu\text{m}$ , con 40V de tensión externa el electrón lo recorre en 250ps y la laguna en 500ps; la luz es absorbida cerca de la juntura PI y las lagunas recorren por ello un camino menor. La eficiencia cuántica del diodo PIN es del 80%.

### 1.12.3 Análisis de ruidos en el receptor ruido térmico y cuántico

Es conocido que la densidad de ruido térmico es proporcional a  $(k^*T)$ , donde  $k$  es la constante de Boltzmann y  $T$  la temperatura en grados Kelvin. El mismo se desarrolla sobre la resistencia de entrada  $R$  del amplificador, lo cual determina una tensión cuadrática media de ruido térmico:

$$V_t^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot AB \cdot R \cdot NF \quad \text{Ec. 1.22}$$

Donde  $AB$  es el ancho de banda del receptor y  $NF$  figura o cifra de ruido.

El ruido térmico es producido por la agitación molecular de carácter aleatorio. Por otro lado, la detección de fotones por el detector también es un proceso aleatorio, ya sea por la distribución aleatoria de la densidad de fotones que llega como por la fluctuación del rendimiento cuántico. De este proceso casual surge un valor medio considerado la señal de información y una desviación cuadrática media considerada el ruido cuántico.

La llegada de fotones al detector es un proceso que puede describirse mediante la distribución de Poisson. El valor cuadrático medio del ruido cuántico sobre la resistencia de entrada  $R$  del receptor es:

$$V_q^2 = 2 \cdot e \cdot I \cdot AB \cdot R^2 \quad \text{Ec. 1.23}$$

Donde  $e$  es la carga del electrón,  $I$  el valor medio de la distribución de Poisson. Observe que el ruido cuántico depende de la distribución de Poisson, en otras palabras se anula

cuando no hay fotones incidentes. En primer instancia pueden expresar la relación señal a ruido S/N mediante:

$$S/N = \frac{(I^2 \cdot R^2)}{(4 \cdot k \cdot T \cdot AB \cdot R \cdot NF + 2 \cdot e \cdot I \cdot AB \cdot R^2)} \quad \text{Ec. 1.24}$$

#### 1.12.4 Receptor ideal

Con referencia a la distribución de Poisson en el proceso de detección de fotones. La probabilidad de que el número de fotones detectados sea h, se expresa como:

$$P(h) = \frac{\left(\eta \cdot \frac{E_r}{E_f}\right)^h}{h!} \cdot \exp\left(-\eta \frac{E_r}{E_f}\right) \quad \text{Ec. 1.25}$$

Donde  $\eta$  es la eficiencia cuántica,  $E_r$  la energía total incidente y  $E_f$  la energía del fotón.

Se considera un receptor ideal. Esto supone que ante la detección de solo un fotón se considera un "uno" lógico. La ausencia de fotones se identifica como un "cero". Por ello la probabilidad de no emitir electrones será:

$$P(h=0) = \exp\left(-\eta \cdot \frac{E_r}{E_f}\right) \quad \text{para } P(h=0) = 10^{-9} \text{ se tiene } E_r = 21E_f/\eta \quad \text{Ec. 1.26}$$

Por ello con  $\eta=1$  se requieren 21 fotones por cada "uno" lógico para tener una tasa de error  $BER=10^{-9}$ . Si consideramos los "ceros" y los "unos" equiprobables se tiene;  $E_r=10.5E_f$

Es decir, se requieren 10.5 fotones por cada bit de información. Este valor se denomina límite cuántico de sensibilidad (potencia umbral) para las comunicaciones ópticas digitales. Para las longitudes de onda usadas se tiene:

$\lambda=0.85\mu\text{m}$  implica una sensibilidad  $S=-146\text{dBm/bit/seg}$

$\lambda=1.3\mu\text{m}$  implica una sensibilidad  $S=-148\text{dBm/bit/seg}$

$\lambda=1.55\mu\text{m}$  implica una sensibilidad  $S=-148.7\text{dBm/bit/seg}$

En la Figura 1.42 se muestran estos límites expresados en unidades de dBm/Mb/s. La sensibilidad o potencia umbral del receptor es la mínima potencia óptica que asegura una determinada tasa de error. La misma disminuye con la velocidad de transmisión. En otras palabras, debemos aumentar la potencia de recepción para mantener la misma BER. En la misma figura se indican los valores prácticos comerciales de equipos disponibles en el mercado.

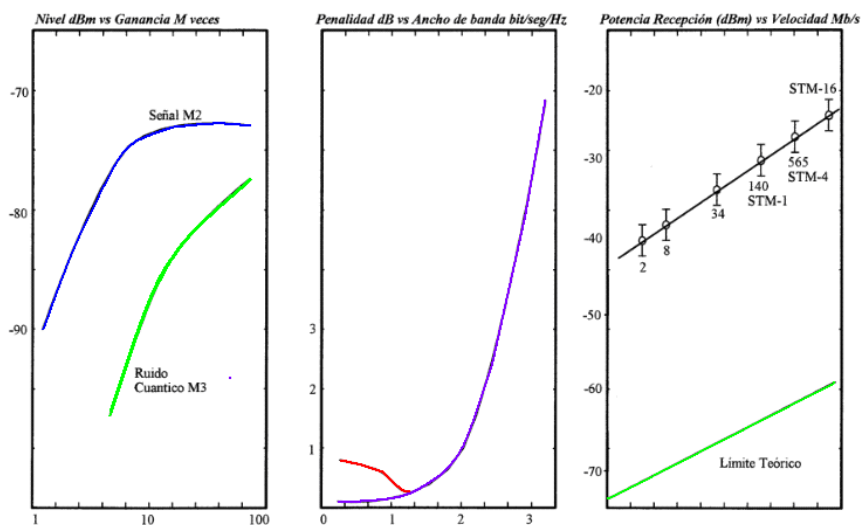


Figura 1.42 Características eléctricas de los detectores ópticos.

### 1.13 Modulación de potencia y modulación coherente

Digresión acerca del tipo de luz usada. El ancho espectral de los emisores se encuentra cercano a 1nm para los Láser. Este ancho espectral para longitudes de onda en  $1\mu\text{m}$  representa un ancho de banda de  $3 \cdot 10^{11}\text{Hz}$ . Es decir, mientras que el ancho de banda de las señales a transmitir llega al orden de 2.5GHz para los sistemas para SDH (Jerarquía Digital Sincrónica), el ancho de banda de la fuente emisora es de 300GHz. Una modulación de potencia de luz incoherente de baja mono cromaticidad; resulta como la variación del nivel de un espectro plano y continuo. Esto es un beneficio ya que el receptor no requiere una demodulación sino sólo un detector de potencia. Cuando el grado de mono cromaticidad y el ancho de banda aumentan se debe recurrir a la demodulación coherente.

A continuación se indican las expresiones que caracterizan a la modulación de intensidad de luz y detección directa y a la modulación coherente. En el primer caso el rendimiento cuántico  $\eta$  es la relación entre el número de electrones y el número de fotones:

$$\eta = J_{ph}/e\phi \quad \text{Ec. 1.27}$$

Donde  $J_{ph}$  es la densidad de corriente fotoeléctrica y  $e\phi$  la densidad de fotones. Si ahora usamos la potencia incidente  $P_r$  en la expresión se tiene:

$$\eta = I_{ph} \cdot h \cdot \nu / e \cdot P_r \text{ con } \nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{Ec. 1.28}$$

El tiempo de respuesta según ya se definió es la relación entre la corriente eléctrica de salida y la potencia incidente:

$$R = \frac{e \cdot \eta}{h \cdot \nu} \text{ y } I_{ph} = R \cdot P_r \quad \text{Ec. 1.29}$$

### 1.13.1 Ruido de multiplicación por avalancha

La ganancia interna del APD produce una amplificación media  $M$ , pero por ser un proceso aleatorio la desviación de  $M$  se la considera un ruido. El APD es como un amplificador que tiene una figura de ruido  $F$  dependiente de  $M$ . La  $F(M)$  se escribe como:

$$F(M) = M^{2a} \quad \text{Ec. 1.30}$$

Donde  $a$  está entre 0.15 y 0.25 para el APD-Si y cerca de 0.5 para el APD-Ge. Se observa que  $F(M)$  aumenta más rápidamente en el Ge que en el Si, por lo que se dice que el Ge es más ruidoso que el Si.

En los detectores APD tanto la señal como el ruido cuántico se incrementa con  $M^2$  en el valor de tensión cuadrático medio. Pero para el ruido cuántico es  $F(M) = M^{2a}$ . Para los APD adaptamos la expresión de  $S/N$  anterior de la siguiente manera:

$$S/N = [I^2 \cdot R^2 \cdot M^2] / ([4 \cdot k \cdot T \cdot AB \cdot R \cdot F] + [2 \cdot e \cdot I \cdot AB \cdot R^2 \cdot M^2 \cdot F(M)]) \quad \text{Ec. 1.31}$$

Mientras la señal se incrementa con  $M^2$  el ruido cuántico lo hace con  $M^{2+2a}$ . El ruido cuántico crece más rápidamente que la señal. En la Figura 1.42 se muestra un ejemplo para un APD-Ge con un valor óptimo de  $M$  donde la  $S/N$  es máxima. Para un mejor análisis se realiza un cambio de variable en la expresión anterior:

$$y = \frac{I}{2} e \cdot AB \quad \text{Ec. 1.32}$$

$$K = \frac{k \cdot T \cdot F}{2 \cdot e \cdot R \cdot AB} \quad \text{Ec. 1.33}$$

Implica

$$S/N = \frac{y^2}{y \cdot M^{2a} + K \cdot M^{-2}} \quad \text{Ec. 1.34}$$

En la Figura 1.42 se representa S/N como función de (M; y). Se muestran las líneas de cresta de M óptimo. Obsérvese que S/N vs M tiene dos asíntotas de pendiente con distinto signo, lo cual determina el M<sub>ópt</sub>. Lo más notable es que al incrementar M no se incrementa la S/N. El M<sub>ópt</sub> ocurre cuando la S/N es máxima:

$$\frac{d(y \cdot M^{2a} + K \cdot M^{-2})}{dM} = 0 \quad \text{Ec. 1.35}$$

$$\text{Luego } M_{\text{ópt}} = \left( \frac{K}{a \cdot y} \right)^{\frac{1}{2+2a}} \quad \text{Ec. 1.36}$$

En los APD-Si el valor de M<sub>ópt</sub> es cercano a 100 y en los APD-Ge a 10.

### 1.13.2 Otros ruidos e interferencia Inter símbolo

El ruido de oscuridad resulta de la interpretación de la corriente de oscuridad como ruido. La misma es producida por fuga superficial de corriente y por la generación y recombinación de pares en la zona de juntura por razones térmicas. Por esta razón es conveniente controlar la temperatura del diodo. El valor del ruido es bajo y menor en el InP que en el Ge.

El ruido modal, al propagarse varios modos por la fibra óptica se produce un patrón de interferencia Speckle Patterns. Como existe la dispersión de los modos de propagación el patrón no es estable, siendo sensible a variaciones del índice de refracción y curvaturas. Esta distribución aleatoria se considera un ruido que en tanto el número de modos sea elevado es despreciable. El peor caso ocurre en las fibras ópticas monomodo, debido a las dos polarizaciones ortogonales del modo y a la birefringencia de la fibra óptica que produce condiciones de propagación distintas para las dos polarizaciones y por lo tanto una dispersión. El patrón de interferencia puede modificarse entonces en forma dramática. Para reducir este ruido es conveniente una fuente de ancho espectral elevado o fibras ópticas con gran dispersión. Cuando se modula a un emisor Láser la potencia relativa entre los distintos modos de resonancia longitudinales varía dando lugar a la denominada partición modal que se interpreta también como ruido producido en este caso por el retardo de grupo entre distintas longitudes de onda.

La Interferencia intersímbolo es la sensibilidad se mide en dBm cuando no existe ISI, es decir cuando el ancho de banda es infinito. La ISI introduce una deformación de la señal que incrementa la BER en presencia de ruido. Por ello cuando el ancho de banda de la fibra óptica es reducido se debe considerar un empeoramiento de la sensibilidad que se

describe como una penalidad por ISI. El valor de Pisi se expresa en dB y se suma al valor de sensibilidad.

En la Figura 1.42 se muestra Pisi vs  $V_{tx}/AB$  (relación entre la velocidad de transmisión y el ancho de banda), para el uso de ecualizadores fijos (filtro coseno realzado) y auto adaptables. Cuando la banda de la fibra óptica AB es muy grande en el ecualizador adaptable la penalidad Pisi se reduce a cero; pero como el ecualizador fijo se diseña para una banda cuya relación  $V_{tx}/AB= 1,5$  (con  $\beta=0,5$ ) en dicho punto la Pisi tiene un valor mínimo. En la misma figura se muestra la sensibilidad en un equipo comercial para 34Mb/s, código CMI, en primer ventana  $0.85\mu\text{m}$  y  $BER= 10^{-9}$ . El ecualizador fijo usado indica que con una relación  $V_{tx}/B= 1.5$  la Pisi es de 3dB. El rol off del filtro es  $\beta=1$ . En el equipo de 565Mb/s o 622Mb/s se puede considerar una penalidad de 2dB debido al ruido de partición modal (producto del reparto de potencia entre los varios modos de emisión) que produce un cierre del diagrama de ojo horizontal como una fluctuación de fase de alta frecuencia.

#### 1.14 Circuito del detector

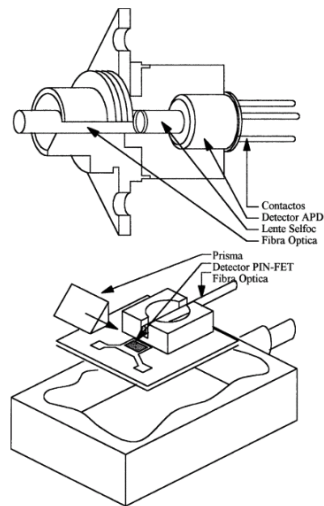
Se emplean dos tipos básicos de circuitos, la etapa con entrada de transimpedancia y con alta impedancia.

Nos referimos a la Figura 1.41. La etapa de transimpedancia se prefiere para los detectores APD. La resistencia de realimentación  $R_f$  mantiene la tensión de entrada baja y minimiza los efectos de la capacidad de ingreso. En los receptores para gran ancho de banda el ruido derivado de  $R_f$  produce pérdida de la sensibilidad, es decir que incrementa el número de ruido del receptor, especialmente si se usa con detectores PIN. Esta etapa se usa con APD debido a que esta configuración admite señales fuertes.

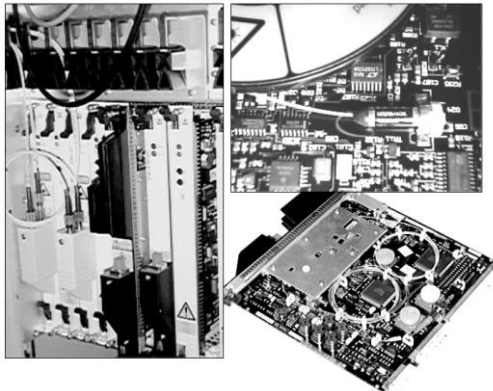
Para los detectores PIN se prefiere la etapa de alta impedancia, donde  $R_1$  se hace grande para minimizar el ruido térmico. Sin embargo, la combinación de  $R_1$  con  $C_1$  produce una integración de la señal lo que exige colocar una red diferenciadora para ecualizar la salida. Para reducir la capacidad de la entrada se coloca una etapa de transistor de efecto de campo FET luego del PIN, por lo que se suele hablar de detectores PIN-FET. En tal caso el ruido predominante es el producido en el canal del FET. En el caso del circuito del APD se requiere un control de la tensión de la polarización ya que variaciones de ésta producen modificaciones en la ganancia  $M$ . Cuando  $M$  varía debido a la temperatura debe ajustarse la polarización mediante un control automático de ganancia AGC para que permanezca constante. El encapsulado conteniendo al detector suele ser de los mismos 2 tipos que el emisor.

En la Figura 1.43 se muestran el encapsulado mediante una lente usado en el APD. También se muestra el encapsulado tipo Pigtail. La principal dificultad del ensamblado es el enfoque de la fibra óptica con el detector.

Cuando el diodo se coloca perpendicular a la fibra óptica, debe estar perpendicular al sustrato; esto crea capacidades parásitas que bajan el rendimiento del circuito híbrido PIN-FET. Una propuesta es guiar la luz con un micro prisma desde la fibra óptica hasta el detector. Una resina epoxica impide la reflexión en la interfaz. En otros casos se coloca un pigtail de fibra óptica multimodo 50/125 para mejorar el acoplamiento y el APD perpendicular a la fibra óptica se encuentra separado del sustrato que contiene el amplificador de entrada



**Figura 1.43** Diagrama de detectores ópticos.



**Figura 1.44** Circuito detector óptico. Un equipo de fibras ópticas SDH, la unidad de transmisión y recepción óptica y un detalle del detector

## 1.15 Transmisor de enlace óptico

### 1.15.1 Láser semiconductor para sistemas ópticos

#### 1.15.1.1 Tipos de láser digresión

Fue Einstein en 1905 quien determinó la teoría de los cuantos de luz. Se combinaba de esta forma las teorías de partículas de Newton y las ondas de Huygens. Compton en 1923 llamó a las partículas fotones. El mismo año De Broglie determinó teóricamente que toda partícula tiene asociada una onda. Se trata de la dualidad onda-partícula de la teoría cuántica, completada por Schrödinger y Heisenberg en 1926. C.Townes y A.Prójorov en 1953 independientemente propusieron el Máser (amplificador de microondas) trabajando sobre una molécula de Amoníaco a 24GHz. Los emisores Láser fueron sugeridos por Schawlow y Townes en 1958 como una extensión del Máser y aplicado por Maiman en 1960 con el Láser de Ruby. No fue hasta una década después que los Láser semiconductores estuvieron listos.

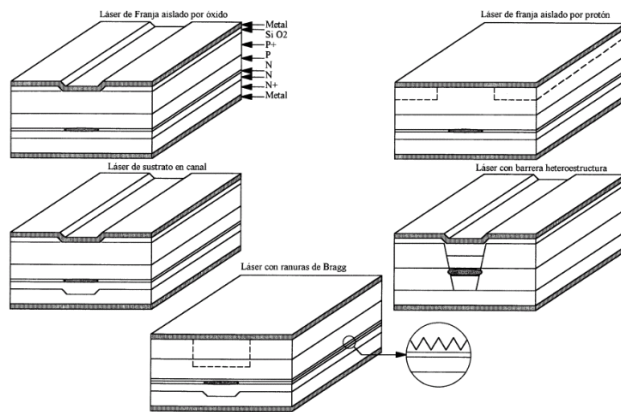


Figura 1.45 Diversos tipos de emisores Láser.

De acuerdo con la Figura 1.45 se tienen los siguientes tipos de Láser semiconductor para comunicaciones:

- Láser de franja aislado por óxido. Consiste en una estructura múltiple de capas donde el contacto metálico superior se encuentra aislado por  $\text{SiO}_2$  o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Este contacto con el semiconductor ocupa una franja de  $3\ \mu\text{m}$  a  $20\ \mu\text{m}$  de ancho y se extiende a lo largo de la cavidad. La corriente circula desde esta franja hacia el contacto de la base, dispersándose. Se requiere un alto confinamiento para producir una elevada concentración de fotones y lograr la emisión estimulada. El



alto índice de refracción del semiconductor asegura una reflexión del 30% en los extremos lo que es suficiente para asegurar la realimentación interna y mantener la emisión estimulada. La emisión de luz es a lo largo de la juntura (emisión axial)

- Láser de franja aislado por protón. Para lograr un efecto de circulación de corriente similar al caso anterior se bombardea con protones de alta energía la superficie del material, protegiendo la franja activa con una máscara. Los protones incrementan la resistividad del semiconductor. Esta técnica es más precisa y mejora el resultado respecto a la anterior.
- Láser con sustrato en canal. En este caso se crea un canal en el sustrato que por el salto de índice de refracción confina la zona de emisión.
- Láser con ranura de Bragg. En esta técnica la realimentación se provee por la perturbación periódica geométrica a lo largo de la cavidad, perdiendo importancia la reflectividad en las caras. El período de las ranuras es  $T = \lambda / 2 * n$ . La longitud de onda  $\lambda$  se toma en el vacío y  $n$  es el índice de refracción. Con  $n = 3.6$  y  $\lambda = 800 \text{ nm}$  se tiene un valor de  $T = 111 \text{ nm}$ . Estas ranuras actúan como espejos para la longitud de onda calculada y son transparentes para las demás. Puede pensarse en dos tipos de estructuras, DFB (Distributed Feed Back) con ranuras en la zona activa y DBR (Distributed Bragg Reflector) con ranuras fuera de ella. El DFB es usado actualmente en sistemas de alta velocidad.
- Láser con barrera heteroestructura. Aquí se crean dos barreras con salto de índice, una para el confinamiento transversal horizontal (estructura enterrada) y otra para un confinamiento transversal vertical.

### 1.15.1.2 Características de los emisores

La característica más interesante de los emisores es la transferencia entre la corriente eléctrica de alimentación y la potencia óptica de salida.  $P_{opt}$  (potencia óptica) vs  $I$  se muestra en la Figura 1.46 y se distinguen diferencias para los Led y Láser. Mientras en el Led la característica es casi lineal desde el origen, en los Láser se tiene una quebradura de la curva.

La potencia óptica es reducida mientras la corriente no es suficiente para lograr la densidad de portadores necesarios para la emisión estimulada. Más allá de un valor de la corriente denominado corriente de umbral  $I_{th}$  se logra la emisión estimulada y la potencia óptica aumenta rápidamente. La corriente de umbral se define como la corriente obtenida por la prolongación de una recta imaginaria proveniente de la linealización de la curva hasta el eje. Cuando la corriente es inferior a la corriente de umbral no existe

emisión estimulada sólo hay la emisión espontánea como en el Led; cuando corriente es superior a corriente umbral existe emisión estimulada.

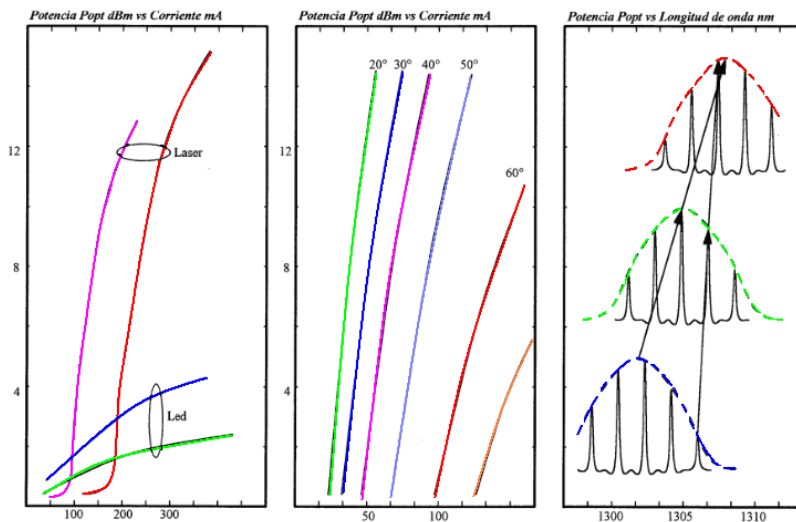


Figura 1.46 Características eléctricas de los emisores ópticos.

Para valores muy elevados de corriente se produce una oscilación regenerativa que aplanada la curva. El Láser se usará con corriente mayor a la corriente de umbral y antes de la zona de oscilación, es decir en la zona recta. En los Láser se produce un corrimiento de la curva con el incremento de la temperatura y con el envejecimiento del componente. El incremento es exponencial:

$$I_{th2} = I_{th1} \cdot \exp\left(\frac{T_2 - T_1}{T_0}\right) \quad \text{Ec. 1.37}$$

El valor de  $T_0$  para los Láser de AsGaAl está comprendido entre 150 y 250°C y para los de PAsInGa entre 50 y 70°C. El valor de  $T$  es la temperatura de juntura. Esto corresponde a un incremento de la corriente umbral de 0.6 a 1%/°C y de 1.2 a 2 %/°C respectivamente. La elevada sensibilidad a la temperatura se debe al incremento de las recombinaciones no radiativas entre bandas del semiconductor. Este corrimiento de las curvas implica que con variaciones de temperatura se produce, a corriente constante, una variación de la potencia de salida, lo cual debe evitarse.

### 1.15.1.3 Propiedades modales de emisión

La cavidad emisora tiene modos de resonancia que actúan sobre la salida de la radiación. Hay modos longitudinales (modo de resonancia a lo largo de la cavidad) y transversales (modo de resonancia vertical u horizontal de una cara de la cavidad). Los primeros dan lugar al espectro de emisión, es decir a la densidad de potencia óptica en función de la longitud de onda. Los segundos dan lugar al patrón del campo emitido. El campo de emisión se descompone en un campo cercano y uno lejano, éste se forma por la difracción de aquél. El campo lejano se aproxima a una función lambertiana:

$$P_{opt} = P_{opt_{max}} \cdot (\cos\varphi)^M \quad \text{Ec. 1.38}$$

Donde  $P_{opt_{max}}$  es el valor máximo de la potencia óptica emitida y  $\varphi$  es el ángulo respecto del valor de máxima emisión. El campo cercano y lejano sufren astigmatismo, por lo que son elípticos y perpendiculares entre sí. El espectro de emisión está relacionado con los modos longitudinales. Como se ve en la Figura 1.46 los modos longitudinales están separados por un valor  $\Delta\lambda$ . El ancho espectral de emisión de  $\Delta\lambda$  se mide a la mitad de potencia óptica máxima (RMS) para emisores multimodo y a -20dB para monomodo. Este valor entiende en el problema de la dispersión cromática de las fibras ópticas monomodo. En general los emisores Led tienen ancho espectral elevado frente al Láser. Por otro lado, la segunda ventaja tiene ancho espectral mayor que la primera. Los valores están cercanos a 50nm y 100nm para Led de 0.85 $\mu\text{m}$  y 1.3 $\mu\text{m}$  y entre 0.1nm y 5nm para el Láser.

El espectro de emisión se corre con la temperatura, además de modificarse con la corriente de trabajo. La separación entre modos de emisión para un Láser de cavidad (Fabry-Perot) es:

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{[2 \cdot L \cdot (n - \lambda \cdot dn/d\lambda)]} \quad \text{Ec. 1.39}$$

Donde L la longitud de la cavidad y n el índice de refracción del semiconductor. El corrimiento con la temperatura se puede indicar de acuerdo a la Tabla 1.3.

Longitud de onda en $\mu\text{m}$	0.85	1.3	1.55
Modos de longitud de onda nm	0.27	0.6	0.9
Ancho espectral en nm	2	5	7
Corrimiento del máximo nm/ $^{\circ}\text{C}$	0.22	0.5	0.73
Corrimiento del modo en nm/ $^{\circ}\text{C}$	0.06	0.12	0.18

**Tabla 1.3** Corrimiento de los parámetros con la temperatura.

#### 1.15.1.4 Circuito de alimentación del emisor

Como primer paso en la descripción del terminal de línea óptica del lado transmisión se resumen las características de los emisores más importantes en la Tabla 1.4.

Emisor	Láser	Láser	Led	Led
Material utilizado	AsGaAl	PasInGA	AsGaAl	PasInGA
$\lambda(\mu\text{m})$	0.8 – 0.9	1.2 – 1.6	0.8 – 0.9	1.1 – 1.6
Popt(mW)	5 a 8	3 a 5	1 a 3	1
Acoplamiento(dB)	3 a 5	3 a 5	15 a 20	15 a 20
$\delta\lambda(\text{nm})$	Menor a 2	Menor a 2	50	100
Modulación (MHz)	2000	2000	100	100
Tiempo de vida	$10^5$ Hrs	$10^5$ Hrs	$10^6$ Hrs	$10^6$ Hrs

Tabla 1.4. Comparación de características de Láser y Led.

Se observa que los Láser tienen una mayor potencia óptica de salida la gran diferencia con los Led es que la atenuación de acoplamiento a la fibra óptica en el Láser es mucho menor. También es menor el ancho espectral de emisión y se puede modular con anchos de banda mayores. Sin embargo, los Led pueden modularse con señales analógicas además de digitales y tienen un período de vida mayor. Los Láser son interesantes cuando se usan acompañando a fibra óptica monomodo por el reducido ancho espectral, lo cual tiene relación con la dispersión cromática y por ello con el ancho de banda del sistema. Si modulamos el Láser con una señal digital cuya corriente de excitación tiene la máxima excursión (desde cero al máximo en la zona de linealidad) se tiene que el emisor pasa de la emisión espontánea a la estimulada y el espectro de emisión se modifica substancialmente. Un impulso de luz tendrá entonces un régimen transitorio (si el Láser no se polariza por encima de la corriente de umbral) en lo que respecta a la emisión espectral, la cual limita el ancho de banda de modulación.

#### 1.15.1.5 Circuito de polarización

Los Láser requieren una corriente de polarización  $I_{pol}$  sobre la corriente de umbral  $I_{th}$ . Como la corriente de umbral se incrementa con el crecimiento de la temperatura y envejecimiento debe realizarse un control de la polarización. Un esquema en bloques típico se muestra en la Figura 1.47.

Un detector de luz APD o PIN se coloca en la cara trasera del Láser de forma de obtener una parte de la energía de salida. La señal detectada por el APD es promediada a largo plazo (filtro pasabajos) y comparada con el promedio a largo plazo de la señal digital. De esta forma se realiza un control sobre la potencia de salida modificando la corriente de polarización del Láser a fin de mantener la Potencia óptica constante. Por otro lado, las variaciones a corto plazo de la potencia óptica debida a la señal digital transmitida se eliminan con el filtrado. Por último, se tiene un ajuste manual de la corriente de

polarización. El circuito de realimentación es negativo incrementado la corriente cuando baja la potencia óptica. En la medida que el Láser envejece se incrementa la corriente de polarización y se obtiene una alarma previa a la degradación definitiva (ajustada al doble de la corriente inicial).

Debido a la necesidad de la realimentación el encapsulado del Láser debe prever el detector de luz. Existen 3 tipos generales de encapsulado; solo el último es usado en telecomunicaciones. El emisor libre donde se debe enfrentar la fibra óptica al emisor, en este caso la potencia óptica de salida es elevada pero la atenuación de acoplamiento también lo es. Por ejemplo, el Láser emite en esta condición 8mW.

Emisor con lente donde el encapsulado incluye una lente que concentra la luz en la fibra óptica, teniendo además un orificio por donde se introduce la fibra óptica para mayor precisión. En tal caso la potencia medida en la salida es, por ejemplo, de 6mw ya que se incluye la atenuación de acoplamiento al lente.

Emisor con pigtail (cola de fibra óptica) donde el encapsulado (realizado en fábrica) enfrenta y une sólidamente la fibra óptica al emisor. En tal caso el acoplamiento ya está hecho y la potencia óptica medida es de 2.5mW. En la Figura 1.47 se muestra el encapsulado con lente usado en algunas pocas oportunidades (hasta 1985). En la misma figura se muestra la conexión con pigtail (la más popular en los años '90). Obsérvese que el Láser se une a la fibra óptica y que se tiene un termistor (resistencia variable con la temperatura) para controlar la temperatura cercana al Láser. El mismo actúa sobre una celda Peltier termoeléctrica.

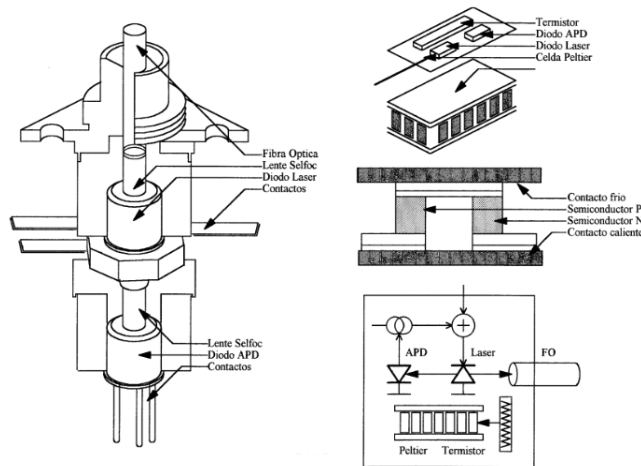


Figura 1.47 Diagrama de los emisores Láser.

### 1.15.1.6 Diagrama a bloques de un conversor eléctrico-óptico

El diagrama en bloques del equipo transmisor-receptor se muestra en la Figura 1.47. Se observa la simpleza del mismo debido a que no requiere un MO-DEModulador en el sentido tradicional de la palabra. Aquí el emisor varía la potencia de salida en función de la señal modulante y el detector es tan solo un sensor de potencia.

El conversor eléctrico-óptico se complementa con un CO-DECodificador para distintas funciones: conversión de código de interfaz, aleatorización, codificador de línea fibra óptica. El primero de ellos adapta el código de interfaz desde el equipo multiplexor a los niveles lógicos de los circuitos integrados (código HDB3 o CMI a NRZ). El segundo Codec es un aleatorizador que compone una secuencia pseudorandom con la señal de datos para eliminar secuencias prolongadas de ceros, unos o secuencias periódicas (mantiene transiciones para recuperar el reloj y un promedio de potencia óptica constante). En sistemas SDH la secuencia es  $2^7-1$ .

Por último, se puede realizar una codificación de línea óptica. Puede ser del tipo mBnB, donde m bits son convertidos en n bits. Permite eliminar los unos y ceros seguidos y realizar un control de la tasa de error BER en el receptor. Códigos como 1B2B o CMI se usaron en equipos de 2 y 8 Mb/s y el 5B6B en velocidades PDH superiores. Otras veces, para que el Láser trabaje en forma pulsante, se ha recurrido a la transmisión en código RZ donde los pulsos son reducidos al 50% de su duración. También se ha usado el código HDB3 o CMI en forma directa sobre el Láser. En sistemas SDH la codificación es NRZ.

Una función muy importante del equipo es la supervisión para la operación y el mantenimiento. Por un lado, el circuito emite una alarma cuando se tiene la degradación de Láser. Esta alarma de carácter no urgente se activa cuando la corriente de polarización se incrementa del 50% al 100% respecto del valor original mediante el circuito de control. De esta forma se tiene una alarma previa a la degradación catastrófica del emisor.

Por otro lado, en los sistemas plesiócronicos PDH, el equipo suele formar una trama de orden superior a la recibida desde el multiplexor. Esta trama no está normalizada, corresponde a diseños propios del fabricante y responde al esquema de inserción de bits. Por ejemplo se puede disponer de bits de alineamiento de trama; bits de paridad; bits para el canal de conmutación; bits de canales de servicio. Así en la misma trama digital óptica se incluye el canal de servicio, conmutación y control de paridad. La jerarquía SDH incorpora las funciones de la etapa de banda base dentro del encabezamiento (SOH) de la trama de STM1= 155 Mb/s.

## 1.16 Amplificadores de fibra y otros componentes

### 1.16.1 Amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA)

Los sistemas de comunicaciones futuros requieren una mayor velocidad de bits, que puede lograrse mediante WDM. Además, la independencia en el formato y la posibilidad de transmisión bidireccional sería deseable. La regeneración electrónica empleada en la mayoría de los sistemas existentes es algo que puede ser eliminado con la amplificación óptica.



Figura 1.48 Amplificador EDFA

Los amplificadores para fibra óptica son amplificadores ópticos que usan fibra dopada, normalmente con tierras raras. Estos amplificadores necesitan de un bombeo externo con un láser de onda continua a una frecuencia óptica ligeramente superior a la que amplifican. Típicamente las longitudes de onda de bombeo son 980nm a 1480nm y para obtener los mejores resultados en cuanto a ruido se refiere, debe realizarse en la misma dirección que la señal.

Un amplificador óptico es capaz de amplificar un conjunto de longitudes onda (WDM, wavelength division multiplexing).

Algunas características de los EDFA's comerciales son:

- Su frecuencia de operación es en las bandas C y L (153nm a 1605nm aproximadamente).
- Para su funcionamiento en banda S (por debajo de 1480nm), es necesario de otros dopantes.
- Tienen una figura baja de ruido (típicamente 3dB a 6dB).
- Tienen una ganancia entre 15dB a 40dB.

- Su baja sensibilidad al estado de polarización de la luz de entrada.
- Su máxima potencia de salida entre 14dB a 25dB.
- Una ganancia interna entre 25dB a 50dB.
- Variación de ganancia de +/- 0.5dB.
- la longitud de onda de bombeo de 980nm o 1480nm.
- Ruido predominante el ASE(Amplified Spontaneous Emission)

### 1.16.2 Compensadores de dispersión

Uno de los obstáculos para la aplicación de EDFA's a  $1.55\mu m$  es la alta dispersión en las fibras de sílice a esta longitud de onda. De hecho, la razón por la que los actuales sistemas de comunicaciones ópticas se han instalado en  $1.31\mu m$  donde la pérdida es mayor pero la dispersión es menor, es que la dispersión se consideraba el mayor problema. De hecho, como la demanda de la velocidad de bits es más y más alta en la capacidad de los sistemas, la dispersión es la limitación de los parámetros. Sin embargo, compensadores de dispersión para fibra se están desarrollando para abordar esta cuestión. El estándar de delta bajo para fibra monomodo que tiene dispersión positiva, magnitud de  $17 ps/nmKm$  a  $1.55\mu m$ . Fibras de delta más alta tienen dispersión negativa.

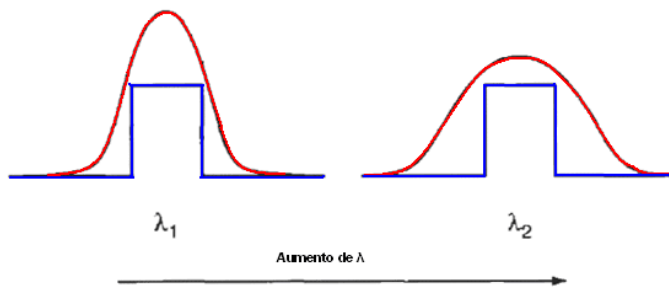


Figura 1.49 Fibra de  $\lambda$  más alta tiene dispersión negativa.

Con el aumento de la longitud de onda ( $\lambda$ ) el modo del campo se amplía, más luz viaja en la vaina en lugar de en el núcleo de la fibra, y la dispersión, que es igual al tiempo de retardo  $d\tau/d\lambda$ , se hace negativo. Compensadores de dispersión para fibras monomodo (DCF), están siendo diseñados con índices de perfil más complicados, para adaptarse a la dispersión por ejemplo, permitiendo que el modo de guiado a la fuga en un menor índice en el revestimiento. Esto puede dar una gran dispersión negativa, pero también incrementa las pérdidas. Los primeros DCF diseñados compensados por la magnitud de la dispersión en una longitud pero su aplicación en sistemas de múltiples longitudes de onda serían limitados. Diseños más recientes, puede compensar tanto la magnitud y la pendiente de la dispersión en  $1.55\mu m$  y tienen una dispersión tan alta



como  $200\text{ps/nmKm}$ . Aplicación en un sistema existente supondría la adición de aproximadamente un kilómetro de DCF por cada 10Km de fibra. Si esto se hace en una fase intermedia de un EDFA multi etapa, el impacto de la pérdida mayor se puede minimizar.

### 1.16.3 Conmutación

Hay dos tipos de conmutación diferentes: OADM y OXC.

OADM (Optical Add & Drop Multiplexer) es un dispositivo utilizado en los sistemas de multiplexación de longitud de onda para multiplexar y enrutar diferentes canales de luz dentro de una fibra monomodo SMF "Single Mode Fiber".

Las capacidades del dispositivo son las de agregar uno o más canales de longitud de onda a una señal existente "Add" Retirar uno o más canales "Drop", enrutando esas señales a otra trayectoria dentro de la red.

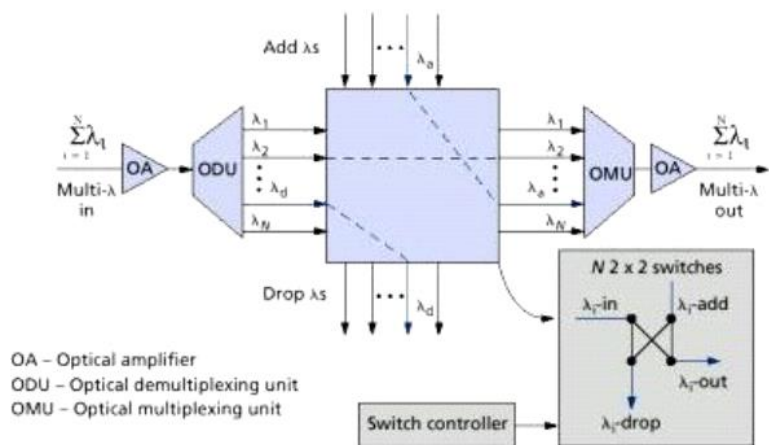


Figura 1.50 Diagrama de un multiplexor.

CISCO CWDM OADM



CISCO CWDM OADM



Figura 1.51 Equipos y fabricantes.

OXC (Optical Cross Connect) consiste en un conmutador matricial de fibras ópticas de dimensión  $M \times N$ , donde  $M$  es el número de fibras de entrada que conmutan  $N$  fibras de salida, todo ello en base a un proceso completamente óptico, es decir, sin ningún tipo de conversión electro-óptica u opto-electrónica.

Desde un punto de vista más abstracto y puramente conceptual, un crossconnect se puede definir como un dispositivo que hace que una señal en un determinado punto A se dirija a un punto B o a un punto C. Así, se observa que la función del OXC consiste básicamente en conmutar longitudes de onda a gran velocidad de una fibra a otra en base a las necesidades de tráfico.

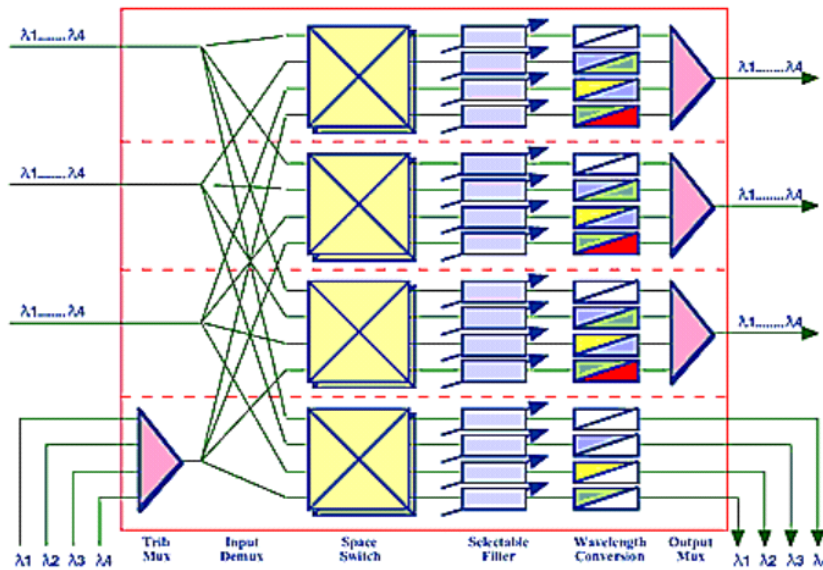


Figura 1.52 Diagrama de un OXC.

Su papel está fuertemente condicionado por el desarrollo y nivel de madurez que se pueda conseguir en el entorno DWDM. De momento, la primera aplicación que aparece ya definida suficientemente es la restauración (restauración del tráfico y enlace en caso de cortes en la fibra y fallos en el nodo). La restauración con un OXC conlleva sólo minutos, o incluso segundos, frente a las horas que puede durar el mismo proceso con medios convencionales.

Las propiedades del OXC tiene la capacidad de Fiber switching que es la capacidad para enrutar todas las longitudes de onda que provienen de una fibra hacia otra fibra de salida diferente. El Wavelength switching que es la capacidad de controlar la entrada y la salida

de longitudes de onda específicas de una fibra de entrada hacia otra de salida. La Wavelength conversión que es la capacidad para recoger longitudes de onda y convertirlas en otras con distinta frecuencia óptica antes de mandarlas hacia el puerto de salida.

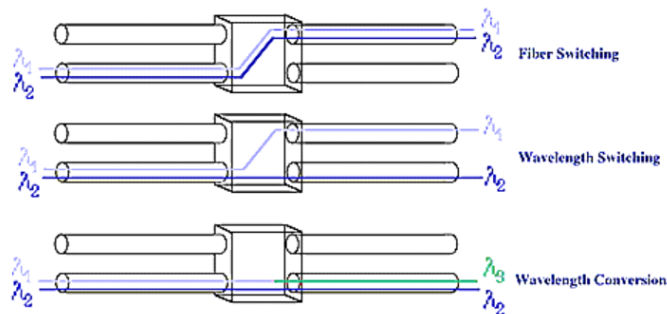


Figura 1.53 Propiedades del OXC.

#### 1.16.4 Modulador óptico

El modulador óptico puede ser realizado mediante técnica de Li Nb O<sub>3</sub>, Mach-Zehnder MZ o electro-absorción de In P. En la figura 1.53 se muestra un esquema típico de modulador Mach-Zehnder. El material sustrato (LiNbO<sub>3</sub> o AsGa) tiene dibujado mediante Ti una guía de onda monomodo. El voltaje aplicado modifica el tensor de permeabilidad óptica del material produciendo un cambio de fase o un efecto de acoplamiento modal en el desplazamiento de la onda dentro de la guía. Dando lugar a una modulación (AM, PM), giro de polarización o conversión de frecuencia.

El modulador Mach-Zehnder actúa como modulador AM ya que cada rama introduce una modulación de fase de igual magnitud pero de sentido opuesto con lo cual se obtiene una suma (interferómetro) diferencial. Por esto se llama modulador interferométrico.

El uso de LiNbO<sub>3</sub> como sustrato produce una atenuación de 0.5dB por cada interfaz de unión con la fibra óptica y una pérdida de propagación de 0.5dB/cm. Esto implica que cada componente modulador puede introducir una atenuación total de 2dB. La tecnología de AsGa está aún a muchos años de laboratorio respecto del LiNbO<sub>3</sub> pero tiene la ventaja de poder integrar circuitos electrónicos en el mismo sustrato. El LiNbO<sub>3</sub> requiere altos voltajes y por ello pone un límite a la miniaturización de componentes. En la misma figura 1.53 se muestra en acoplador direccional. En ausencia de tensión aplicada la luz cambia de fibra óptica periódicamente. Con voltaje aplicado el índice de refracción varía y se modifica la velocidad de propagación y la periodicidad del acoplamiento entre guías.

De esta forma la luz que ingresa por una guía puede pasar a la otra o salir por la misma al final del componente que trabaja como un switch óptico. Esta misma estructura se puede usar como modulador digital a la salida de un Láser; como aislador; como generador de pulsos de luz a partir de un emisor que trabaja en onda continua; etc.

### 1.16.5 Fenómeno termoelectrico

Descubierto por J.Peltier en 1834, encontró que la unión de dos metales por la que pasa una corriente se calienta o se enfría de acuerdo al sentido de ésta. Por ejemplo, en el bismuto-cobre la temperatura disminuye si la corriente fluye desde el Bi al Cu. La eficiencia de estos metales era muy baja hasta que aparecieron los semiconductores como materiales dopantes. Con materiales como el Teluro de Bismuto se construyen uniones PN eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo.

El enfriador Peltier consiste en un evaporador, un compresor y un condensador. La celda aporta energía a los portadores en el condensador (placa conductora a enfriar cercana al Láser) mientras el semiconductor (Teluro-BismutoSelenio-Antimonio) trabaja de compresor.

La otra placa conductora se une al encapsulado del conjunto y actúa de condensador o disipador. Cada módulo consiste en varias termocuplas; en cada una de ellas los portadores toman energía en la zona a enfriar y son orientados por la polarización exterior hasta el disipador. La polarización depende de la temperatura detectada en el Láser por el termistor.

### 1.16.6 Rejillas de la Fibra

Una nueva tecnología existente que tiene un enorme potencial para tener un impacto en las comunicaciones de fibra óptica es la fibra inducida por los rayos UV con rejillas. Las rejillas se crean directamente en el núcleo del  $GeO_2$  dopado de fibras por interferir dos rayos UV de un lado después de que el revestimiento se ha eliminado. La luz ultravioleta, por lo general de un Krf-láser, de colorantes de bombeo que operan en 240nm, es absorbido por los defectos en el núcleo del Germanio, y los resulta en un índice periódico de la variación de la reflexión es un reflector Bragg. El ancho de banda del Bragg  $\lambda_B$  esta dado por:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda = \lambda_{UV} / 2 \sin(\alpha) \quad \text{Ec. 140}$$

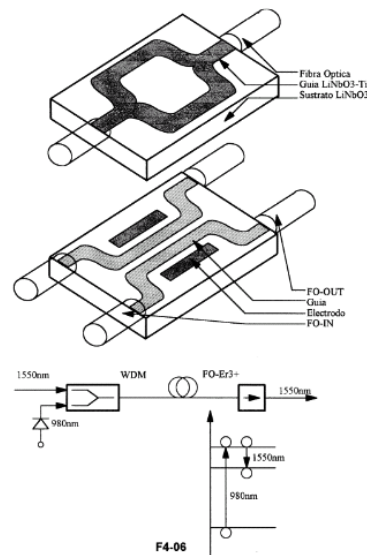
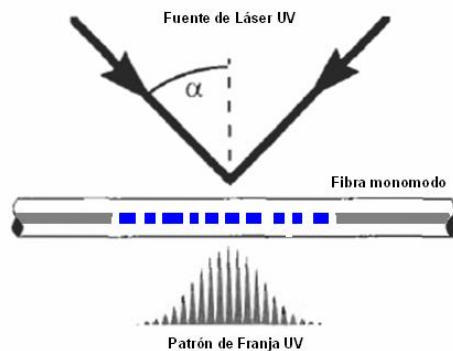


Figura 1.54 Componentes de óptica integrada.

Donde  $\lambda$  es el período de la variación del índice de refracción y  $\alpha$  es el ángulo entre los rayos UV. Debido a que la geometría de la fibra está muy bien controlada, la longitud de onda de Bragg es determinada con precisión por  $\alpha$  y  $\lambda_{UV}$ . El cambio del índice sigue siendo el mismo después de que la luz UV se ha eliminado. Los espectros de transmisión y la reflexión de un rallado típico se muestran en la figura 1.56, revelando por qué son tan útiles. El espectro de transmisión que se muestra en la figura 1.56(a) muestra una transmisión efectiva de la luz al 100%, excepto en la longitud de onda de Bragg que es 1557.2nm. El espectro de reflexión mostrado en la figura 1.56(b) deja claro que la luz en la longitud de onda de Bragg se refleja hacia abajo de la fibra. Estos reflectores integrados pueden sustituir muchos de los componentes ópticos en transmisores, receptores, filtros y amplificadores.

Las primeras fibras con rejillas fueron hechas usando el patrón de onda permanente formado por contrarrestar la propagación de la luz de un láser de iones. La absorción de dos fotones de la luz visible intensa causa la variación del índice con el plazo fijado por la longitud de onda del láser. La invención de la escritura de lado con la luz UV en 1989 ha permitido convenientemente variar la longitud de onda de Bragg totalmente en las ventanas de las telecomunicaciones. Sin embargo, la fotosensibilidad de transmisión de fibra ordinaria era demasiado débil para escribir las rejillas de fuerte interés para las aplicaciones. La invención de un proceso de sensibilización denominada de carga de hidrógeno en 1993 hizo posible escribir rejillas en fibra estándar permitiendo un gran

número de aplicaciones prácticas. En este proceso la fibra es expuesta a presiones altas (20 a 750 Atmósferas), hidrógeno o deuterio a temperaturas moderadas (21 a 75°C) hasta por una semana. La carga de hidrogena hace que cualquier fibra de Germanio dopada se controlable fotosensible. Sin la carga de  $H_2$  los cambios en el índice que se observan son del orden de  $10^{-2}$  con carga de  $H_2$ .



**Figura 1.55** Forma de hacer una rejilla en un lado de la fibra.

El mecanismo para los cambios en el índice de refracción son causados por intensas irradiaciones de UV es una combinación de de excitación electrónica, expansión compactación debido a cambios en el defecto de la población de sílice y el estrés debido a los efectos de la calefacción central y no de la vaina. El candidato más probable a la electrónica de las transiciones son los defectos de GeO.

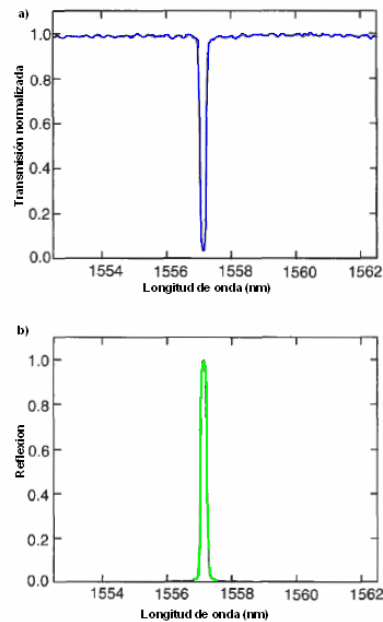
Estudios en condiciones menos extremas de calor y exposición a los rayos UV proporcionar algunas pistas sobre los mecanismos microscópicos de fotosensibilidad. En los experimentos, los cambios en el vidrio se monitorean con Espectroscopia Raman

### 1.16.6.1 Aplicaciones de las rejillas en la Fibra

#### 1.16.6.1.1 Estabilización de la longitud de onda del láser

Incluso si una reja no se utilice como parte de las ganancias de una cavidad láser, la exactitud de la longitud de onda de una rejilla se puede utilizar como ventaja para estabilizar las longitudes de onda de los láseres semiconductores. Con rejillas de 1% de reflectividad colocados directamente en la coleta del diodo láser de 980nm que han producido una mejora en la salida del espectro por medio de la coherencia de colapso. Estos láseres se utilizan para el bombeo de bandas de 980nm de Er, que es tan solo de 10 a 15nm de ancho, y sin rejilla de estabilización que son muy sensibles a las reflexiones a causa de su baja faceta de reflectividad de salida. La rejilla reduce la potencia de salida

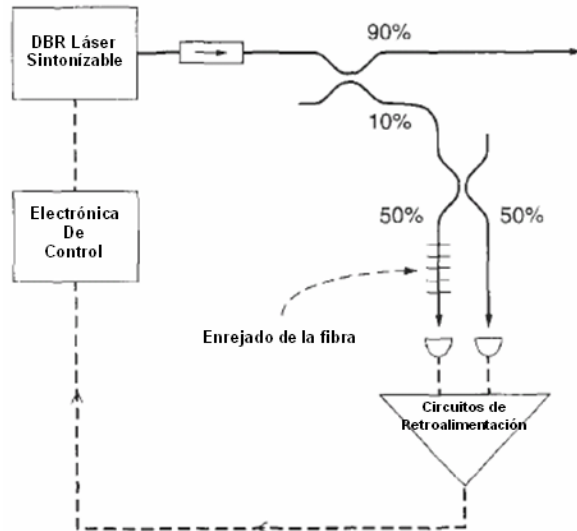
del láser, pero la retroalimentación óptica de la rejilla reduce el umbral óptico del láser de una compensación parcial. Esta retroalimentación de la rejilla hace que el láser emita una longitud de onda entre la longitud de onda de Bragg y el modo más cercano de los chips láser. Debido a que los modos están espaciados a  $2\text{\AA}$ , la salida solo cambia en  $2\text{\AA}$  en un rango de temperatura de  $50^\circ\text{C}$ , que potencialmente elimina la necesidad de un enfriador termoeléctrico para el láser.



**Figura 1.56** Espectros de transmisión y reflexión de una fuerza moderada de rejillas en fibra.

Esta rejilla estabilizada láser fue la primera aplicación comercial de la fibra. Utilizando un enrejado sencillo con el 64% de reflectividad en una de las ramas de fibras fundidas de 4X4 acoplada, que fueron capaces de bloquear la salida de longitudes de onda de los tres láseres a la longitud de onda de Bragg de la rejilla, dejando sólo el 6% de la potencia en la emisión espontánea amplificada (ASE) pico.

Un esquema para estabilización activa de la longitud de onda de un reflector láser sintonizable distribuido (DBR), con un enrejado se puede observar en la figura 1.57.



**Figura 1.57** Técnica activamente para la estabilización de la longitud de onda sintonizable de un reflector de Bragg distribuido (DBR) de láser con una rejilla.

En esencia, la rejilla se utiliza como un detector nulo. Una pequeña parte de la señal se capta fuera de la longitud de onda y en comparación con la longitud de onda de Bragg de la rejilla de la fibra.

Si la longitud de onda del láser ha alejado de la longitud de onda de la meta, la luz pasa a través del reflector Bragg y activa un circuito de retroalimentación que sintoniza el láser. La estabilidad de la temperatura de la rejilla es un activo en la aplicación, pero si una mayor estabilidad de temperatura se desea la rejilla puede ser fácilmente estabilizada.

### 1.16.7 Filtros y Demultiplexores

Otra aplicación que se aprovecha de la exactitud de la longitud de onda de las rejillas de Bragg de fibra es su uso como filtros especialmente en sistemas WDM, donde el espaciado entre canales puede ser tan pequeño como 4Å. Un demultiplexor de cuatro canales puede hacerse usando un separador de fibra y rejillas de 1X4.

Cada rama del separador tiene dos rejillas que están diseñados para reflejar todos los canales excepto el canal de señal deseada. Un aislador es generalmente ya presente en la trayectoria de la señal y sirve para eliminar longitudes de onda reflejadas. Un delta de fibra alta se utiliza para reducir al mínimo los efectos nocivos de la radiación sobre el modo de la pérdida de longitud de onda corta de las rejillas laterales. Las características



de transmisión de los dispositivos muestran un pasa banda muy plano y un rechazo de canal superior. La inserción de pérdida de este robusto dispositivo de fibra es de 7.4dB, con la única de las grandes pérdidas procedentes del separador. Además, el dispositivo es insensible a la polarización.

Filtros más complicados que se aprovechan de la limpieza del espectro de reflexión de la fibra rallada también se han realizado. Un filtro de banda estrecha puede hacerse haciendo rejillas idénticas en cada ramas de 3dB el acoplador de cuatro puertos de fibra fundida. Longitudes de onda no deseadas en la banda ancha en el puerto de entrada 1 pasaría a través de la reja y se perdería en los puertos 3 y 4. Sólo la longitud de onda deseada se refleja en el rallado y aparece en la salida. Esta característica se puede convertir en un pasa banda si el rejillas se hacen en un interferómetro Mach-Zehnder.

### **1.16.8 Técnicas de compensación de dispersión implementadas en el transmisor**

Se conocen también como técnicas de precompensación. Se basa en actuar sobre las características del transmisor para generar pulsos antes de la transmisión por la fibra de características especiales que lo hacen más robustos frente a la acción de la dispersión cromática.

#### **1.16.8.1 Prechirping**

Una de las técnicas de precompensación más conocidas es el prechirping, el cual se trata de generar un pulso a la salida del transmisor sujeto a un chirp (Un sistema de frecuencia modulada pulsada. Al principio de cada pulso transmitido, la frecuencia de la portadora se modula en frecuencia, causando un ensanchado adicional de la portadora) de frecuencia de características idénticas en magnitud, pero de signo contrario al impuesto por la fibra.

Es conocido que el ensanchamiento temporal que experimenta un pulso gaussiano debido a la dispersión de primer orden al propagarse por una fibra monomodo de longitud  $L$ .

#### **1.16.8.2 Filtros ópticos lineales**

Mediante el empleo de filtros ópticos se pretende intercalar dispositivos pasivos en un enlace de comunicaciones que, dentro de la banda de transmisión o reflexión se comporten como filtros de fase, introduciendo una dispersión de valor igual y signo contrario al valor acumulado por el enlace de la fibra.

La alternativa de mayor interés para la implementación de compensadores de dispersión pasiva y lineal, la constituye la red de difracción de Bragg con chirp lineal.

### **1.16.9 Control y gestión de redes ópticas WDM**

La gestión de una red es una de las funciones más importantes que se emplean en una red óptica con tecnología WDM (multiplexación por longitud de onda). Tiene importancia conocer las funciones y dispositivos con los que administraremos dicha red.

A la hora de gestionar la red debemos de llevar a cabo varios tipos de gestiones como son la gestión de funcionamiento, de averías, de conexión, de adaptación, de seguridad y de estimaciones. También debemos de tener en cuenta el método utilizado para la gestión de una red que podrá ser centralizado o descentralizado, siendo más eficaz y rápido el descentralizado ya que son más de un elemento, comunicados entre sí, los que se encargan de controlar la red al completo.

Los EMS (servicio de correo electrónico express)son sistemas de gestión que gestionan un solo elemento y se comunican con el resto de EMS existentes en la red. Hay veces en los que nos interesa poder gestionar varios elementos a la vez o tener una visión de la red al completo por lo que tendremos que establecer comunicación con el sistema de gestión (NMS) o sistema de apoyo a las operaciones (OSS). Los sistemas de gestión, tanto de la red, como de los elementos en particular, se basan en una programación Orientada a Objetos, lo cual hace que la herencia tome un papel importante en este tipo de redes.

Uno de los protocolos más utilizados en una red óptica en las últimas décadas es gestión de redes de telecomunicaciones (TMN, Telecommunications Management Network), el cual definió una jerarquía de sistemas de gestión para modelar la información que se manejará así como los protocolos utilizados para establecer la comunicación entre maestro y esclavo.

La capa óptica proporciona caminos ópticos a otras capas tales como SONET, IP, o ATM. La capa óptica puede ser vista como una capa servidor, y como la capa más alta que hace uso de los servicios proporcionados por la capa óptica cliente por lo que necesitamos especificar claramente un servicio interfaz entre la capa óptica y sus capas clientes.

### **1.16.10 La capa óptica su interoperabilidad y seguridad**

Con el objetivo de definir funciones de control y proveer de límites convenientes entre diferentes tipos de equipos, es de gran utilidad subdividir la capa óptica en distintas subcapas. Éstas son:

- Capa de Canal óptico (OCh): Encaminamiento extremo a extremo.

- Capa de Sección de Multiplexación Óptica (OMS): Cada enlace entre OLTs o OADMs es una sección de multiplexación óptica y transporta múltiples longitudes de onda.
- Capa de Sección de Transmisión Óptica (OTS): Una sección de transmisión es una porción o segmento de un enlace entre dos amplificadores ópticos.

La estandarización se hace necesaria para reducir la dependencia de estos proveedores con un solo vendedor y para abaratar los costes de implantación de la red. En el caso de WDM, lograr la interoperabilidad en el nivel óptico es particularmente difícil por el hecho de que la interfaz es una interfaz analógica bastante compleja, más que una simple interfaz digital. Además debería haber acuerdo relativo a una gran cantidad de parámetros (BER, Tasa de bits). Una solución más práctica para es usar transpondedores o regeneradores para interconectar subredes ópticas dispares. Mientras esta alternativa puede resultar en un incremento del coste en equipos, provee límites claros y aislados entre subredes ópticas, haciendo más fácil localizar e identificar averías.

En cuanto a los sistemas de seguridad, para impedir radiaciones peligrosas, existen mecanismos preventivos y reactivos. Los primeros representan límites a la potencia máxima en los sistemas de comunicaciones ópticas definiendo clases asociadas a cada sistema según la peligrosidad de las posibles radiaciones. Por su parte, los mecanismos reactivos actúan una vez producido un fallo o corte de fibra.

Así, cuando un nodo detecta pérdida de luz, apaga sus láseres y amplificadores automáticamente. El otro nodo detectará una pérdida de luz y hará lo propio apagando su láser. Para reanudar el sistema de comunicaciones, se puede hacer manualmente o automáticamente (protocolo OFC).

#### **1.16.11 Gestión del rendimiento y de Fallas en WDM**

La gestión del rendimiento hace referencia a la calidad del servicio de la red y permite ejecutar acciones concretas. La gestión de fallos se encarga de detectar y alertar sobre problemas concretos en la red, desembocando en la generación de alarmas.

La importancia de la transparencia la entendemos como la transparencia de una red como la flexibilidad que esta presenta en términos de naturaleza de la señal que soporta (analógica o digital), bit rates bajo los que puede funcionar y protocolos implementables. Una red 100% transparente admitirá cualquier configuración.

La medida del BER es un indicador clave del rendimiento de la red. La opción más empleada para su medición es la de emplear bytes de paridad adicionales que nos dan una medida directa.

El camino óptico en las redes ópticas es necesario emplear un identificador de canal que nos permita realizar labores de identificación, verificación y gestión sobre la misma. Recibe el nombre de Optical Path Trace, y se desglosa en tres tipos en función de la configuración de la red: Optical Channel Path Trace en redes punto a punto, Optical Channel-Section Trace entre parejas de regeneradores de señal y Optical Channel-Transparent Section Trace dentro de subredes ópticas.

La gestión de alarmas es cuando se produce un fallo en una red los nodos desconocen de qué se trata y lanzan una alarma por cada posible cause de fallo. Para evitar esta “saturación de alarmas” se emplea un mecanismo de supresión, el cual consigue localizar el error mediante el empleo de dos señales (FDI y BDI). El primer nodo que detecta el fallo lanza un time out (Condición de Defecto), verifica si se trata de un fallo y en caso positivo lanza las alarmas. Entonces lanza una señal FDI hacia los nodos de su derecha y estos neutralizan sus alarmas. De forma análoga sólo que hacia los nodos de la izquierda se lanza una señal BDI. El resultado es que se llega a una sola alarma en la red.

Las redes de comunicación de datos gestionan de elementos del sistema llevada a cabo por el EMS requiere de una red propia y dedicada. Existen tres configuraciones básicas para ello: emplear una red externa a la capa óptica y fuera de banda, emplear un OSC con un canal dedicado o emplear un canal óptico dentro de banda que añade overhead a la capa óptica.

El empleo de overheads es necesario para el soporte de trazas del camino óptico, el indicador de defecto y la medida del BER. Existen 4 tipos básicos: tono piloto y OSC, que se emplean en subredes ópticas limitadas por generadores y el Rate Preserving y el Digital Wrapper, que se emplea en redes todo ópticas conectadas por regeneradores.

La gestión de la configuración de una red WDM se puede dividir en tres tareas básicas: Gestión del equipamiento de la red, del conexionado y adaptación entre subredes.

La gestión del equipamiento tiene como objetivo llevar un control sobre todos los componentes físicos y lógicos (por ejemplo las longitudes de onda) que forman parte del sistema. Además, se pueden enunciar tres consideraciones de diseño de la red que afectan directamente a la gestión del equipamiento:

Sistema modular, flexible en cuanto a topología y la repercusión de los tipos de dispositivos de la red sobre un posible inventario de seguridad (por ejemplo usar dispositivos multi-longitud de onda o uno para cada longitud de onda).

La gestión del conexionado de cualquier red óptica caracterizada por una topología física, que se podrá describir como una red conmutada mediante conexiones entre nodos, tratará sobre la configuración de estas conexiones, su mantenimiento y la eliminación de alguna cuando ya no sea necesaria en el sistema.

Existen dos formas de abordar esta gestión: De forma centralizada (un nodo central conoce todos los detalles de la red) o de forma distribuida (similar a las redes IP cableadas). Además de las conexiones internas de la red óptica, habrá que tratar la conexión con redes externas que en general no serán ópticas y donde se distinguen cuatro modelos de interacción entre redes: Overlay (Plano de control independiente para capa óptica y capa externa del cliente), Overlay+ (se añade un control externo entre capas con información sobre topología), Peer (Plano de control único) y Modelo aumentado (Hay un intercambio de información entre planos diferenciados sobre topología, enrutado).

La adaptación entre redes trata la adecuación de las señales que provienen del cliente a la capa óptica de nuestra red WDM. Algunas funciones que se incluyen aquí son: Conversión de la señal a la longitud de onda y nivel de potencia óptica adecuados a la capa óptica destino, adición y extracción de cabeceras necesarias en la gestión óptica.

Finalmente, a la hora de abordar una red WDM se pueden dar tres casos de adaptación de la señal del cliente: Sin conversión (la señal ya se encuentra en la longitud de onda adecuada), con conversión (La señal recibida no es compatible con el sistema y se debe realizar una conversión optoelectro-óptica) y multiplexación (Se reciben varias señales de baja tasa de transmisión y se realiza una multiplexación TDM previa a la WDM).

## **CAPÍTULO 2 PROTECCIÓN DE ANILLOS DE FIBRA ÓPTICA Y APLICACIONES DE REDES ÓPTICAS**

### **2.1 Protección de anillos de fibra óptica**

La supervivencia de los redes de fibra óptica es la capacidad para enfrentar y recuperarse de las fallas, es una consideración crítica en la arquitectura de la red.

Las funciones de protección y restauración proporcionadas por SONET/SDH son críticas para la supervivencia de las redes de transporte actual basadas en TDM.

Hay muchos tipos de fallas que pueden ocurrir en una red óptica, pero hay dos que son de particular importancia, las fallas de equipo y las averías en la ruta. Las fallas en el equipo son fallas primarias de algún componente individual, como un láser, pero son mucho más las averías en la ruta. En el equipo modulador, normalmente no hay puntos de falla simples, si un componente como un láser falla, la protección automática de conmutación (APS, por sus siglas en inglés Automatic Protection Switching), es usada para reestablecer el servicio.

También pero con menos frecuencia, las averías en la ruta (también llamados cortes en la fibra), pueden tener un efecto mucho más devastador. El prototipo de la falla por cortes en la fibra es un uso errante de una retroexcavadora que daña físicamente la fibra, otras causas pueden ser un desastre natural (inundaciones, temblores, etc.) o un descarrilamiento de trenes. Normalmente todas las fibras en un cable serán afectadas. Inicialmente el estiramiento de la fibra podría cuasar un periodo de errores transitorios. La ruptura de fibras se puede propagar en unos cuantos segundos, esto puede causar confusión, si el proceso de recuperación no es capaz de reaccionar en unos cuantos milisegundos antes de que la magnitud de la falla se conozca.

Los incidentes de la ruptura de la fibra tienen una variedad muy amplia. Las áreas rurales tienen menos problemas, al igual que los cables que corren dentro de conductos de hormigón.

La reparación física después de la ruptura de la fibra requiere del envío de un equipo de reparación al sitio, el cual puede ser lejano, y luego hacer el empalme en la ruptura de las fibras. El tiempo nominal para hacer esto está en el orden de cuatro horas, pero esto puede ser mucho más tardado, si es una falla masiva. Para muchos servicios, sin embargo, la disponibilidad general debe ser en el orden de 99.999% o mejor. Por lo tanto, se deben proporcionar mecanismos de supervivencia adicionales. Hay muchos mecanismos posibles, algunos de los cuales son apropiados para la restauración de los servicios y algunos que deben ser residentes en la capa de transporte.

## 2.2 Protección y restauración

Protección y restauración son usados en el proceso de recuperación de una falla. En general, protección históricamente se refiere a los métodos deterministas que son muy rápidos, mientras que restauración se refiere a métodos más complejos cuyo comportamiento es preciso determinar en el momento de la falla, que puede ser algo más lento que la protección. Sin embargo IP ha cambiado la forma en que las redes de transporte son controladas y rápidamente han desaparecido esta diferencia.

Cualquier método para la recuperación de una ruptura de fibra requiere cuatro capacidades principales:

1. Mecanismos de detección de fallas para saber cuando hay un problema y que conexiones han fallado.
2. La capacidad de reemplazar la capacidad con falla.
3. Switchear para dar acceso a las conexiones con fallas.
4. control lógico para desencadenar la recuperación y reenrutar las conexiones fallidas.

Además, muchos métodos de recuperación también requerirán un mecanismo de localización de fallas para determinar qué vínculos deben evitarse en el proceso de reenrutamiento.

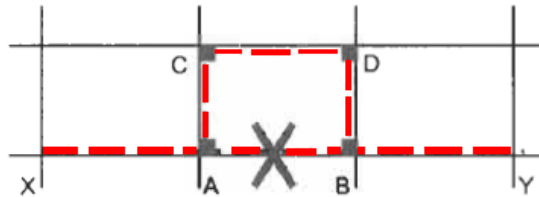


Figura 2.1 Capacidades básicas de recuperación.

En la figura 2.1 una conexión enrutada X-A-B-Y tiene una falla en el enlace A-B. La detección de fallos podría ser hecho en el nivel de enlace en A o B o podría ser hecho al final de la conexión (X o Y). Para restaurara la conexión la capacidad disponible de de alguna ruta disponible por enésima de la falla (A-C-D-B) es necesaria. Para reestablecer la conexión, A y B necesitan conmutarse a la nueva trayectoria X-A-C-D-B-Y para que pueda reestablecerse. Donde se necesita esta capacidad de enrutamiento depende de la ubicación de de la capacidad extra. Finalmente, debe de haber una capacidad de control. Esto podría esta ubicado en A ó B, al final de la conexión o en algunos sistemas de gestión de red conectados en A o B por vínculos de datos fiables.

Un criterio clave para evaluar los métodos de recuperación es la cantidad de capacidad necesaria como se muestra en la figura 2.2. La topología de red pone un límite inferior

en este el grado del nodo es el numero de enlaces que inciden en el mismo. En la figura 2.2, en cada caso se asume que el enlace entre A y Z falla, resultando en la necesidad de reenrutar el tráfico de A hacia Z. En el caso del nodo de 2<sup>do</sup> grado solo hay una trayectoria de restauración posible, que es ir hacia la derecha de A hacia Z. En este caso para restaurar todo el trafico de A hacia Z debe de ser del 100% eso es la mayor cantidad de la capacidad en cada enlace ya que hay trafico de A hacia Z para restablecerlo. En el segundo caso de la figura 2.2, hay dos trayectorias de restauración potenciales de A hacia Z. Por lo tanto, si hay un 50% de funcionalidad en cada trayectoria de restauración. Todo el tráfico puede ser reestablecido.

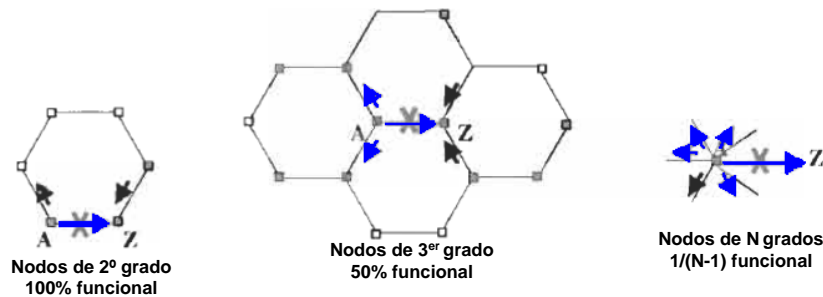


Figura 2.2 Efecto de la topología en la capacidad de restauración.

### 2.2.1 Métodos de recuperación

La recuperación del servicio puede hacerse de muchas maneras, muchas de ellas son propiedad del vendedor o del operador de red. Esto también puede hacerse en diferentes niveles, servicio, SONET (Red Óptica Sincronía), u óptica. Cuando se confronta con un método nuevo, es útil determinar la forma en que proporciona capacidades básicas.

- Detección de fallas, es la capacidad de localizar las fallas antes de que el proceso de recuperación comience. Sin la detección de fallas el enlace debe ser reenrutado a una trayectoria punto a punto.
- Capacidad de reserva, es la capacidad para reestablecer los enlaces dedicados o individuales, o si es compartido. Si cada enlace a reestablecer tiene capacidad de reestablecimiento dedicada, el proceso de reestablecimiento puede ser muy rápido y el control lógico puede ser simple, de tal modo que la capacidad de restauración es probable que sea necesaria.
- Conmutación., son enlaces reestablecidos individualmente (normalmente llamados trayectoria de restauración), o son enlaces reestablecidos en masa.
- Control lógico, es la red distribuida en dominios múltiples de restauración con control de recuperación independiente es cada dominio o es un control global. El



tiempo de recuperación y la complejidad del proceso de control usualmente incrementan al menos linealmente con el tamaño de la red.

### 2.2.1.1 Método de recuperación SONET/SDH

Los métodos de recuperación de la capa óptica en este punto son en su mayoría propiedad y en bastante medida derivadas del estándar SONET/SDH.

Las técnicas SONET que no son relevantes en la capa óptica, pero en la tabla 2.1 se resumen los principales mecanismos de recuperación SONET en términos de capacidad.

	Localización de fallas necesaria	Capacidad de recuperación dedicada	Típica localización de la función de conmutación	Capacidad de recuperación diversa	Enlace o trayectoria	Múltiples dominios de recuperación	Control dentro de cada dominio	Preplaneado o dinámico
M:N y 1+1 APS	No	Si	Ubicuo	No	Trayectoria	Si	Distribuido	Preplaneado
Anillos con trayectoria de conmutación	No	Posible	Tarjeta de línea ADM	Si	Trayectoria	Si	Distribuido	Preplaneado
Anillos con línea de conmutación	Si	No	ADM	Si	Enlace	Si	Distribuido	Preplaneado
Malla	No	Posible	DCS	Si	Trayectoria	posiblemente	Centralizado o Distribuido	Cualquiera

Tabal 2.1 Métodos de recuperación SONET

1:1, M:N y 1 + 1 son configuraciones de conmutación de protección automática que son normalmente usadas para manejar las tarjetas de línea, el enlace y las fallas del láser. Hay usos especiales para proteger las conexión entre sitios, cuando se usa esta protección, el servicio y la capacidad de protección son normalmente transportadas en el mismo cable.

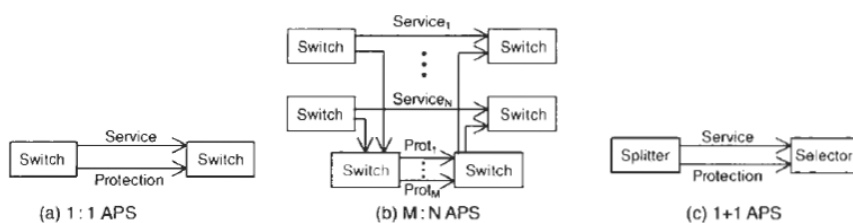


Figura 2.3 Opciones de la conmutación automática de protección (APS Automatic protection switching).

Los métodos que son ilustrados en la figura 2.3, en cada caso, el primero indica el numero de canales de protección, el segundo indica el número de canales de servicio

(trabajando), en la figura 2.3b es una generalización de la figura 2.3a donde hay M canales de protección para N canales de servicio ( $M < N$ ). Esto permite alguno de los M canales de servicio para ser reestablecidos simultáneamente, 1:N ha sido usado mucho mas extensamente que las configuraciones  $M > 1$ . En la figura 2.3c dos copias de la señal son enviadas y un selector en el receptor selecciona la mejor.

Señal eléctrica	Portadora óptica	Velocidad binaria (Mbps)	Equivalencia SDH
STS-1	OC-1	51,84	STM-0
STS-3	OC-3	155,52	STM-1
STS-9	OC-9	466,56	-
STS-12	OC-12	622,08	STM-4
STS-18	OC-18	933,12	-
STS-24	OC-24	1244,16	-
STS-36	OC-36	1866,24	-
STS-48	OC-48	2488,32	STM-16
STS-96	OC-96	4976,64	-
STS-192	OC-192	9953,28	STM-64
STS-256	OC-256	13271,04	-
STS-384	OC-384	19906,56	-
STS-768	OC-768	39813,12	STM-256
STS-1536	OC-1536	79626,24	-
STS-3072	OC-3072	159252,48	-

**Tabla 2.2** Señales y velocidades binarias SONET

En SONET 1:1 y 1:N APS usan la banda de señalización (los bits principales K1 K2 en SONET) para la coordinación. 1 + 1 APS no requiere ninguna señalización, lo cual es una simplificación. El precio que se paga por esto es el constante uso del canal de protección, en otras arquitecturas es posible agregar conexiones de tráfico extra en este canal. Esto puede ser usados para servicios de baja prioridad o podrían ser parte de la restauración de la capacidad para las copias de seguridad de restauración que en la caso de APS es insuficiente por si sola. Las configuraciones 1:1, 1:N y 1 + 1 han sido estandarizadas para SDH y SONET.

La configuración de anillos con trayectoria de conmutación es llamada "SDH conexión de subred de protección" por el ITU. Las diferencias entre las configuraciones 1:1 y 1+1 se describen en dos aspectos: 1) la capacidad de la protección es normalmente enrutada diversamente de la conexión del servicio y 2) esta opera en la capa de la trayectoria (punto a punto). La figura 2.4 nos da un ejemplo de la forma mas común del un anillos unidireccional con conmutación de ruta (UPSR). La figura 2.4a muestra la estructura de una red subyacente, cuatro nodos conectados por OC- 48 (portadora óptica de

2488Mbps) cada OC-48 es representado por un par de líneas sombreadas. Esto representa las dos trayectorias de transmisión unidireccionales del OC-48, con el exterior que va en sentido horario y el interior en sentido antihorario. La figura 2.4b muestra una velocidad menor (OC-3 o OC-12) UPSR entre los nodos 1 y 3 que esta enrutado en el OC-48. Ambas direcciones 1-3 y 3-1 son enrutadas en sentido horario. Así que las dos trayectorias son enrutadas por separado. En los nodos 1 y 3 hay una trayectoria para la terminación de los equipos UPSR. En la figura 2.4c se muestra que si la trayectoria del servicio del nodo 4 al 1 falla la dirección de los nodos 3-1 del UPSR es reenrutada al contrario en el bucle, esto restauraría la conexión. La conmutación se hace en los nodos 1 y 3, sin la participación de los demás nodos. Solo la dirección con falla (3-1) es reenrutada.

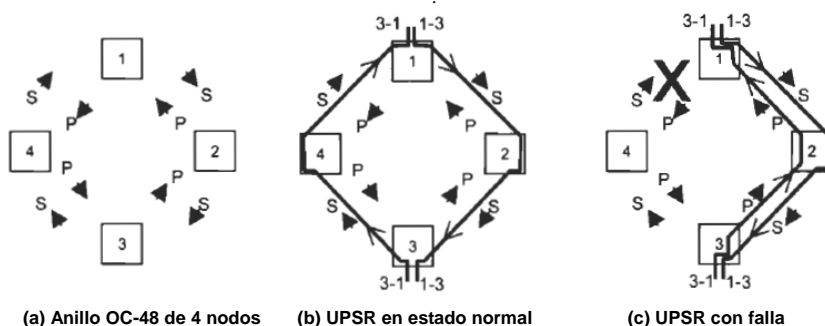


Figura 2.4 Anillo con trayectoria conmutada (ejemplo basado en OC-48 UPSR).

Puede haber múltiples UPSR entre los nodos en el mismo conjunto de OC-48. La conexión de redes es posible de manera más general, como se indica en la figura 2.5. Aquí la red SONET podría estar compuesta por una mezcla de anillos SONET y estructuras lineales. La protección por conmutación es hecha al final de la trayectoria.

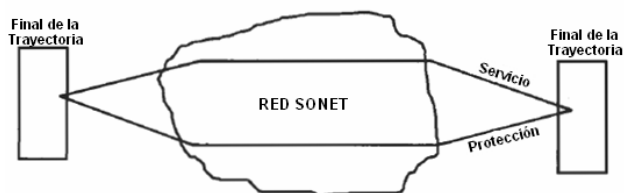


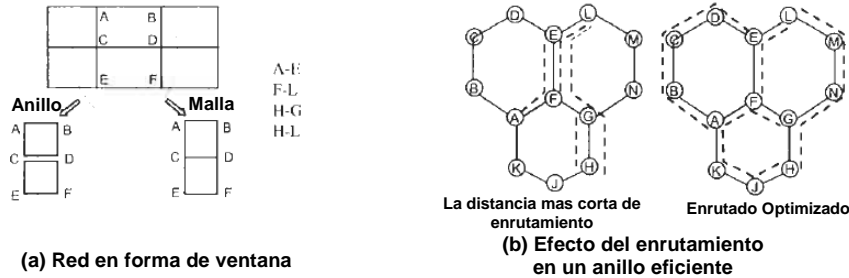
Figura 2.5 Anillo genérico con trayectoria de conmutación.

Todos los mecanismos de recuperación hasta ahora exigen que la red sea dividida en dominios de recuperación con topologías en anillos o lineales.

**2.2.1.2 Comparación entre Anillo y Malla**

Los estándares ITU y SONET especifican que el reestablecimiento debe ser completado en menos de 50ms en ambos casos y 200ms en un alto limite alcanzable para el reestablecimiento del anillo. Hay nuevos métodos para la restauración de una malla propuestos para la capa óptica, y también para redes basadas en IP, que pueden ser competitivos, pero todavía estos son resultados teóricos. Los algoritmos de maya centralizada pueden tomar un minuto o más para poder recuperarse. Los anillos son requeridos por tener una capacidad de unificación en cada uno de sus enlaces. Esto puede causar dificultades como se observa en la figura 2.6. En la figura 2.6a la estructura común de las redes interurbanas, un conjunto de rutas de fibra de Norte a Sur y de Este a Oeste. Si hay una cantidad igual aproximada de demanda en cada uno de los enlaces, entonces es la misma cantidad de capacidad que se necesita en la parte superior (A-B-C-D) y en la inferior (C-D-E-F). pero esto lleva a duplicar la capacidad en el medio de la ruta.

La figura 2.6b muestra otro ejemplo de las complejidades introducidas por la igualdad de limitaciones en la capacidad. Aquí, cada línea discontinua muestra la ruta de algunas conexiones. Cada una de las cuales requiere más de 50% de la capacidad del anillo.



**Figura 2.6** Ejemplos de topología en anillo.

Las dos redes difieren solo en como la demanda es enrutada. Si la demanda es enrutada en la trayectoria mas corta (figura 2.6b) el anillo inferior (A-F-G-H-J-K) requiere de dos anillos debido a la demanda entre G y H. los dos anillos superiores requieren de un total de tres anillos para debido a la demanda entre E y F. Así que un total de cinco anillos es necesario. Si la demandas son enrutadas como u grupo con mira a reducir al mínimo el numerote anillos requeridos, solo tres anillos son requeridos. La complejidad de los algoritmos suficiente para alcanzar el enrutamiento necesario para las conexiones futuras punto a punto o la habilidad de continuidad de hacer masivos reordenamientos para preservar la optimización así como las demandas aumentan que en la actualidad no están disponibles.

## 2.3 Sincronismo

El Plan de distribución del sincronismo en una red parte desde los relojes primarios y mediante enlaces o anillos PDH/SDH se propaga hacia el exterior. Sin embargo, por razones de redundancia, se requieren relojes distribuidos y la reconfiguración en caso de corte. El sincronismo toma en cuenta:

- El sincronismo dentro de una oficina de comunicaciones.
- La programación del sincronismo de los equipos de transmisión.
- La propagación de la temporización y reconfiguración de la red.

### 2.3.1 Relojes involucrados en una red de sincronismo definiciones según G.810

Slip es la repetición o pérdida de un bloque de bits en una red síncrona o plesícrona debido a discrepancias en las velocidades de lectura y escritura en el buffer.

Modo síncrono es el modo donde todos los relojes de la red están referidos a un mismo PRS.

Modo pseudo síncrono es el modo donde todos los relojes tienen una precisión de larga duración según un G.811, no todos los relojes en la red tendrán temporización traceable al mismo PRS.

SDH Equipment Clock (SEC) es el reloj de un elemento de red SDH

Master clock es el que genera una señal de frecuencia precisa para el control de otros generadores. Típicamente es un arreglo de PRS.

Reloj (Fuente) de Referencia Primaria PRS o PRC es el estándar de frecuencia de referencia que provee una referencia de frecuencia según G.811.

Reloj esclavo es el reloj cuya salida de reloj está enganchada a una referencia de temporización proveniente de un reloj de mayor calidad SASE (Standalone Synch. Equipment) es la implementación de un SSU que incorpora sus propias funciones de administración. Típicamente un PRS/PRC.

SSU (Synch. Supply Unit) es la función lógica de selección de frecuencia de referencia, procesamiento y distribución con las características dadas en G.812. Otros términos similares son de uso común, tales como BITS, NSU, etc.

Modo “free run” o libre es el modo de operación de reloj bajo el cual no está, ni ha estado sujeto a ninguna referencia externa de temporización.

Modo “holdover” es el modo de operación de reloj en la cual ha perdido la referencia de control. Termina cuando la referencia es restablecida.

Modo “locked” o enganchado es el modo de operación en la cual el reloj esta sujeto al control de una referencia externa, en cuyo caso la estabilidad de largo plazo de la salida del reloj es la misma que la de la señal de control Ageing o envejecimiento (el cambio sistemático en la frecuencia de un oscilador en el tiempo).

Precision de frecuencia es la máxima magnitud de la desviación fraccional de frecuencia en un periodo de tiempo especificado. Termino utilizado para especificar el comportamiento de un oscilador en modo libre o “free run” durante su tiempo de vida.

Drift de frecuencia es velocidad de variación de la desviación fraccional de frecuencia respecto a un valor nominal especificado, causado por envejecimiento y otros efectos externos (temperatura, humedad, etc.).

Estabilidad de frecuencia es el cambio de frecuencia espontáneo o causado por factores externos en un periodo de tiempo especificado. Puede especificarse estabilidad debido a drift de frecuencia o a otros factores como fluctuaciones estocásticas de frecuencia. Los factores incluidos en la especificación deben indicarse claramente.

Máximo Error de Intervalo de Tiempo (MTIE) es la máxima variación pico a pico de una señal de temporización con respecto a un reloj ideal en un intervalo de tiempo. Se entiende por “reloj ideal” a un PRS.

Desviación de Tiempo (TDEV) es la medición de la variación de tiempo de una señal como función del tiempo de integración. TDEV provee información acerca del contenido espectral del ruido de fase o tiempo de una señal

PRC (Primary Reference Clock) es un reloj de Cs o Rb (subordinado o no al GPS) con estabilidad  $1 \times 10^{-11}$ .

TNC (Transit Node Clock) En el estrato 2 se adopta un concepto SSU con estabilidad  $1 \times 10^{-9}$ . Se realiza mediante relojes de cuarzo en doble cámara térmica. El número máximo de relojes TNC debe ser 10. El TNC se encuentra ubicado en una extremo de la línea de sincronismo. Puede recibir también sincronismo desde 2 líneas distintas (provenientes desde el PRC). Puede disponer de un receptor GPS para subordinar al TNC en caso de falla. En ausencia total de subordinación se autoconfigura en la función Hold-over. Debe evitarse una larga cadena en cascada de relojes LNC entre TNC (máximo 2). LNC recibe temporización desde ambos extremos (TNC).

LNC (Local Node Clock) Es el estrato 3 con estabilidad de  $2 \times 10^{-8}$ . Se realiza mediante relojes de cuarzo compensado en temperatura. En este caso se dispone de dos

alternativas un VCXO (Voltage Control Cristal Oscilator) o OCXO (con control numérico y filtrado digital).

SETS (Synchronous Equipment Timing Source) Los equipos de transmisión SDH llevan una fuente de reloj interno que determina una estabilidad de 4.6ppm. El número máximo de SETS entre SSU debe ser 20.

#### **2.3.1.1 Características de un reloj TNC y LNC**

Free-run Estabilidad en oscilación libre.

Hold-over La estabilidad en hold-over es desde el momento que se pierde la referencia y por 24 horas. El pasaje desde Hold-over al estado normal requiere un tiempo (superior a 10seg) para verificar la validez (determinar que se trate de una referencia correcta y estable). La conmutación produce un salto de frecuencia denominado Return-from-Hold-over.

Pull-in Rango de captura. Definido como el rango dentro del cual el reloj captura el enclavamiento. El valor debe ser tan grande como la precisión en oscilación libre. Esto garantiza que un reloj es capaz de sincronizarse con el mismo estrato o superior.

Hold-in Rango de enclavamiento. Es el rango donde se mantiene enclavado mientras la señal varía lentamente. Hold-in debe ser mayor a Pull-in

#### **2.3.2 Sincronismo de equipos SDH**

En PDH lo normal es el sincronismo interno, los equipos SDH se configuran para recibir la temporización desde el exterior en condiciones normales de funcionamiento. Solo en caso de falla se pasa al sincronismo interno. Una particularidad de gran importancia en SDH es que todos los equipos multiplexores y de transmisión se encuentran sincronizados desde la misma fuente.

#### **2.3.3 Programación del sincronismo**

Cada equipo puede tener varias alternativas de sincronismo. Las características de la gestión del sincronismo son:

- Se programa el reloj de sistema y la salida del reloj al exterior por separado.
- La prioridad entre distintas fuentes de sincronismo se programa por software (PC en interfaz F RS-232 de 9 pines).
- La alternativa típica es el reloj de recepción (sistema).
- Se programan alternativas y prioridades de sincronismo para el reloj de sistema.
- Se selecciona en forma automática la fuente de sincronismo en caso de falla.

- Se puede programar si la conmutación de fuente de sincronismo es reversible (retorno a fuente primaria).
- Se puede programar un tiempo de espera para dicha reversión en seg (Wait-to-Restore).
- Se configura el Byte S1 para la reconfiguración del sincronismo en caso de falla.
- La conmutación entre alternativas de sincronismo provoca un inevitable salto de fase.
- Con el propósito de reducir el salto de fase, se programa la constante de tiempo (velocidad de adaptación de fase).

### 2.3.4 Loop de sincronismo

Al desarrollar el Plan de Sincronismo hay que evitar los posibles loop cerrados de temporización. Se destacan las siguientes particularidades:

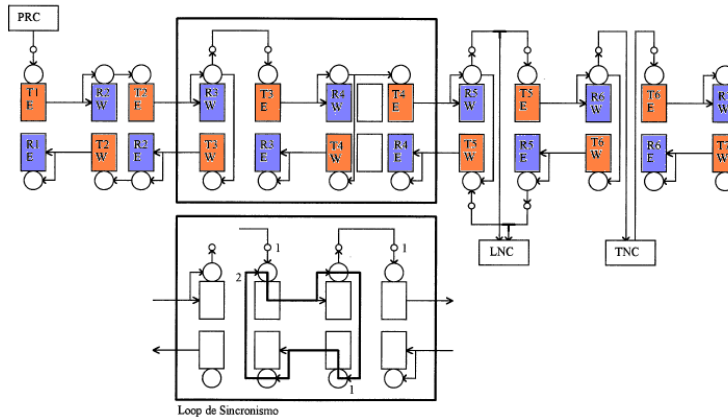


Figura 2.7 Propagación del sincronismo en la red SDH

Los loop de sincronismo produce regiones aisladas de temporización con inestabilidades causadas por la realimentación. Para evitar el loop de sincronismo pueden usarse los mensajes de gestión (Byte S1) y relojes TNC con Hold-over. En una estructura en anillo deben existir al menos 2 nodos con relojes TNC. Las vías de acceso a ellos deben ser distintas.

La subordinación a GPS permite disponer de varias referencias primarias distribuidas. Un loop de sincronismo puede derivarse desde la Figura 2.7. El loop se produce cuando debido a la pérdida de la referencia primaria un equipo Add-Drop conmuta desde el sincronismo externo al estado de sincronismo interno. La siguiente estación continúa



sincronizada con la señal de recepción y se forma un loop. Para evitarlo se utiliza el mensaje de sincronismo SSM (Byte S1).

Byte S1, ste byte se ubica en la posición (9,1,1) en MSOH. Identifica la calidad de la fuente de sincronismo externo del equipo corresponsal. El mensaje transportado ocupa 4 bits (5...8) y se denomina SSM (Synchronization Status Message).

### 2.3.5 Proceso de cambio de dirección del flujo de reloj

A-Normal, en condiciones normales se emite hacia adelante el mensaje de fuente PRC (hexadecimal 2). Hacia atrás se recibe el mensaje de no utilizar para sincronismo (hexadecimal F). Dichos mensajes se repiten en ambos enlaces, dando lugar a una secuencia 2/F-2/F (figura 2.8A).

B-Corte, en caso de pérdida de la referencia externa PRC se conmuta a sincronismo Holdover y se envía el mensaje de no utilizar para sincronismo (hexadecimal B). No se toma el sincronismo en recepción debido al mensaje (hexadecimal F). Se tiene la secuencia B/F-2/F (figura 2.8B).

C-Squelch, el segundo terminal ignorar la señal de recepción como fuente de referencia y se anula la salida de temporización hacia el exterior (squelch). En tal caso, el equipo siguiente conmuta a Holdover (hexadecimal B). Se tiene la secuencia B/F-B/F (figura 2.8C) Un nuevo squelch se produce en el tercer terminal y el TNC pasa a operar con una segunda referencia. Tal situación permite un "efecto dominó" donde una pérdida de referencia se propaga hacia adelante hasta encontrar un estrato 2 (TNC).

D/E-Cambio, desde este momento se procede a restaurar el sincronismo pero en sentido contrario. El tercer Terminal se sincroniza con la alternativa 2 desde el TNC y se emite el mensaje (hexa 4). La secuencia es B/FB/4 (figura 2.8D).

F-Cambio, el segundo terminal se sincroniza con el tercero y la secuencia es B/F-F/4. Se habilita la salida de reloj y se sincroniza hacia la izquierda; la secuencia es B/4-F/4 (figura 2.8E). Por último, el primer terminal se sincroniza con el segundo y se tiene la secuencia F/4-F/4 (figura 2.8F).

A/F-Anillo, en un anillo la configuración es similar en ambos sentidos. Se asegura la presencia de dos relojes distintos (PRC o TNC) para efectuar la reconfiguración del sincronismo en caso de falla.

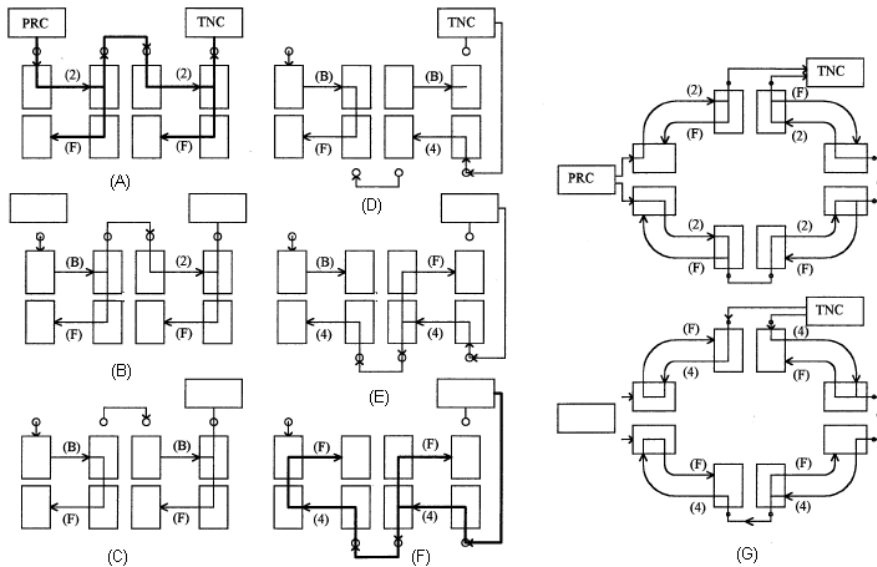


Figura 2.8 Reconfiguración del sincronismo en una red y un anillo.

## 2.4 Actualidad y futuro de las redes ópticas

Las arquitecturas de redes ópticas tradicionales están compuestas de cuatro capas: la capa física de fibra, la capa de multiplexación óptica, la capa de conmutación ATM y la capa de enrutamiento IP.

Muchos proveedores de servicio están respondiendo al mercado cambiante optimizando el funcionamiento de sus redes y los costes de mantenimiento. Este comportamiento se debe en gran parte al espectacular incremento de tráfico IP como consecuencia de Internet, y los avances producidos en las tecnologías de transmisión óptica.

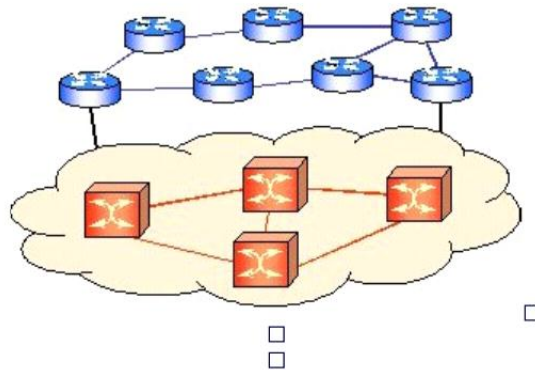
Uno de los principales cambios consiste en trasladar los beneficios proporcionados por ATM a la capa IP mediante el desarrollo de MPLS "Multiprotocol Label Switching". En las grandes redes IP la capa ATM está desapareciendo debido a que ahora los routers IP presentan mejoras en cuanto a la velocidad de transmisión de paquetes y de procesamiento.

Los expertos aseguran que la arquitectura de red óptima estaría basada en dos capas: una capa de transmisión óptica y una capa de enrutamiento IP. En esta red los routers toman decisiones sobre los paquetes, mientras que la capa de transmisión proporciona rutas de conexión flexibles entre estos routers.

Los nodos de transmisión OXC, se encargan de la conmutación entre las fibras, longitudes de onda individuales, o si la funcionalidad SDH se encuentra integrada en ellos, ranuras temporales del interior de las longitudes de onda. La conexión entre la capa IP y la capa óptica se realizaría mediante GMPLS “Generalized Multiprotocol Label Switching”.

El planteamiento de separar el enrutamiento del transporte óptico resulta bastante lógico, aunque también hay argumentos a favor de la futura consolidación en una única capa completamente óptica. Las investigaciones que se están llevando a cabo en la actualidad sobre nuevos dispositivos fotónicos (como puertas lógicas y memorias ópticas) dentro del marco de las redes ópticas de paquetes, son la clave de estos argumentos.

Hay dos enfoques distintos para los proveedores de servicios IP, uno basado en OADMs y OXCs y otro basado en enrutadores IP. En el basado en OADMs y OXCs, se pueden proporcionar otros servicios además de IP desde la misma plataforma, como SDH/ATM.



**Figura 2.9** Generalized Multiprotocol Label Switching

En el modelo de la figura anterior, las rutas ópticas proporcionan enlaces entre los routers para la capa IP. La gestión de red se basa en un modelo cliente-servidor donde la red IP es cliente de la capa de red óptica. No existe ningún intercambio de información de enrutamiento entre esas capas.

La capa IP no puede ver la topología de la capa de red óptica, por lo que el plano IP debe tener capacidad para resolver direcciones o debe disponer de una base de datos de los puntos de finalización de las rutas ópticas. Este mecanismo de control es muy similar al existente en el esquema de IP sobre ATM.

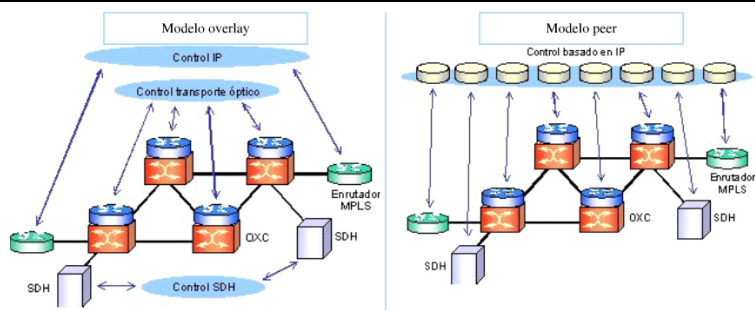


Figura 2.10 Modelo Overlay y modelo Peer.

En el caso de tener un mecanismo de control distribuido, los OXC y otros equipos se consideran routers IP virtuales, y tanto las redes de routers IP como las ópticas utilizan protocolos de señalización y enrutamiento comunes como GMPLS. Los routers IP y los OXC tienen una función equivalente en el plano de control: todos los dispositivos se comportan como routers IP. Este modelo de arquitectura se representa esquemáticamente de la siguiente manera:

En las redes basadas en routers MPLS (Multiprotocol Label Switching) fotónicos también pueden plantearse ambos esquemas de control el distribuido y el centralizado. La ventaja en este caso es que sólo es necesaria una extensión de la jerarquía MPLS existente para realizar el control distribuido. Con este esquema, cada router MPLS fotónico conoce la topología de red de la capa óptica y el estado de sus enlaces. Las figuras siguientes muestran las arquitecturas para estas redes.

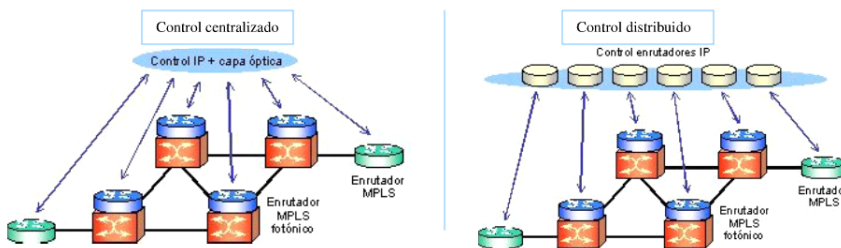


Figura 2.11 Control centralizado y control distribuido.

La elección de cada escenario depende del campo de aplicación y de diversas variables como el tipo de servicios a proporcionar, la propiedad de los equipos, la segmentación de la gestión de red, etc.

DWDM puede eliminar la necesidad de fibra extra, lo cual es especialmente importante para proveedores que tienen problemas de consumo de fibra, pudiendo coexistir con redes SONET o con las viejas terminales de fibra óptica llamadas FOT, las cuales operan mediante protocolos asíncronos. DWDM ha revolucionado la industria de las telecomunicaciones proveyendo de infraestructura para largo transporte de redes ópticas.

### 2.4.1 Aplicaciones de WDM

WDM se ha consolidado como una de las tecnologías favoritas, gracias a las enormes ventajas que ofrece en la optimización del uso del ancho de banda. Su implementación en los mercados de Europa, América Latina y Asia crece cada día, y son cada vez más las redes de cable que la utilizan para ofrecer multiservicios.



Figura 2.12 Aplicaciones de WDM

Los servicios de banda ancha representan el futuro de Internet, de la telefonía, del entretenimiento, y de la disponibilidad de información. El coste del ancho de banda está disminuyendo, mientras que su demanda aumenta rápidamente. Entre las compañías capaces de cubrir los crecientes requerimientos de ancho de banda, están las compañías telefónicas, las de servicio de televisión por satélite y las redes de televisión por cable.

### 2.4.2 Televisión por cable

Los sistemas de tele visión por cable vienen evolucionando desde que fueron creados. Estos sistemas se desarrollaron para cubrir una necesidad específica del mercado y con el paso del tiempo han ido apareciendo más aplicaciones que utilizan las ventajas de su infraestructura y de sus especificaciones técnicas.

La Cabecera (Centro de Recepción y Control o CRC) es el punto de origen de las señales a transmitir y la fuente de todos los programas disponibles. Ésta cuenta con antenas parabólicas para recibir señales de satélite, antenas de alta ganancia para televisión abierta, máquinas de video para reproducir material grabado y estudios de producción (aunque sólo en algunos casos).

La red troncal transporta la señal a la zona que requiere el servicio. El principal objetivo de ésta es conservar la calidad de la señal, utilizando amplificadores. Tiene que haber un mapa de distribución para la red antes de empezar a construir y se deben considerar los lugares por donde pasará ésta, la longitud del cable requerido y la distancia entre los postes. El número de amplificadores troncales que se colocan en cascada en la red troncal por lo general oscila entre 20 y 30 en redes de gran capacidad y hasta 60 en redes de menor ancho de banda. La fibra óptica sustituye al cable coaxial en esta sección de la red, debido a que puede eliminarse gran parte del ruido del sistema, así como la distorsión que aportan los amplificadores en cascada.

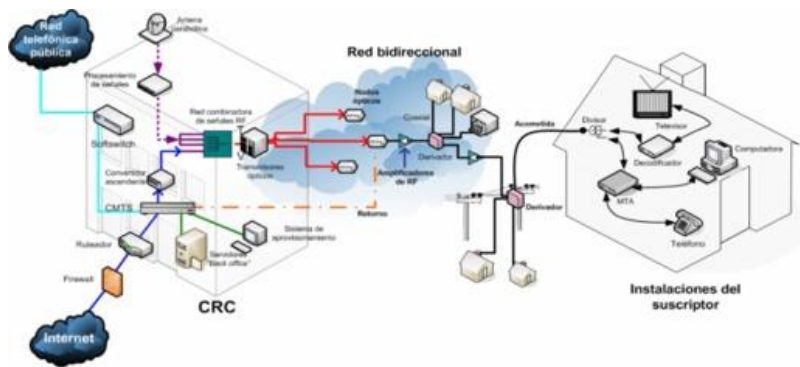


Figura 2.13 Sistema de Televisión por Cable.

La red de distribución se conecta a la red troncal mediante amplificadores puente y pasa cerca de las casas, generalmente a un lado de los cables de luz. Su propósito es llevar las señales hasta las instalaciones del suscriptor.

La acometida es un cable coaxial flexible como el RG-6, utilizado para llevar la señal desde el cable de distribución hasta la casa del usuario. El equipo Terminal o caja decodificadora acondiciona la señal para poder ser reproducida en una televisión, sirve como filtro para proporcionar al suscriptor únicamente los canales a los que éste está suscrito.

### 2.4.3 Sistemas de radio sobre fibra óptica

Los sistemas de radio sobre fibra óptica, caracterizados por combinar dispositivos de radiocomunicaciones con enlaces de fibra óptica, están encontrando un papel cada vez más importante en las redes de telecomunicación. El futuro de las redes parece dirigirse hacia comunicaciones inalámbricas con una movilidad cada vez mayor, a la vez que los operadores intentan, cada vez más, acercar su infraestructura de fibra óptica hacia las redes de acceso. Básicamente, los sistemas radio sobre fibra aprovechan la fibra óptica para transportar señales de radio directamente hasta un punto remoto de radiación en

espacio libre (estación base). Dependiendo de la aplicación, las señales de radio pueden ser VHF, UHF, microondas o incluso ondas milimétricas. En cuanto a la fibra óptica, éste es el medio de transmisión ideal por varias razones, sus bajas pérdidas (inferiores a 0.25dB/Km para 1550nm), y que los amplificadores ópticos de fibra dopada con erbio (EDFA) permiten alcanzar grandes distancias. En segundo lugar, su inmunidad frente a las interferencias electromagnéticas y su gran ancho de banda de transmisión únicamente limitado por la dispersión cromática. Entregando las señales de radio directamente, el enlace de fibra evitará la necesidad de generar la portadora de alta frecuencia en la estación base, el cual es normalmente un emplazamiento de difícil acceso.

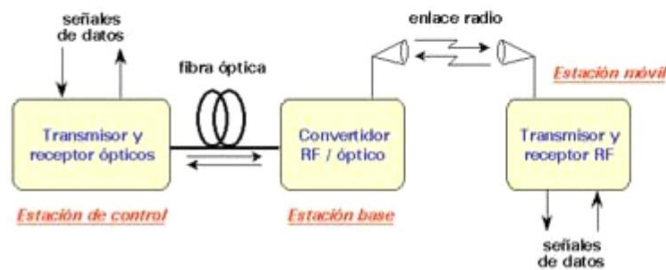


Figura 2.14 Sistemas de radio sobre fibra óptica.

Para cualquier sistema de transmisión, son de vital importancia las cuestiones prácticas como tamaño, peso, fiabilidad, coste y consumo del equipamiento remoto. Así, la gran ventaja de los sistemas de radio sobre fibra óptica es su aptitud para concentrar la el equipamiento más caro de alta frecuencia en un lugar centralizado (estación de control), permitiendo que el resto de equipamiento del emplazamiento remoto sea simple, ligero, de pequeño tamaño y bajo consumo. Esto desemboca en una instalación más rápida y sencilla, con baja necesidad de mantenimiento y con mayor simplicidad en la provisión de potencia eléctrica.

La centralización del equipamiento de alta frecuencia aumenta la flexibilidad y el potencial de reutilización o pueda ser compartida entre otros usuarios. La frecuencia radiada puede ser extremadamente estable, lejos de la influencia de las variaciones climáticas que pueden sufrir las estaciones base. Entre las principales aplicaciones que encuentran los sistemas radio sobre fibra óptica, éstas pueden clasificarse en cuatro grandes grupos:

- Aplicaciones satélite
- Sistemas inalámbricos punto a multipunto
- Aplicaciones telemáticas
- Aplicaciones militares

#### **2.4.4 Telemedicina**

La Telemedicina permite transmitir en tiempo real datos e imágenes digitalizadas estáticas o dinámicas a través de fibra óptica o de línea telefónica, éste sistema puede estar orientado de dos formas, hacia el médico que es diseñado para su uso en el hospital o consulta del especialista hacia el paciente para registrar o monitorizar su control metabólico.

#### **2.4.5 Videoconferencia**

Todos los sistemas de videoconferencia operan sobre los mismos principios. Sus características principales son la transmisión digital y el procesado de la señal. Una vez producida la digitalización de la señal, las transmisiones de videoconferencia pueden transportarse sobre cualquier circuito tanto terrestre (cable, fibra óptica) como por satélite. Las velocidades de transmisión posibles van en incrementos de 64Kbps hasta los 2Mbps (en los equipos comerciales más comunes). El sistema básico de videoconferencia emplea dos circuitos de 64Kbps. Al aumentar el número de circuitos se aumenta la calidad de transmisión. El empleo de la tecnología WDM y su gran capacidad de ancho de banda favorecen el desarrollo de este servicio en cuanto a rapidez, fiabilidad y calidad de la comunicación.

Las tendencias para las próximas décadas en servicios de telecomunicaciones apuntan hacia los servicios inalámbricos y a los de banda ancha. Servicios como video por demanda, video conferencia, video teléfono, video sobre IP, audio de alta fidelidad, telemedicina e Internet de alta velocidad se están implantando en las redes de cable más modernas.

#### **2.4.6 Fibra oscura**

Esta denominación se le atribuye a los circuitos de fibra óptica, que han sido desplegados por algún operador de telecomunicaciones, pero no están siendo utilizados. Cuando un operador de telecomunicaciones despliega su red de fibra óptica tiene que hacer una gran inversión para construir la infraestructura y tender los cables de fibra óptica. Si en un futuro existe la necesidad de ampliar la capacidad de una red ya existente, sería necesario modificar la infraestructura y tender cables adicionales.

La fibra oscura es una opción cara de telecomunicaciones, pero existen casos en los que resulta rentable. Por ejemplo, grandes bancos y organizaciones gubernamentales usan la fibra oscura para interconectar sus centros de procesos de datos con los correspondientes centros de respaldo.



---

## CAPÍTULO 3 PROYECTO

### 3.1 Esbozo del Proyecto

Pese a que la existencia de infraestructuras de red basadas en fibra óptica no es hoy en día ninguna novedad. El presentarse trabajo es un proyecto cuyo principal objetivo es diseñar una infraestructura de una red metropolitana de fibra óptica que proporcione un servicio de transporte de datos para la compañía Luz y Fuerza del Centro, ya que la utilización de un elemento fundamental como son las telecomunicaciones para el desenvolvimiento de la empresa.

Este proyecto que plantea el diseño de una red de fibra óptica en la ciudad de México para la compañía paraestatal Luz y fuerza del Centro, que proporcione un servicio de transporte de datos utilizando tecnología DWDM, entre los diferentes nodos de la red. Ya que en la actualidad la compañía Luz y Fuerza del Centro depende en gran medida de las telecomunicaciones, ya diversos centros requieren estar interconectados poder realizar el intercambio de información y con esto para poder llevar a cabo su trabajo diario, ya que el uso de WDM plantea ventajas económicas, de gestión y menos sobrecarga que hacen interesante su desarrollo.

El proyecto se fundamenta en la previsión de que a medio plazo se va a producir una implantación masiva de infraestructuras de transmisión WDM que, además de soportar los servicios existentes actualmente, deberán ofrecer una respuesta eficiente en prestaciones y coste a un mercado de servicios en los próximos 10 años.

En este trabajo se formula la aplicación de una topología en anillo, ya que actualmente la compañía cuenta con equipo de computo en más del 90% de los centros de trabajo pertenecientes a dicha empresa, los cuales no todos se encuentra interconectados a la red de la compañía si no que tienen acceso a ella mediante la utilización de una red de servicios externa perteneciente una compañía líder en telecomunicaciones, que si bien los servicios de voz y datos se encuentra descentralizados y distribuidos por la ciudad de México, algunos de los cuales no están integrados, lo cual constituye una limitante en la eficiencia y desarrollo de la empresa teniendo perdidas económicas. Por lo que se detectó la necesidad de crear una red de fibra óptica distribuida e integrada que consta de tres anillos, permitiendo la comunicación entre los centros de trabajo de mayor relevancia y a su vez poder proteger la red ya instalada con la creación de esta nueva.

La red está soportada por dos pares de fibras monomodo, se ha establecido una red DWDM con una topología en anillo, en la que los centros están conectados dos a dos.

En cuanto a la Flexibilidad y versatilidad, es principalmente, la posibilidad de ejecutar la asignación del ancho de banda disponible en fragmentos de 10/100/1000 Mbps. La

---

utilización de equipamiento más barato, tanto los conmutadores Ethernet, como las interfaces de nivel de 2 a 100 Mbps para routers, sistemas finales (servidores) o conmutadores Ethernet adicionales.

En la decisión adoptada, también se consideró la posibilidad de reutilización de equipamiento ya existente.

Las inversiones de telecomunicaciones en fibra óptica ofrecen servicios de telefonía, Internet y televisión interactiva. A pesar de los altos costos para su implementación han sido grandes sus beneficios. Estas enormes inversiones pueden optimizarse cuando se realizan conjuntamente las obras de infraestructura y las de fibra óptica generando importantes ahorros, sino también, al disponer de “carreteras inteligentes”, con servicios y aplicaciones del primer mundo. El mayor impacto a largo plazo de estas inversiones conjuntas serán aquellas orientadas a que cada centro de trabajo tenga acceso a sus aplicaciones productivas y organizacionales.

Con este proyecto se enfatiza la vía digital de la compañía como medio ideal para realizar transacciones, intercambios y compartir información. El proyecto impulsa el desarrollo de una empresa digital, donde el personal laboral encuentre toda la información necesaria para poder realizar su trabajo y pueda beneficiarse de los servicios en línea como consultas de información y la comunicación con otros centros de trabajo.

Con una red avanzada de comunicación, el personal tiene acceso a información mundial en cualquier tema. Los alcances de esta poderosa herramienta tienen límites sólo en la imaginación.

En la era de la información es determinante que las comunicaciones no lleguen tarde. En la actualidad se requiere cada vez más ancho de banda, para migrar de los sistemas tradicionales orientados a circuitos telefónicos e integrar todos los servicios como voz, datos y video.

Es por eso que se detecta la falta de interconexión entre diversos centros de trabajo, subestaciones eléctricas y gerencias, que se propone la realización de esta red que aparte de interconectar algunos sitios proporcionara una protección a la red con la que cuenta la compañía Luz y Fuerza del Centro. La red que se propone consta de tres anillos de fibra óptica que interconectarán los sitios de mayor relevancia para la compañía Luz y Fuerza del Centro.

El cable de fibra óptica que se sugiere a instalar cuenta con 24 fibras monomodo debido a que la diferencia en precios por metro de fibra óptica es mínimo, las fibras que quedarán libres servirán en el futuro para poder hacer nuevos enlaces ópticos y poder interconectar otros sitios. El enlace tendrá una velocidad de 10GHz con una longitud de onda de 1550nm debido a que las pérdidas son de 0.25dB/Km.

Los extremos de la fibra óptica llegarán al cuarto de telecomunicaciones que alberga equipo de telecomunicaciones y las terminaciones de cable.

El equipo de telecomunicaciones por normativa interna debe ser instalado por el departamento de conmutadores ya que cuenta con personal calificado y con certificación para instalar estos equipos.

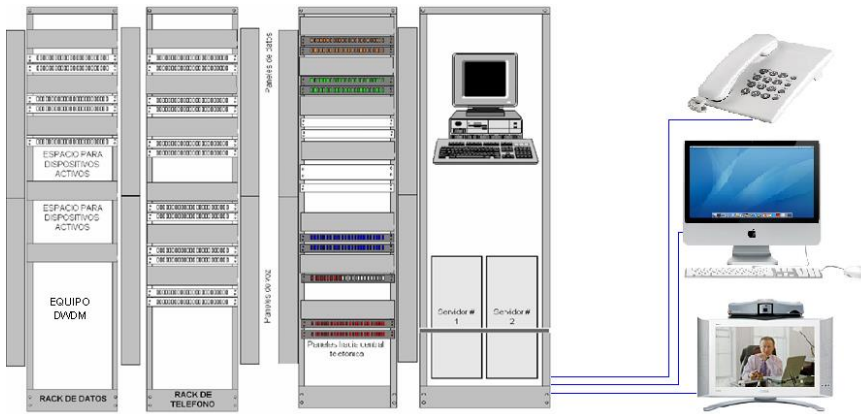


Figura 3.1 Rack para cableado estructurado y equipo de telecomunicaciones.

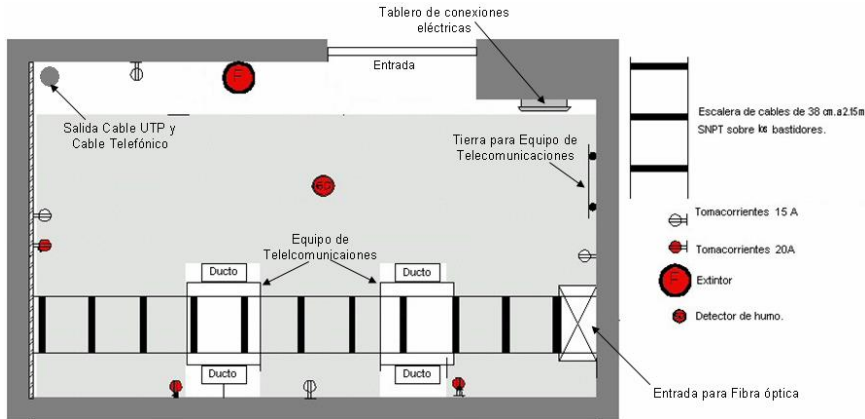


Figura 3.2 Cuarto de telecomunicaciones.

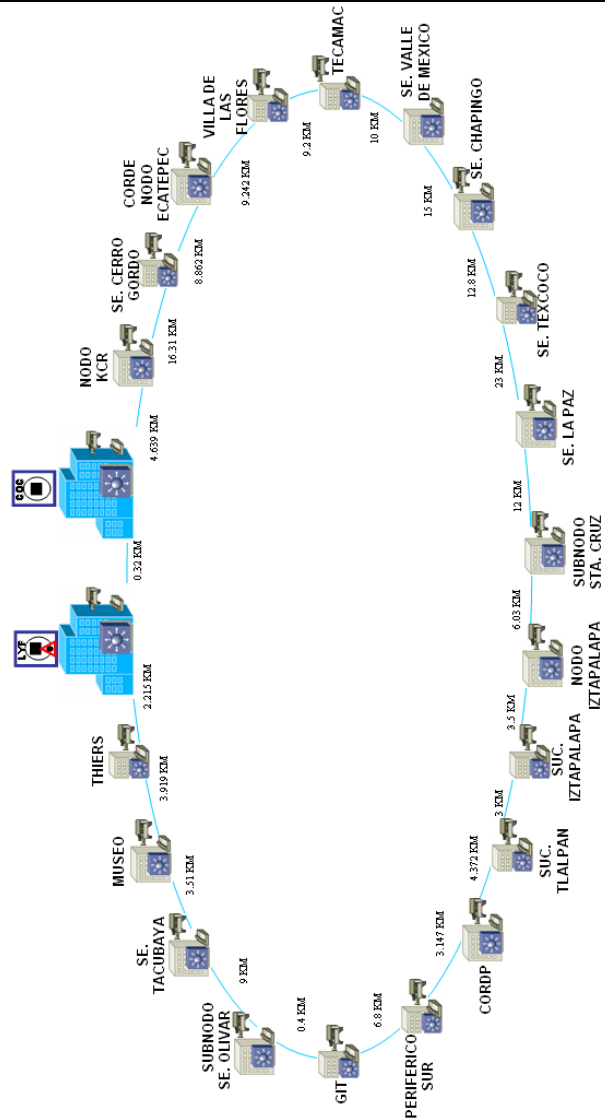


Figura 3.3 Anillo 1.

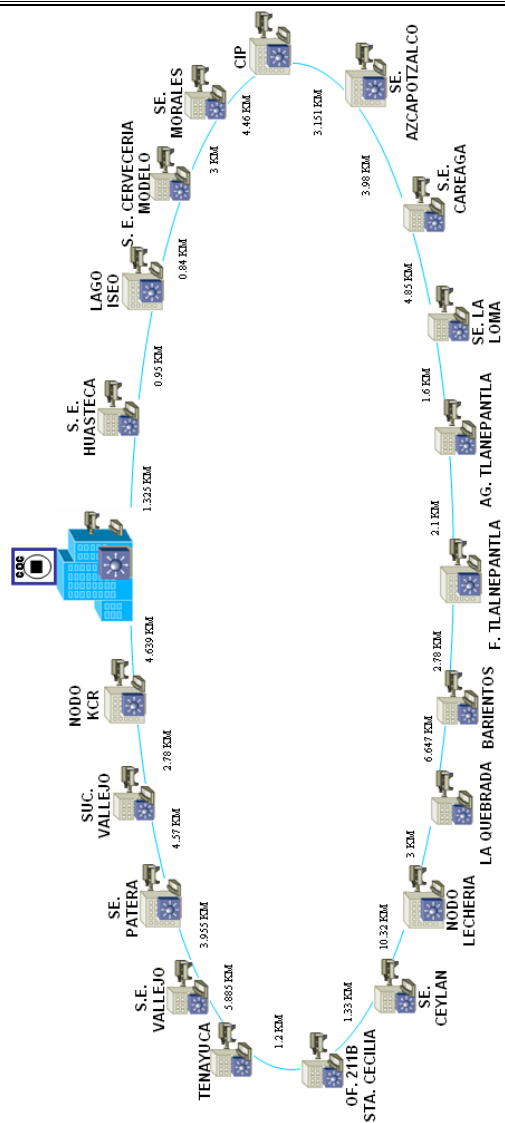


Figura 3.4 Anillos 2.

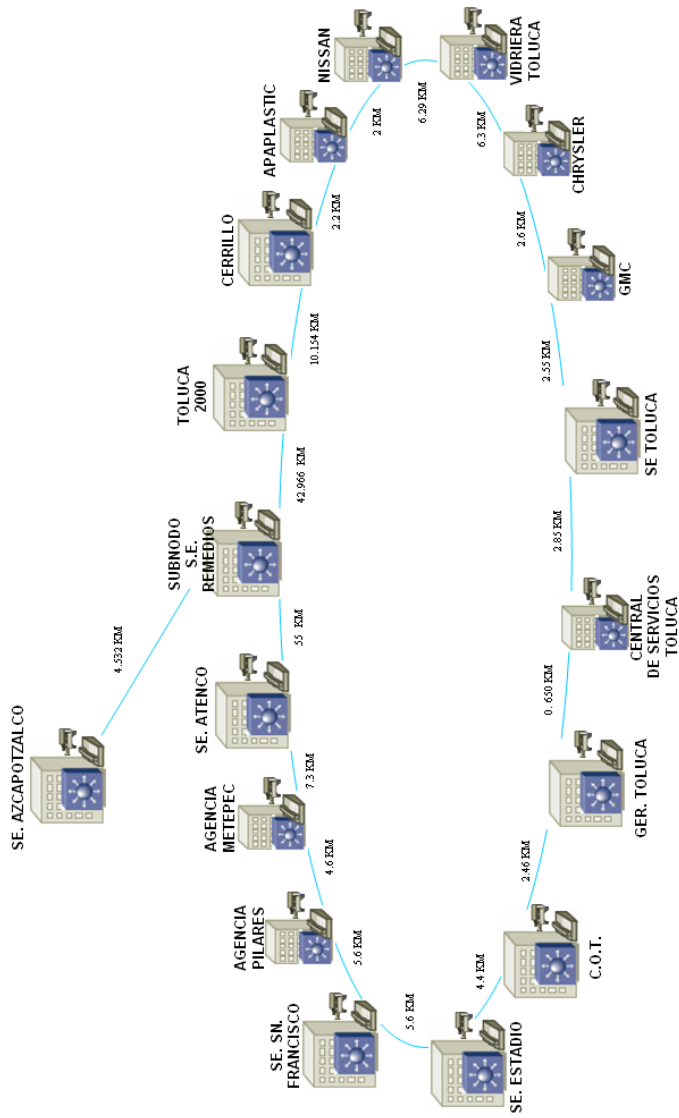


Figura 3.5 Anillo 3.

### 3.2 Cálculos de Enlace Óptico

Primeramente se debe determinar la arquitectura del enlace con base en la ubicación de los sitios y la distancia enlace. Para poder calcular un enlace óptico se deben utilizar las pérdidas que experimenta la señal al viajar por la fibra, por los conectores, por fusiones y por cualquier otro dispositivo. Con base en la atenuación total se calcula la potencia óptima de transmisión.

Para el cálculo de la potencia del transmisor que permite garantizar la llegada de un nivel de 0dBm (cero decibelios referidos a 1 miliwatt) a la entrada de cada uno de los receptores ópticos. Este valor permitirá a su vez obtener el valor de los acopladores ópticos necesarios para distribuir la señal en las diferentes rutas.

Para realizar el cálculo de un enlace óptica se debe asegurar que se cuenta con la ubicación y la distancia precisa entre cada una de las sitios de interés.

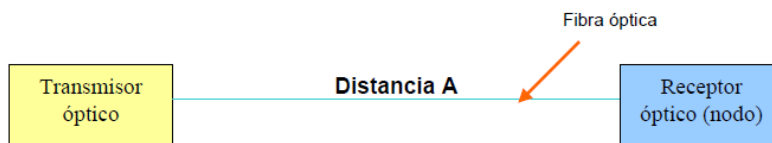


Figura 3.6 Enlace entre dos puntos.

Para conocer la pérdida total de la señal a través de la ruta y calcular el valor de la potencia del transmisor, se debe conocer primero la atenuación de la fibra por unidad de distancia.

La pérdida de luz en una fibra óptica es muy pequeña. Las dos longitudes de onda más utilizadas en la fibra son 1310nm y 1550nm. A una longitud de onda ( $\lambda$ ) de 1310nm la atenuación típica es de 0.35dB/Km, mientras que para 1550nm es de 0.25dB/km.

Se debe tener en cuenta la pérdida extra por catenaria y por las reservas de fibra. Para el cálculo se recomienda agregar un 10% extra de la distancia en la ruta por catenaria y reservas de fibra.

Una vez que haya considerado todos estos factores, con el valor de la pérdida típica por kilómetro de la fibra (dependiendo de la longitud de onda), se efectuara el cálculo de la pérdida total de la ruta con la siguiente fórmula.

$$\text{Pérdida total por fibra} = [\text{distancia (km)} + 10\% \text{ distancia (km)}] \cdot [\text{atenuación (dB/km)}] \quad \text{Ec. 3.1}$$

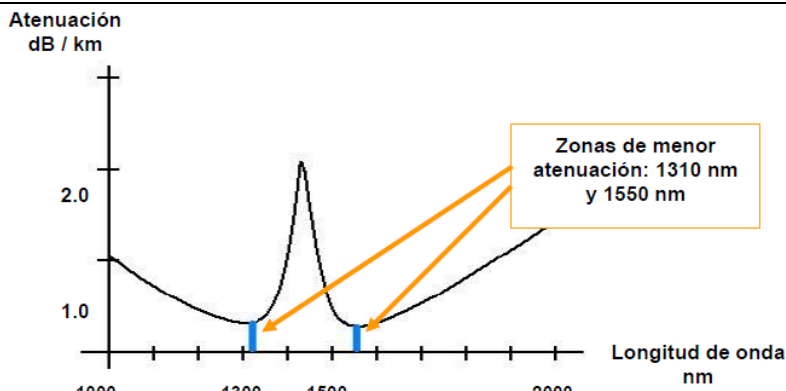


Figura 3.7 Curva de atenuación en la fibra óptica.

Al resultado de la pérdida total por fibra se le debe sumar la pérdida por conectores y empalmes. Para este cálculo se considerará 0.2dB por cada conector y 0.25dB por cada empalme de fusión. Sin embargo, estos valores son una aproximación, por lo tanto, se sugiere utilizar el valor indicado por cada fabricante en las hojas de especificaciones.

Cada enlace puede ser diferente debido al número de conectores y/o fusiones que tiene. Generalmente se necesitan varias fusiones a lo largo de la ruta y conectores en el transmisor, receptor y en otros equipos.

$$\text{Pérdida total} = \text{Pérdida fibra (dB)} + \text{Pérdida conectores (dB)} + \text{Pérdida empalmes (dB)} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Ahora, se hace la conversión de dB a mW mediante la siguiente fórmula:

$$mW = \text{antLog} \left( \frac{dB}{10} \right) \quad \text{Ec. 3.3}$$

Se recomienda seleccionar un transmisor óptico con un valor comercial ligeramente mayor al valor teórico (redondeo hacia arriba) para garantizar un nivel de 0dBm a la entrada del receptor óptico. Si se excede por mucho el valor, entonces probablemente será necesario colocar un atenuador óptico a la entrada del receptor para ajustar el valor.

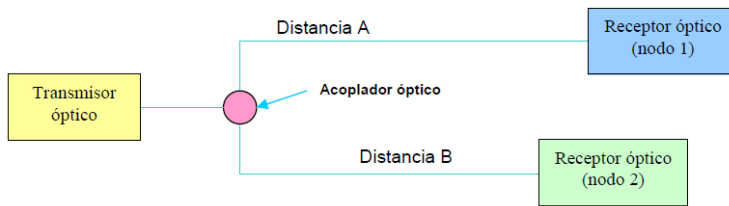
$$\text{Nivel de entrada receptor (dBm)} = \text{Potencia transmisor (dBm)} - \text{Pérdida total (dBm)} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Es importante tener cuidado con las unidades al efectuar las operaciones. Se debe trabajar con las mismas unidades en la potencia del transmisor y en la pérdida total (decibeles o miliwatts). Si la potencia del transmisor se especifica en mW, se efectúa la conversión a dBm con la fórmula:



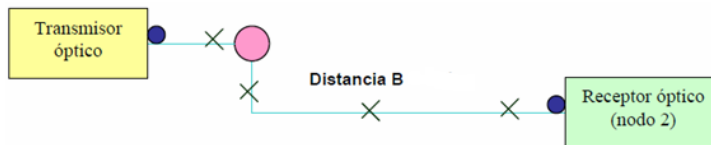
$$dBm = 10 \log(mW) \text{ Ec. 3.5}$$

Ahora bien, suponiendo que hubiera otro sitio al cual también se quiere llevar servicio, se debe calcular el valor de un acoplador óptico. Un divisor o acoplador óptico tiene la función de canalizar un porcentaje de la potencia óptica total del transmisor en dos o más ramificaciones. Existen divisores o acopladores ópticos de dos, tres o cuatro salidas.



**Figura 3.8** Enlace óptico de dos sitios.

Para calcular la pérdida en la ruta B se debe realice el mismo procedimiento de la ruta A para calcular el valor de la pérdida total.



**Figura 3.9** Cálculo de la pérdida total para la ruta B.

Una vez que se tenga el valor de la pérdida total de la ruta B en decibels y en miliwatts se debe sumar con el de la ruta A. Sin embargo, antes de esa operación se debe considerar otro detalle: agregar el valor de la pérdida por fusión (la del acoplador óptico) para la ruta A.

Una vez que se tengan las potencias necesarias para la ruta A y B se procede a calcular el valor de la potencia óptica del transmisor solo sumando las potencias necesarias en cada ruta.

Recuerde que es mejor elegir un transmisor que exceda ligeramente el valor teórico y ajustar el nivel de entrada a los receptores ópticos mediante un atenuador óptico.

Con el valor de la potencia óptica del transmisor y de las pérdidas de la ruta A y B se calcula el valor del acoplador óptico. Para ello, únicamente se calcula qué porcentaje de

---

la potencia del transmisor se debe destinar a cada rama y, con base en este resultado, se selecciona un acoplador óptico de las hojas de especificaciones del fabricante.

Es muy importante hacer la conversión de la pérdida total en cada rama de decibeles a miliwatts. Esto es indispensable ya que los decibeles son unidades logarítmicas y para obtener el porcentaje de pérdida en cada rama es necesario trabajar con unidades lineales (miliwatts). Para conocer el valor del acoplador óptico simplemente se hace un cálculo aritmético regla de tres.

Con estos porcentajes se sabe que se requiere un acoplador óptico que separe 45% de la potencia del transmisor óptico en un sentido y 55% en el otro.

El último paso consiste en buscar en las tablas de especificaciones el acoplador óptico que mejor se ajuste a dicho porcentaje.

Si se requiere dividir la potencia del transmisor óptico para más de dos rutas, se pueden emplear divisores ópticos con mayor número de salidas. Estos dispositivos cuentan con dos, tres o cuatro salidas con incrementos de 5% por lo regular.

NOMBRE DEL ENLACE	LONGITUD			Longitud de onda 1550	Longitud de onda 1310	Num de empujones	Perdida empalmes	Perdida conectores	Perdida total 1350nm	Conversión dB a mW	Perdida total 1310nm	Conversión dB a mW				
	AEREA	SUB.	OPGW										Perdida total	Perdida total	Perdida total	Perdida total
			TOTAL										dB	dB	dB	dB
COC-LYF		320		0.088	0.1232	0	0.02	0.4	0.5	1.12	0.54	1.1320901				
PERIFERICO SUR # 4156-GIT	6800			6.8	1.87	2	0.33	0.4	2.6	1.82	3.35	2.1625728				
THIERS # 251-MUSEO TECNOLOGICO	3919			3.919	1.07725	1	0.19	0.4	1.7	1.47	2.10	1.6218048				
THIERS # 251-LYF	1495	720		2.215	0.69125	1	0.11	0.4	1.1	1.29	1.96	1.3679883				
S.E.TACUBAYA-MUSEO TECNOLOGICO	3510			3.51	0.95325	1	0.17	0.4	1.5	1.42	1.92	1.5588865				
S.E.OLIVAR-S.E.TACUBAYA	9000			9	2.475	2	0.44	0.4	3.3	2.14	4.30	2.6940301				
GIT-S.E.OLIVAR	400			0.4	0.11	0	0.02	0.4	0.5	1.13	0.57	1.1411723				
PERIFERICO SUR # 4156-CORDP	3174			3.174	0.87285	1	0.15	0.4	1.4	1.39	1.78	1.5055040				
VALLE DE MEXICO 230-VILLA DE LAS FLORES PASA POR TECAMAC		19200		19.2	5.28	5	0.84	0.4	6.6	4.59	8.73	7.4620566				
NODO IZTAPALAPA-S.E.SANTA CRUZ	6030			6.03	1.65825	1	0.29	0.4	2.4	1.72	3.02	2.0024867				
S.E.VALLE DE MEXICO-S.E.CHAPINGO		15000		15	4.125	4	0.73	0.4	5.3	3.35	6.91	4.9053583				
S.E.CHAPINGO-S.E.TEXCOCO		12800		12.8	3.52	3	0.62	0.4	4.5	2.85	5.95	3.9376673				
S.E.TEXCOCO-S.E.LA PAZ		23000		23	6.325	6	1.12	0.4	7.8	6.09	10.38	10.9067441				
COC-NODO KCR	3529	1110		4.639	1.275725	1	0.23	0.4	1.9	1.55	2.41	1.7427327				
CORDP-SUC TLALPAN	4372			4.372	1.2023	1	0.21	0.4	1.8	1.52	2.30	1.6988710				
S.E.LA PAZ-S.E.SANTA CRUZ		12000		12	3.3	3	0.59	0.4	4.3	2.68	5.61	3.6326983				
NCORDE-S.E.VILLA DE LAS FLORES	9242			9.242	2.54155	2	0.45	0.4	3.4	2.18	4.41	2.7589418				
NCORDE-CERRO GORDO	8862			8.862	2.43705	2	0.43	0.4	3.3	2.12	4.24	2.6571512				
NODO KCR-S.E.CERRO GORDO		16310		16.31	4.48525	4	0.80	0.4	5.7	3.70	7.47	5.5910835				
NODO IZTAPALAPA-SUC. IZTAPALAPA	3500			3.5	0.9625	1	0.17	0.4	1.5	1.42	1.92	1.5553322				
SUC. IZTAPALAPA-SUC. TLALPAN	3000			3	0.825	1	0.15	0.4	1.4	1.37	1.70	1.4796653				

Tabla 3.1. Cálculos anillo 1.

NOMBRE DEL ENLACE	LONGITUD			Longitud de onda 1500 Perdida total	Longitud de onda 1510 Perdida total	Num de emplames	Perdida empalmes dB	Perdida conectores	Perdida total 1550nm	Conversion dB a mW	Perdida total 1310nm	Conversion dB a mW
	AEREA	SUB.	OPGW									
	TOTAL											
S.E.AZCAPOTZALCO-CENTRO DE IMPRESIÓN POLANCO	3151		3,151	0,866525	1,213135	1	0,15	0,4	1,4	1,39	1,77	1,5020495
NODO LECHERIA-S.E.LA QUEBRADA	3000		3	0,825	1,155	1	0,15	0,4	1,4	1,37	1,70	1,4795653
S.E.LA QUEBRADA-S.E.BARRIENTOS	6647		6,647	1,827925	2,559095	2	0,32	0,4	2,6	1,80	3,28	2,1297758
S.E.BARRIENTOS-FORANEO TLALNEPANTLA	2780		2,78	0,7645	1,0703	1	0,14	0,4	1,3	1,35	1,61	1,4474080
FORANEO TLALNEPANTLA-AGENCIA TLALNEPANTLA	2100		2,1	0,5775	0,8085	1	0,10	0,4	1,1	1,28	1,31	1,3523649
AGENCIA TLALNEPANTLA - S.E. LA LOMA	1600		1,6	0,44	0,616	0	0,08	0,4	0,9	1,24	1,09	1,2864854
S.E.LA LOMA-S.E.CAREAGA	4850		4,85	1,33375	1,86725	1	0,24	0,4	2,0	1,57	2,50	1,7798506
S.E.CAREAGA-S.E.AZCAPOTZALCO	3980		3,98	1,0945	1,5323	1	0,19	0,4	1,7	1,48	2,13	1,6317162
COC-S.E.HUASTECA	1352		1,352	0,3718	0,52052	0	0,07	0,4	0,8	1,21	0,99	1,2550098
S.E.HUASTECA-LAGO ISEO	950		0,95	0,28125	0,38575	0	0,05	0,4	0,7	1,18	0,81	1,2056164
LAGO ISEO-S.E. CERVECERIA MODELO	840		0,84	0,231	0,3234	0	0,04	0,4	0,7	1,17	0,76	1,1824428
S.E.MODELO-S.E.MORALES	2000	1000	3	0,825	1,155	1	0,15	0,4	1,4	1,37	1,70	1,4795653
C.F.E. TENAYUCA - S.E. VALLEJO	5885		5,885	1,618375	2,265725	1	0,29	0,4	2,3	1,70	2,95	1,9736940
S.E.PATERA-SUC.VALLEJO	4950	220	4,57	1,25675	1,75945	1	0,22	0,4	1,9	1,54	2,38	1,7307633
SUC.VALLEJO-NODO KCR	530	2250	2,78	0,7645	1,0703	1	0,14	0,4	1,3	1,35	1,61	1,4474080
S.E. MORALES-CENTRO DE IMPRESIÓN POLANCO	4460		4,46	1,2265	1,7171	1	0,22	0,4	1,8	1,53	2,33	1,7118515
S.E. CEYLAN-OFCINA #211-B STA. CECILIA	1330		1,33	0,38575	0,51205	0	0,06	0,4	0,8	1,21	0,98	1,2522551
OFCINA # 211-B STA. CECILIA-CFE TENAYUCA	1200		1,2	0,33	0,462	0	0,06	0,4	0,8	1,20	0,92	1,2361001
COC-NODO KCR	3529	1110	4,639	1,275725	1,78015	1	0,23	0,4	1,9	1,55	2,41	1,7427327
S.E. VALLEJO - S.E. PATERA	3955		3,955	1,087625	1,52675	1	0,19	0,4	1,7	1,47	2,12	1,6276469
NODO LECHERIA-S.E. CEYLAN	10320		10,32	2,838	3,9732	3	0,50	0,4	3,7	2,37	4,88	3,0736999

Tabla 3.2 Cálculos anillo 2.

NOMBRE DEL ENLACE	LONGITUD			Longitud de onda 1550 Perdida total	Longitud de onda 1310 Perdida total	Num de empujones	Perdida empalmes dB	Perdida conectores	Perdida total 1550nm	Conversión dB a mW	Perdida total 1310nm	Conversión dB a mW
	AEREA	SUB.	OPGW									
			TOTAL									
CENTRAL DE SERVICIOS TOLUCA- GERENCIA TOLUCA (MASSE)	650			0.17875	0.25025	0	0.03	0.4	0.6	1.15	0.68	1.170027
MASSE-COT	2460			0.6765	0.9471	1	0.12	0.4	1.2	1.32	1.47	1.401877
CENTRAL DE SERVICIOS TOLUCA-S.E. TOLUCA	2850			0.78375	1.09725	1	0.14	0.4	1.3	1.36	1.64	1.457563
S.E. TOLUCA-S.E. GENERAL MOTORS	2550			0.70125	0.98175	1	0.12	0.4	1.2	1.33	1.51	1.414536
S.E. VIDRIERA TOLUCA-S.E. CHRYSLER	6300			1.7325	2.4255	2	0.31	0.4	2.4	1.75	3.13	2.057225
S.E. GENERAL MOTORS CO.-S.E. CHRYSLER	2600			0.7115	1.001	1	0.13	0.4	1.2	1.33	1.53	1.421618
S.E. NISSAN-S.E. VIDRIERA TOLUCA	6290			1.73975	2.42165	2	0.31	0.4	2.4	1.75	3.13	2.055171
S.E. NISSAN-S.E. APAPLASTIC	2000			0.55	0.77	0	0.10	0.4	1.0	1.27	1.27	1.338925
S.E. EL CERRILLO-S.E. APAPLASTIC	2200			0.605	0.847	1	0.11	0.4	1.1	1.29	1.35	1.365940
S.E. ESTADIO-COT	4400			1.21	1.684	1	0.21	0.4	1.8	1.52	2.31	1.701623
S.E. ESTADIO-S.E. SAN FRANCISCO	5600			1.54	2.156	1	0.27	0.4	2.2	1.66	2.83	1.918302
AGENCIA METEPEC-AGENCIA PILARES	4600			1.285	1.771	1	0.22	0.4	1.9	1.55	2.40	1.735957
S.E. ATENCO-AGENCIA METEPEC	7300			2.0075	2.8105	2	0.36	0.4	2.8	1.89	3.57	2.273316
S.E. SAN FRANCISCO-AG. PILARES	5600			1.54	2.156	1	0.27	0.4	2.2	1.66	2.83	1.918302
REMEDIOS-TOLUCA 2000	42966			11.81565	16.54191	10	2.10	0.4	14.3	26.99	19.04	80.127436
TOLUCA 2000-EL CERRILLO	10154			2.79235	3.90929	2	0.50	0.4	3.7	2.34	4.80	3.023157
SE. REMEDIOS - SE. AZCAPOTZALCO	4532			1.2463	1.74482	1	0.22	0.4	1.9	1.54	2.37	1.724207
SE. ATENCO-REMEDIOS	59000			15.125	21.175	13	2.88	0.4	18.2	66.19	24.28	266.566590

Tabla 3.3 Cálculos anillo 3.

## CAPÍTULO 4

### CARACTERIZACIÓN Y MEDICIONES EN REDES ÓPTICAS

#### 4.1 Caracterización de redes de fibra óptica

Las características físicas de una fibra óptica nos dan los parámetros necesarios para conocer la capacidad de transporte de señales de luz moduladas que viajan dentro de la fibra óptica así como la capacidad que tiene para comportarse bajo condiciones extremas a ella que pudieran afectar su estructura molecular interna tales como curvaturas, temperatura, humedad, dobleces, estiramientos, etc., junto con esto las fibras cuentan con degradaciones impuestas al momento de ser instaladas como conectores y empalmes.

La demanda por parte de los operadores de redes de telecomunicaciones al utilizar las fibras ópticas como medio de transporte preferido para altas velocidades y grandes distancias, hace que se necesaria una cuidadosa selección de las fibras a utilizar al momento de una nueva implementación DWDM o cuando se quiere explotar la red ya existente para el transporte de señales a alta velocidad.

Para saber el estado actual de las fibras, la identificación de las fibras que son aptas para el transporte a alta velocidad, si hay necesidad de introducir elementos compensadores en las fibras, es necesario realizar mediciones de caracterización en las fibras.

- Pérdidas ópticas (OL), permite medir la atenuación óptica punta a punta para verificar el cumplimiento según las normas del fabricante y la ingeniería de la red para asegurar el adecuado manejo de los presupuestos de la luz (loss budget).
- Localización de eventos (OTDR) esta medición permite conocer la distancia óptica y las pérdidas en la fibra a través de la emisión de pulsos en ambas direcciones y diferentes longitudes de onda. Se grafica el comportamiento de reflexión y atenuación.
- Medidas de dispersión (PMD Dispersión por modo de polarización, CD dispersión cromática) en PMD la luz al viajar en diferentes modos de polarización presenta una diferencia entre la velocidad de propagación que ocasiona que exista una dispersión entre los modos de propagación que pudieran llegara a afectar la calidad de la transmisión, también analiza los límites de las velocidades de transmisión y la integridad de la fibra. En CD los pulsos se ven dispersados en el tiempo al viajar por la fibra. Al utilizar tecnologías DWDM y enlaces de alta velocidad TDM es necesario caracterizar previamente el comportamiento en CD. Analizar los límites prácticos de ancho de banda y presupuestos de dispersión dentro de las fibras.

#### **4.1.1 Mediciones con OTDR (Reflectómetro Óptico en el dominio del tiempo)**

La demanda de fibra óptica en el mundo esta creciendo considerablemente, las redes cada vez son mayores, más confiables y más potentes, lo que aumenta el numero de operadores e instaladores, con el fin de seguir haciendo más eficientes las redes. Un aparato de medición que ha ayudado a este desarrollo es el OTDR (Reflectómetro Óptico en el dominio del tiempo).

El OTDR es el instrumento más adecuado para la caracterización de fibras ópticas en el dominio del tiempo. Es un aparato que puede evaluar las propiedades de una fibra o de un enlace competo. En particular, puede detectar de forma muy rápida pérdidas, fallas y la distancia entre sucesos. El OTDR usa las propiedades de dispersión de un a fibra para determinar la pérdida total. Un pulso de luz de duración muy corta es lanzado a través de la fibra y una porción de ese pulso viaja en dirección a la salida de la fibra, se dispersa y es capturado por la fibra en dirección inversa. El pulso incidente se atenúa mientras viaja en dirección al final de l a fibra. De la misma manera, el pulso que esta viajando en dirección opuesta, se atenúa en igual magnitud. El pulso resultante se atenúa el doble sobre cualquier distancia de la fibra ya que ha viajado de ida y de vuelta.

El desarrollo de OTDR para fibras monomodo ha crecido muy rápido. Los primeros reportes de investigaciones aparecieron en 1980 y a partir de esa fecha se ha mejorado mucho el alcance en distancia de medición. Ahora es posible medir cientos de kilómetros, obviamente dependiendo de la calidad del OTDR.

La traza del OTDR es única para la fibra y los conectores ya que muestra la atenuación en cada punto a lo largo de la fibra.

#### **4.1.2 Sucesos en el OTDR**

El OTDR muestra diferentes graficas para los eventos que suceden en la fibra. La importancia del OTDR al mostrarnos sucesos es que se puede apreciar que es y donde esta.

Una fibra genera la siguiente traza que se aprecia en la figura 4.1. Se puede apreciar el nivel potencia ligeramente decreciente (atenuación) y las fuertes reflexiones al principio y final de la fibra.

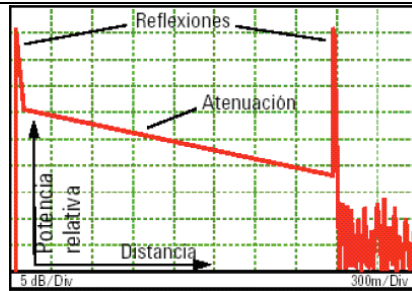


Figura 4.1 Traza del OTDR con solo una reflexión de inicio y otra de fin.

En la figura 4.2 se muestra un enlace completo, se puede apreciar la atenuación y el ruido al final de la fibra.

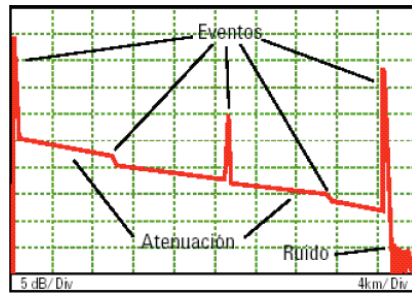


Figura 4.2 Traza con eventos entre dos puntos.

En la figura 4.3 se muestra la reflexión que hay entre un conector o principio de la fibra el cual es llamado pulso de entrada.

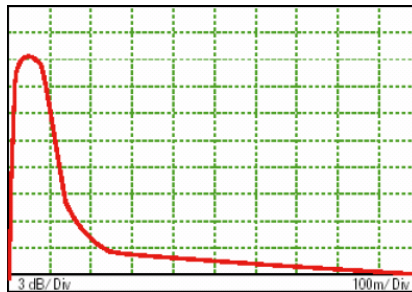


Figura 4.3 Reflexión por inserción (pulso de entrada).



En la figura 4.4 se puede apreciar que al final de una fibra, es una reflexión muy similar a la del inicio esta reflexión es llamada pulso de salida.

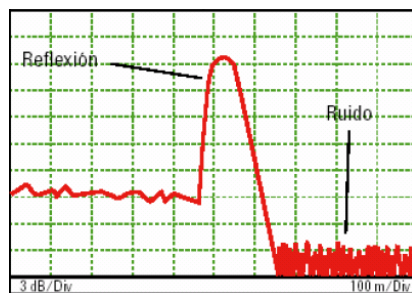


Figura 4.4 Reflexión por fin de fibra (pulso de salida).

También es importante mostrar cuando sucede una ruptura. Se puede ver como prácticamente ya no hay nada más a partir de la pendiente, tiene una pérdida total hasta la zona de ruido.

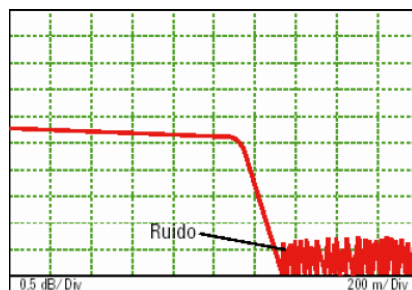


Figura 4.5 Ruptura de una fibra.

Hay otros sucesos como empalmes, pliegues, conectores y fisuras. Las siguientes gráficas muestran trazas con diferentes tipos de sucesos. En la figura 4.6 el pulso que se aprecia es la reflexión causada por un conector y las líneas punteadas muestran la atenuación. En la figura 4.7 se observa la pérdida o atenuación que hay en un empalme de fusión. Hoy en día las fusiones son tan eficientes que no se alcanzan a ver. En la figura 4.8 se aprecia un empalme por fusión, sin embargo, el cambio de características de la segunda fibra favorece en una ganancia de energía. En la figura 4.9 el pulso que se aprecia es una pequeña reflexión causada por una fisura y por consiguiente viene una gran pérdida de energía. En la figura 4.10 se puede apreciar otra forma de medir el inicio de una fibra, conectando un cable intermediario del OTDR al comienzo de la fibra, de forma que se puedan apreciar mejor las primeras muestras del comienzo de una fibra.

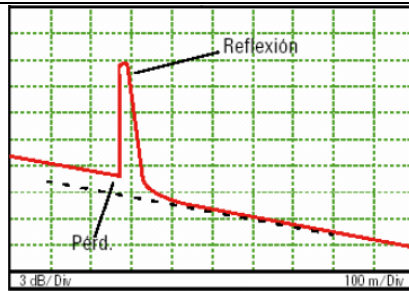


Figura 4.6 Reflexión por conexión.

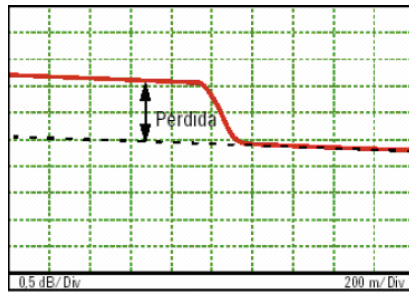


Figura 4.7 Perdida por empalme de fusión.

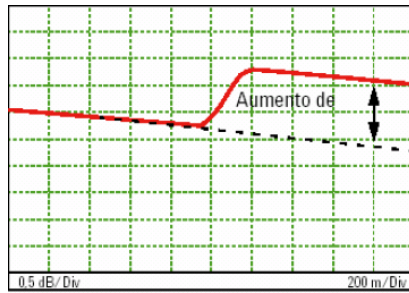


Figura 4.8 Ganancia por empalme de fusión.

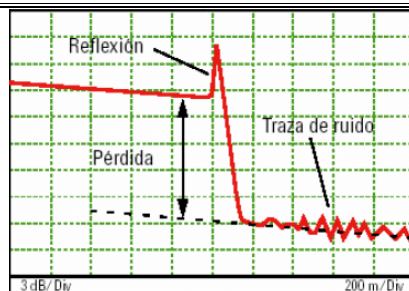


Figura 4.9 Fisura en la fibra.

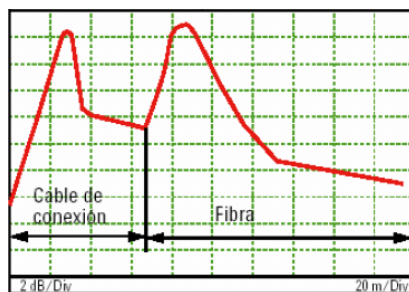


Figura 4.10 Medición de inicio de fibra con un cable auxiliar.

#### 4.1.3 Índice de refracción y coeficiente de dispersión de una fibra

Principalmente el OTDR requiere dos parámetros, el índice de refracción y el coeficiente de dispersión. La forma en que mide las distancias el OTDR es muy sencilla, mide el tiempo en que transcurre entre la emisión de la luz y la reflexión. La distancia que indique y el tiempo medido están relacionados por el índice de refracción o índice de grupo. Por consiguiente cualquier cambio que presente el índice de refracción afectará directamente a la distancia calculada. Este índice depende del material de la fibra y las necesidades estipuladas por el fabricante. Es muy importante conocer el índice de la fibra que se está midiendo, de otra forma el error en los cálculos puede afectar los resultados esperados. Un valor típico es el de 1.4580.

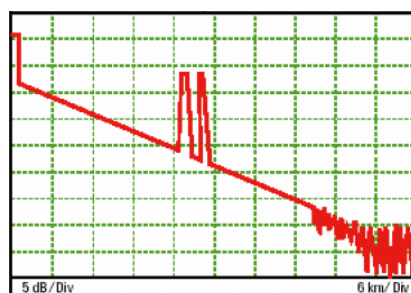
El OTDR no solamente recibe señales de los sucesos si no que también de la fibra en sí. Mientras que la luz viaja a través de la fibra, sufre una atenuación por la dispersión de Rayleigh, la cual es causada por pequeños cambios en el índice de refracción del vidrio. Parte de la luz que viaja se regresa para atrás, a esto se le llama retrodifusión. El coeficiente de dispersión es una medida que sirve para saber cuánta luz se dispersa hacia atrás de la fibra, afecta tanto el valor de la pérdida de retorno, como a las mediciones de

reflectancia. El coeficiente de dispersión se calcula como la relación entre la potencia del pulso de salida del OTDR y la potencia de retrodifusión en el extremo próximo de la fibra. Esta relación se expresa en dB y es inversamente proporcional al ancho del pulso. Como valor típico se proponen 50dB para un ancho de pulso de 1 $\mu$ s.

#### 4.1.4 Ancho de pulso y resolución

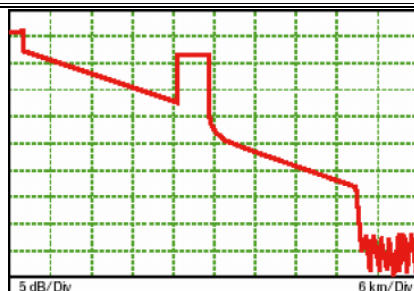
La elección del ancho de pulso adecuado es básica para obtener los mejores resultados en la medición. El hecho de escoger mal un pulso para determinar distancia puede hacer que perdamos de vista sucesos en la traza.

Un pulso corto, nos puede brindar una mayor resolución, sin embargo al realizar una medición dinámica o de mayor alcance con un pulso corto, corremos el riesgo de tener mucho ruido en la medición. En contra parte, si lo que se quiere es hacer una medición de gran distancia, un pulso largo es lo mas recomendable, pero hay que tomar en cuenta que al promediar las mediciones, pasara mas tiempo y por consiguiente la resolución será menor. Dependiendo de la medición que se quiera realizar, ya sea alcance dinámico o resolución, se usara un pulso largo o uno corto, respectivamente. Si lo que se quiere es medir la distancia de una fibra, no es de importancia lo que suceda en el camino, se usar un pulso largo, pero si lo que se requiere es ver lo que pasa en el empalme de un fibra que hay entre un servidor y un router, se usara un pulso corto, para ver el detalle exacto a cortas distancias.



**Figura 4.11.** Traza con pulsos cortos.

Los valores típicos del ancho del pulso para enlaces cortos: 10 $\eta$ s, 30 $\eta$ s, 100 $\eta$ s, 300 $\eta$ s, 1 $\mu$ s. Los valores típicos del ancho del pulso para enlaces largos: 100 $\eta$ s, 300 $\eta$ s, 1 $\mu$ s, 3 $\mu$ s, 10 $\mu$ s.



**Figura 4.12** Traza con pulsos largos.

La definición de las trazas depende en gran parte del ancho del pulso que se escoja. Sin embargo la definición máxima que el OTDR puede brindar no excede las 15 710 muestras, es decir que por más corto que elijamos el pulso, el número máximo de muestras será el mismo en la tabla 4.1 se muestra la relación entre resolución y distancia de la medición.

Duración de la medición	Resolución de muestreo
Hasta 1.2Km.	0.080m.
Hasta 2.5Km.	0.159m.
Hasta 5Km.	0.318m.
Hasta 10Km.	0.613m.
Hasta 20 Km.	1.27m.
Hasta 40Km.	2.56m.
Hasta 80Km.	5.09m.
Hasta 120Km.	7.64m.
Hasta 160Km.	10.18m.
Hasta 200Km.	12.73m.
Hasta 240Km.	15.36m.

**Tabla 4.1** Relación distancia-resolución de muestreo.

#### 4.2 OLTS (optical loss test set) Equipo de prueba de pérdida óptica.

Los OLTS ha sido durante mucho tiempo el principal método de certificación de instalaciones de cableado de fibra óptica. La comprobación se diseña para determinar la cantidad total de pérdida de luz por el enlace de fibra. Otros términos utilizados para referirse a esta tecnología son: pérdida/longitud y medidor de potencia/fuente luminosa (PMLS).

La comparación se realiza con una fuente luminosa estable que produce una onda continua a determinadas longitudes de onda. La fuente luminosa se conecta en un extremo de la fibra. En el extremo opuesto del enlace de fibra se instala un medidor de potencia con un foto-detector. El detector mide la potencia óptica a las mismas longitudes de onda que la fuente luminosa. Estos dos dispositivos determinan la cantidad total de pérdida de luz. Esta certificación de pérdida/longitud se describe en estándares de certificación como el boletín TSB140 de la TIA (Telecommunications Industry Association) como certificación básica o de Nivel 1 necesaria para todos los enlaces de cableado de fibra óptica. Las pruebas de nivel 1 son las de atenuación (pérdida de inserción), longitud y polaridad.



**Figura 4.13** OLTS Equipo de prueba de pérdida óptica EXFO

Una innovación clave de los últimos años es la disponibilidad de módulos de pérdida/longitud de fibra que pueden adjuntarse a juegos de certificación de cobre para hacerles funcionar como un OLTS. Algunos de esos instrumentos pueden certificar dos fibras a la vez para comprobar la polaridad, certificar la longitud de la fibra que se está comprobando y reducir el tiempo necesario para la certificación. La unidad principal del certificador de cobre con el módulo de pérdida/longitud de fibra se utiliza en un extremo de la fibra, y la unidad remota, en el otro. Se establece un nivel de potencia de referencia con latiguillos de referencia antes de separar los dos instrumentos y de conectar uno a cada extremo de la fibra que se va a certificar. A continuación, con solo pulsar un botón, ambas fibras se comprueban a dos longitudes de onda para medir sus longitudes y sus pérdidas y determinar el estado pasa o falla en menos de 12 segundos. Así, la polaridad puede revertirse rápidamente para obtener resultados bidireccionales. Este enfoque propone un método preciso y eficaz para certificar que el enlace de fibra se adapta al presupuesto de pérdida para una aplicación determinada como 10Gbps Ethernet.

---

**CONCLUSIONES**

La fibra óptica utilizada como medio de transmisión en el transporte de información, presenta una gran cantidad de ventajas tales como: gran ancho de banda, baja atenuación, inmunidad electromagnética y seguridad, en comparación con los medios de transmisión guiados y no guiados tradicionales.

La competitividad que en servicios de Telecomunicaciones actualmente se da a nivel mundial, trae consigo la necesidad de disponer de una red escalable, adaptable, confiable y de gran capacidad como la del presente proyecto, con la cual se podrá brindar servicios de telecomunicaciones de mejor calidad.

Los dispositivos DWDM permiten incrementar enormemente la capacidad de los sistemas de transmisión actuales sin requerir de desarrollos tecnológicos significativos y sin alterar las arquitecturas de red implantadas.

Resumidamente, multiplexar por división en longitud de onda consiste en la transmisión por una misma fibra óptica de varios canales de información, cada uno a una longitud de onda distinta. Actualmente la tecnología DWDM es ampliamente utilizada en redes de cable de fibra óptica submarinos internacionales, consiguiendo unas capacidades y funcionalidad extraordinarias.

En este proyecto, se ha realizado la revisión de la tecnología óptica, vislumbrando las características más relevantes de los distintos dispositivos, a tener presente al tratar con señales multiplexadas por división en longitud de onda.

Para la compañía Luz y fuerza del Centro es indiferente la infraestructura mediante la cual se le provea de los servicios que solicitan, lo que requiere es abaratar costos y una mayor calidad. Por este motivo el brindar la red de intercomunicación por fibra óptica que amplíe la existente, proporcionando protección y permita que pueda recibir los servicios sin la necesidad de trabajar proveedores externos a la empresa.

La implementación de la fibra óptica en servicios de voz, datos y video de banda ancha permite alcanzar distancias de hasta 20 km y los problemas de ruido, atenuación e interferencia se minimizan debido al tipo de elementos pasivos que se utilizan.

Debido a que es una tecnología nueva en el mercado de las telecomunicaciones en nuestro país, los costos de implementación y operación todavía son altos, por lo tanto dicha tecnología está dirigida a un segmento de la población con alto poder adquisitivo, aunque a largo plazo se pretende abaratar los costos. Esto se podría lograr aproximadamente después de un año de funcionamiento de la tecnología cuando se haya recuperado la inversión inicial.

DWDM no es dependiente de protocolo, debido a que su operación se realiza en la capa uno del modelo OSI de las redes, básicamente toma las entradas ópticas sin importar el protocolo que esta señal óptica contenga y modula cada señal óptica usando una longitud de onda como portadora, lo que resulta en poder transmitir tantas señales como longitudes de onda soporte el equipo o equipos que se estén utilizando. El ancho de banda soportado para cada señal óptica que es modulada en una longitud de onda, es de 10Gbps, esto quiere decir que en cada longitud de onda podemos transmitir una señal de hasta 10Gbps. Seguramente estas velocidades se verán incrementadas en los próximos años. Los equipos actuales soportan 32 longitudes de onda y están siendo liberados equipos que soportan 80 longitudes de onda en un solo enlace de fibra óptica.

La forma de tendido del cable de fibra óptica vía aérea, es una de las opciones más recomendadas por diferentes razones, entre ellas; es mucho más sencilla frente a otras formas de tendido del cable, menos costosa, su tendido presenta menos curvaturas, y facilita la revisión y corrección de errores ocasionados por roturas en la fibra. No obstante se pueden presentar percances como robos, vandalismo y sabotajes lo que puede ocasionar interrupciones en el servicio, debido a que la fibra y las cajas de empalmes se encuentran a la intemperie.

De los 24 hilos de fibra óptica disponibles, en un inicio solo se utilizarán 2, dejando disponibles 22 para el arrendamiento y explotación de otros servicios de Telecomunicaciones, a parte de los servicios de Transmisión de datos, voz y video que la empresa utiliza, con lo cual se puede aumentar la rentabilidad del proyecto, tomando en consideración que los ingresos por éstos rubros no han sido tomados en cuenta.



## APÉNDICE A INSTALACIÓN DE FIBRA ÓPTICA

### A-1 Instalación aérea del cable de fibra óptica

Los dos métodos preferidos para la instalación aérea son el método de enrollado retractable/fijo y el método de instalación con desplazamiento de carretes o bobinas. Las circunstancias en el sitio de construcción y la disponibilidad del equipo y la mano de obra dictarán el método de tendido de cables a usar.

El método de enrollado retractable/fijo es el método más común de tendido de cables. El cable se coloca desde el carrete yendo hacia arriba por el alambre, tirado por un bloque que solamente viaja hacia adelante y es mantenido en alto por los soportes de cables. Los bucles de exceso (flojedad) se forman de inmediato. El atado de hilos de cables se realiza después de tender los cables.

El método de instalación con desplazamiento de bobinas o carretes puede requerir menos mano de obra y ahorrar tiempo durante el tendido y atado de hilos de cables. En esto, el cable se acopla al alambre y se desenrolla de un carrete alejándose de él. El cable se ata a medida que se tira. Los bucles de exceso (flojedad) se forman durante el atado de hilos de cables. Asegúrese que todos los cables de soporte de poste en las esquinas y los extremos terminales se instalen y tensionen antes del tendido del cable.

Los cables a menudo se enrutan alrededor de esquinas durante el tendido de cables. Un cable más flexible (uno con un radio de curvatura más pequeño) requerirá menos tensión de extracción para pasarlo a través de una curvatura en la ruta. Los mayoría de los cables de fibra óptica se han diseñado para una mayor flexibilidad con el fin de facilitar la instalación. Nunca exceda el radio mínimo de curvatura. Un cable demasiado doblado puede deformarse y dañar la fibra adentro, además de causar una alta atenuación. El radio de curvatura se da como cargado y no cargado. Cargado significa que el cable está bajo la tensión de extracción y está doblándose simultáneamente. Descargado significa que el cable no está bajo ninguna tensión o llega hasta una tensión residual de alrededor de 25% de su máxima tensión de extracción. El radio de curvatura de descargado también es el radio permitido para almacenamiento.

#### A-1.1 Estrategias de extracción de cables

Los cables de fibra óptica se pueden ordenar en longitudes de hasta 12,2 km y se pueden instalar en un tendido continuo. Sin embargo, aun una instalación típica de 3 a 5 millas (4,8 a 8,0 km) ofrece desafíos de instalación debido a la acumulación en la tensión de extracción a lo largo de una trayectoria tan larga. El uso de dispositivos de asistencia intermedia tales como cabrestantes mecánicos conectados a un controlador maestro puede aliviar esta tensión. Sin embargo, si estos dispositivos no están disponibles, una

extracción de cable a medio punto es un método comprobado para instalar grandes longitudes de cables de fibra óptica.



Figura A.1 Medio punto de la instalación.

Instale dos conos de tráfico a 10 - 15 pasos de separación. Desenrolle el cable desde la parte superior del carrete y entrelácelo holgadamente alrededor de los conos siguiendo un diseño en 8. Los bucles grandes y no demasiado ajustados le ayudarán a que el cable no se enrede. Continúe colocando el cable en forma de 8 hasta desenrollar el resto del carrete.



Figura A.2 Desenrollado del cable.

Quite los conos. Prepare el extremo del cable en su mano para extraerlo en la otra dirección. Cuando reanude la extracción, el cable se desenrollará de la parte de arriba de la forma de 8.

### A-1.2 Instalación en configuración de enrollado retractable/fijo

El método de enrollado retractable/fijo es el método usual de tendido de cables. El cable se coloca desde el carrete yendo hacia arriba por el alambre, tirado por un dispositivo que solamente viaja hacia adelante y es mantenido en alto por los soportes de cables. Durante la extracción se forman bucles de exceso. El atado de hilos de cables se realiza después de tender los cables.

### A-1.3 Ubicación de la guía de instalación

La guía de instalación debería colocarse en el primer poste de la ruta del cable o acoplarse al alambre en el primer poste. La ubicación de la guía de cables debería mantener el cable apartado para que no roce el carrete ni el poste. Se puede usar un bloque de esquina de 45° o 90° como guía de instalación.



Figura A.3 Instalación en configuración de enrollado retractable/fijo.

### A-1.4 Instalación del remolque

El remolque debería colocarse en línea con el alambre y a doble distancia de la guía de instalación al piso desde la guía. Esto impedirá que el cable roce el poste (o carrete) o que se acople a la guía. Si el remolque no se puede ubicar allí, mueva la guía de instalación y el remolque del cable a un poste adyacente. El cable debería desenrollarse desde la parte superior del carrete del cable. El desenrollo del cable desde el carrete debería originar una fuerza descendente en el enganche del remolque. Calce las ruedas del remolque. Ajuste los frenos según sea necesario.

## A-2 Enrollado retractable/Fijo Paso del poste y guinche mecánico

### A-2.1 Métodos para el guinche mecánico

La extracción de cable con un guinche mecánico para instalar el cable de fibra óptica es un método que se usa a menudo cuando la línea de poste está obstruida o se encuentra en un terreno extremadamente difícil debido a que la línea de extracción se puede colocar sin preocupaciones de tensión del cable. Al aplicar el guinche, la línea de extracción del cable se coloca en el tirador de cables y va a lo largo del alambre. Los soportes de cable deben colocarse en este momento. Una vez que se tiende la línea de extracción, se acopla al cable de fibra óptica.

### A-2.2 Atadura de cables y cable adicional para empalme y reubicación futura

Deje suficiente cantidad de cable en el primer y último poste al extraer el cable para facilitar el empalme. El cable debería poder alcanzar el suelo, pasar por un camión/remolque de empalme y colocarse en una caja de empalme. Si no está seguro de la longitud del cable, la norma es siempre dejar cable de más y no de menos. Cubra el

extremo del cable abierto para prevenir la contaminación con la suciedad o humedad. Enrolle el cable, teniendo cuidado de no exceder el radio mínimo de curvatura y ate el bucle al alambre alejándolo del poste. Debería apartarse cable adicional y volverse a atar al alambre para facilitar el empalme o la futura reubicación de la línea de postes. Por lo general, un 5% adicional de la extensión total del cable se guarda durante la instalación.

### A-2.3 Acople de la abrazadera de atadura de cables

Coloque el atador en el alambre. Envuelva la atadura de cable dos veces alrededor del alambre en la misma dirección que la vuelta en el alambre y en la configuración del alambre. Pase la atadura de cable entre las arandelas de la abrazadera de atadura de cable, sin sobreponer el cable. Envuelva el cable alrededor de la abrazadera al poste en el lado opuesto de la abrazadera y envuélvalo dos veces alrededor del poste. Corte el cable y acomódelo entre las mitades de la abrazadera de la atadura de cable. Use espaciadores de tamaño apropiado para impedir que el cable de fibra óptica roce contra los accesorios del poste. Use doble atadura con dos o más cables, en los cruces de calles y de ferrocarril. Coloque el cable dentro del atador. Un posicionador de cables se puede colocar adelante del atador de cables para guía adicional a medida que el atador se empuja hacia el carrete.

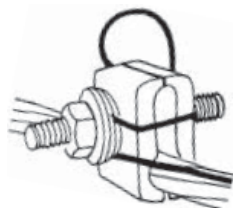


Figura A.4 Abrazadera de atadura.

### A-2.4 Paso del atador de cables en el poste

Tire del atador hacia el poste para pasarlo. Acople una abrazadera para atadura de cables al alambre. Quite el atador de cables del alambre y muévalo a lo largo de la cara del frente del poste al alambre y cable en el lado opuesto del poste. Coloque el cable en el atador. Cierre los portales para prevenir que el atador se retraiga a lo largo del alambre. Corte el alambre de atadura desde el atador y asegure la atadura a la abrazadera. Asegúrese que la atadura de cables no se afloje desde alrededor del cable. Acople los sujetadores y espaciadores adecuados, según necesite. En el extremo posterior del atador, acople una abrazadera al alambre que está por atar. Acople la atadura de cable a la abrazadera. Continúe con el atado como antes. Con cuidado haga rotar el carrete del cable para guardar cualquier flojedad del cable antes de atar cada sección.

No ate el cable demasiado ajustado. Aunque los cables de fibra óptica se expanden mucho más que los cables coaxiales, debe permitírseles contraerse y expandirse a lo largo del alambre o el cable podrá pandearse y fallar. También recuerde dejar un pequeño bucle para aliviar la tensión.



Figura A.5 Paso del atador de cables en el poste.

### A-2.5 Método de instalación con desplazamiento de carrete y atadura de cables

En el método de instalación con desplazamiento de carrete, el cable se acopla al alambre y se desenrolla al alejar el carrete del mismo. El cable se ata a medida que se tira. Durante la atadura se guardan los bucles de cable adicional .

Desenrolle el cable desde la parte superior del carrete haciéndolo rotar hacia la parte posterior del remolque de cable. Acople una abrazadera para atadura de cables al alambre 1 a 1.5 metros desde el poste. Coloque el atador de cables sobre el alambre y acople la atadura de cables a la abrazadera correspondiente. Coloque la guía de instalación al frente del atador de cables y acóplela al atador con un empujador de bloques. Acople la línea de extracción a la guía de instalación o atador de cables. Enhebre el cable a través de la guía de instalación y colóquelo en el atador de cables.

El cable debería trasladarse solamente a lo largo de la guía. Si la línea de postes no está centrada con respecto al carrete, observe el cable cuidadosamente a medida que viaja por la guía. La oscilación del carrete de cable puede hacer que el cable se desgaste en el borde del carrete y que el cable en la guía se enganche.

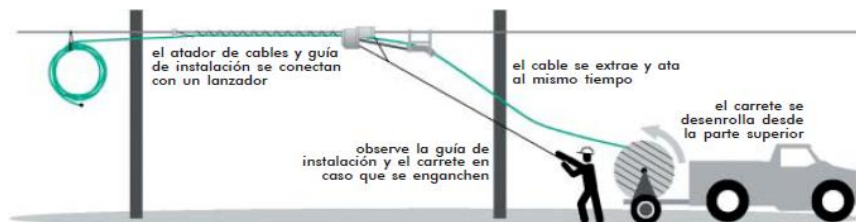


Figura A.6 Método de instalación con desplazamiento de carrete y atadura de cables.

### A-2.6 Paso por el poste

Permita que un bucle libere la tensión de cable. Detenga el atador de cables a alrededor de 1 metro del poste. Deje un bucle de 5 a 10cm en los accesorios del poste para alivio de tensión. Acople una abrazadera para atadura de cables al alambre. Desconecte la guía de instalación y el atador de cables y páselos a lo largo del frente del poste. Colóquelos en el alambre sin atar lo suficientemente alejados del poste como para acomodar un pequeño bucle de alivio de tensión. Vuelva a montar la guía de instalación y el atador de cables. Cierre los portales del atador. Corte las ataduras de cable y asegúrelas a la abrazadera. Asegúrese de que la atadura de cables no se afloje alrededor del cable. Acople al alambre otra abrazadera para la atadura en el lado sin atar del poste, permitiendo suficiente distancia para un alivio de tensión o equipo. Conecte el cable desde el atador a la nueva abrazadera. Coloque el cable en la guía de instalación y el atador de cables. Haga rotar el carrete de cable para guardar el cable extra. Continúe hasta completar la instalación.

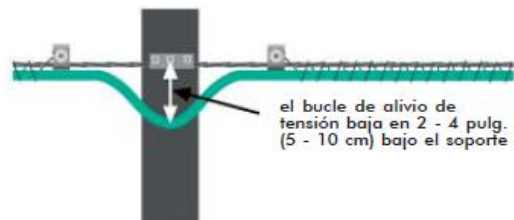


Figura A.7 Bucle de alivio de Tensión.



Figura A.8 Paso por el poste.

### A-2.7 Instalación del cable autoportado

#### A-2.7.1 Método el de instalación con desplazamiento de carrete

El método de desplazamiento es la manera más simple de colocar el cable de tubo central autoportado. Acople el cable al accesorio de la línea de poste en el primer poste del tendido de cable. Deje suficiente cable adicional para facilitar el empalme. El cable debería poder alcanzar el suelo, pasar por un camión remolque de empalme y colocarse en una caja de empalme. Conecte a tierra y acople el blindaje al primer poste. El contacto con el blindaje se establece mediante una abrazadera serrada que perfora la chaqueta para alcanzar el blindaje. Los soportes de cable deberían instalarse en todos los

postes no enmarcados en configuraciones de accesorios terminales. Desenrolle el cable desde arriba del carrete y colóquelo manualmente en el soporte de cable. Continúe desenrollando el cable lenta y uniformemente para mantener una tensión pareja de extracción. Si la extracción del cable es inconsistente, esto puede hacer que el cable se balancee y se dañe en los bloques del poste. No permita que el carrete del cable sobregire y deje que la flojedad del cable se quite del carrete. Levante el cable de los soportes del cable y colóquelo en la abrazadera de suspensión una vez que la ruta del cable se haya tensionado según las instrucciones. Tensione el cable cada vez que se presenten configuraciones de accesorios terminales. Conecte a tierra y acople el blindaje en estas ubicaciones después de haber tensionado el cable.



Figura A.9 Instalación del cable autoportado con el método de instalación con desplazamiento de carrete.

### A-2.8 Enrollado retractable/Fijo

Debido a que es difícil conectar a tierra el cable de tubo central autoportado durante el enrollado retractable, deberán tomarse medidas de precaución durante la instalación. Esto es particularmente cierto si el derecho de paso se comparte con cables de alimentación.

El remolque debería colocarse en línea con el alambre y a doble distancia de la guía de instalación al piso desde la guía. Esto impedirá que el cable roce el poste (o carrete) o que se acople a la guía. Si el remolque no se puede ubicar allí, mueva la guía de instalación y el remolque del cable a un poste adyacente. El cable debería desenrollarse desde la parte superior del carrete del cable. El desenrollo del cable desde el carrete debería originar una fuerza descendente en el enganche del remolque.

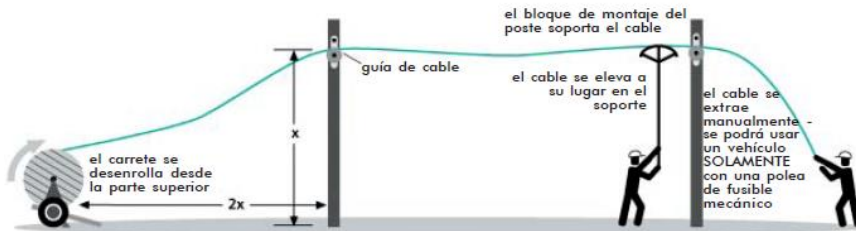


Figura A.10 Instalación del cable autosoportado con método de Enrollado retractable/Fijo.

### A-3 Instalación del cable de fibra óptica en conducto

El conducto debería instalarse en una vía tan derecho como fuera posible, las ondulaciones en el sistema de conducto aumentan las tensiones de extracción debido a la presión de la pared lateral. Los sistemas de conducto existentes por lo general requieren algún tipo de mantenimiento antes de colocar los cables en el conducto. Siempre limpie la ruta de cables antes de la instalación. Use una máquina de separación de guideras para quitar los desperdicios y el agua del conducto. Una exploración de la ruta del cable dictará el esquema de colocación del cable que debería explicar la dificultad de la extracción, mano de obra y disponibilidad del equipo. El radio de curvatura en los sistemas de conducto debería ser lo suficientemente largo como para prevenir la tensión de extracción excesiva debido a la fricción de pared lateral. Se recomienda el uso de lubricantes de extracción para reducir la fricción y la tensión de extracción. Las curvaturas de radio muy pequeño pueden impedir inclusive que un cable tan flexible se extraiga satisfactoriamente.



Figura A.11 Extracciones largas a través del conducto, técnica de extracción a medio punto

#### A-3.1 Sople o empuje neumático del cable de fibra óptica

Este proceso usa una combinación de presión de aire y una pequeña unidad para empujar el cable de fibra óptica a través de un conducto. Es más eficaz cuando se coloca en un cable individual. Debido a que el cable no se extrae, la tensión de extracción no es una preocupación. Coloque el carrete de modo que el desenrollo se realice desde la parte superior y esté en una línea lo más derecha posible con la entrada al conducto. El aire a menudo pasa al conducto y la acción de empuje neumático ayuda a elevar el cable con un esfuerzo mínimo.



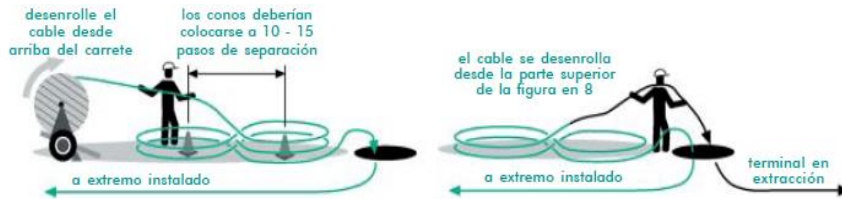


Figura A.12 Desenrollado del cable.

Ubique el punto medio de extracción. A la vez de monitorear la tensión, tire el cable desde el medio punto al extremo de una dirección. La extracción puede ser asistida en un bóveda intermedia por un cabrestante o asistente.

### A-3.2 Largas extracciones a través del conducto

#### A-3.2.1 Extracción en etapas a ubicaciones intermedias

Ubique el punto medio de extracción. Mientras monitorea la tensión, tire del cable del punto medio a una bóveda o boca de inspección a punto medio. Enrolle el cable hacia arriba, hasta la superficie.



Figura A.13 Extracción en etapas a ubicaciones intermedias.

---

**GLOSARIO**

<b>APS</b>	(Automatic Protection Switching) Protección Automática de Conmutación
<b>ASE</b>	(Amplified Spontaneous Emission) Amplificación de Emisión Espontánea
<b>ATM</b>	(Asynchronous Transfer Mode) Modo de transferencia Asincrona
<b>BER</b>	(Bit Error Ratio) Negro de Bits Incorrectos
<b>CATV</b>	(Community Antenna Televisión) Televisión por Cable
<b>DBR</b>	(Distributed Bragg Reflector) Reflector de Bragg Distribuído
<b>DCMS</b>	(Dispersion Compensation Modules ) Módulos de Compensación de Dispersión
<b>DGEFs</b>	(Dynamic Gain Equalization Filters) Filtros de Ecuación de Ganancia Dinámica
<b>DRA</b>	(Distributed Raman Amplification) Amplificación de Raman Distribuida
<b>DWDM</b>	(Dense wavelength Division Multiplexing) Multiplexación por división en longitudes de onda densas
<b>EDFA</b>	(Erbium Doped Fiber Amplifier) Amplificador de fibra dopada con Erblio
<b>FEC</b>	(Forward error Correction) Mecanismo de Corrección de Errores
<b>FWM</b>	(Four-Wave Mixing) Mezcla de cuarto de onda
<b>GMPLS</b>	(Generalized Multiprotocol Label Switching) Conmutación Multi-Protocolar mediante Etiquetas General
<b>ISI</b>	interferencia ínter símbolo
<b>LWPF</b>	(Low Water Peak Fiber) Fibra sin pico de agua
<b>MPLS</b>	(Multiprotocol Label Switching) Conmutación Multi-Protocolar mediante Etiquetas
<b>NDF</b>	(Negative Dispersion Fiber) Fibras de dispersión negativa
<b>NZDF</b>	(Nonzero Dispersion Fiber) Fibra de dispersión de no paso por cero
<b>OADM</b>	(Optical add-drop Multiplexer) Multiplexor Ópticos de Aumento y Disminución
<b>OCh</b>	(Optical Channel) Capa de Canal óptico
<b>OLTS</b>	(Optical Loss Test Set) Equipo de prueba de pérdida óptica
<b>OMS</b>	(Optical Multiplex Section) Capa de Sección de Multiplexación Óptica
<b>OPGW</b>	(Optical Power Ground Wire) Sistema de cable compuesto tierra-óptico
<b>OSNR</b>	(Optical Signal-To-Noise Ratio) Relación señal-ruido óptica

---

<b>OTDR</b>	(Optical Time Domain Reflectometer) Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo
<b>OTS</b>	(Optical Transmission Section)Capa de Sección de Transmisión Óptica
<b>OVERLAY</b>	Modelo basado en una interfaz usuario red que no integra el plano de encaminamiento de los paquetes de datos.
<b>OXC</b>	(Optical Cross Connect) Conexión Óptica Cruzada
<b>PC (conector)</b>	(Physical Contact) Contacto Físico
<b>PDH</b>	(Plesiochronous Digital Hierarchy ) Jerarquía Digital Plesiócrona
<b>PMD</b>	(Phase Modulation Dispersion) Dispersión por modo de polarización
<b>QAM</b>	(Quadrature Amplitude Modulation) Modulación de Amplitud en Cuadratura
<b>RDS</b>	(Radio Data System)
<b>SC (conector)</b>	(Subscriber Connector) Conector Suscriptor
<b>SMF</b>	(Single Mode Fiber) Fibra Mono Modo
<b>SONET</b>	(Synchronous Optical Network) Red óptica Sincrona
<b>SPM</b>	(Self Phase Modulation) Auto Modulación de Fase
<b>SRS</b>	(Stimulated Raman Scattering) Dispersión Estimulada de Raman
<b>SSMF</b>	(Standar Single Mode Fiber) Fibra Estándar Mono Modo
<b>ST (conector)</b>	(Straight tip) Punta recta
<b>TDM</b>	(Time Division Multiplexing) Multiplexación por división de tiempo
<b>VSF</b>	(Vestigial Side Band) Modulación de banda lateral vestigial
<b>WDM</b>	(Wavelength Division Multiplexing) Multiplexación por división de longitud de onda
<b>XPM</b>	(Cross-Phase Modulation) Modulación por fase cruzada

---

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AGRAWAL Govind P. Applications of Nonlinear Fiber Optics. E.U.A. Ed. Academic Press. 2001.

CAPMANY, José F. y Beatriz Ortega Tamarit. Redes Ópticas. Valencia, Ed. Universidad Politécnica de Valencia. 2006.

CAPMANY, José y Beatriz Ortega Tamarit. Sistemas de Comunicaciones Ópticas. Valencia, Ed. Universidad Politécnica de Valencia. 2006.

CRISP, John, Introduction to Fiber Optics. Ed. Newnes, 2001.

DECUSATIS, Casimir. Fiber Optic Data Communication: Technological Trends and Advances. China, Ed. Academic Press, 2002.

DECUSATIS, Casimer. Handbook of Fiber Optic Data Communication. China, Ed. Academic Press, 2002

ELIOT, Barry y Mike Gilmore. Fiber Optic Cabling. Ed. Newnes, Segunda edición, 2002.

ESPAÑA, María Carmen. Comunicaciones ópticas: Conceptos esenciales y resolución de ejercicios. Ed. Ediciones Díaz de Santos, 2005.

KAMINOV, Ivan P. y Thomas L. Koch. Optical Fiber Telecommunications IIIA. E.U.A. Ed. Academic Press. 1997.

KAMINOV, Ivan P. y Thomas L. Koch. Optical Fiber Telecommunications IIIB, E.U.A. Ed. Academic Press. 1997.

KAMINOW, Ivan P., Tingye Li. Optical Fiber Telecommunications IVA: Components. China, Ed. Academic Press, 2002.

KAMINOW, Ivan P., Tingye Li. Optical Fiber Telecommunications IVB: Systems and Impairments. China, Ed. Academic Press, 2002.

KELLEY, Paul L., Ivan P. Kaminow y Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics. 3ª ed. E.U.A. Ed. Academic Press, 2001.

THRIOHMTEC, Servicio de Caracterización de Fibras Ópticas. México, 2008.

TOMASI, Wayne, Gloria Mata Hernández, Virgilio García Bisogno y Virgilio González Pozo. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Ed. Pearson Educación.2003.

Manual de Construcción y Aplicaciones de Banda Ancha: Cable de Fibra Óptica. CommScope.

### **REFERENCIAS ELECTRÓNICAS**

Cinit, (<http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=1>), Luis Gabriel Sienna, 2001.

Fiberco(<http://www.fibra-optica.org/>)

Wikipedia ([http://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_cross-connect](http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_cross-connect)), E.U.A. 2008.

Wikipedia ([http://en.wikipedia.org/wiki/Wavelength-division\\_multiplexing](http://en.wikipedia.org/wiki/Wavelength-division_multiplexing)), 2009.

Wikipedia ([http://es.wikipedia.org/wiki/Cable\\_de\\_fibra\\_óptica](http://es.wikipedia.org/wiki/Cable_de_fibra_óptica)), 2009.

Wikipedia ([http://es.wikipedia.org/wiki/Técnicas\\_de\\_verificación\\_de\\_fibra\\_óptica](http://es.wikipedia.org/wiki/Técnicas_de_verificación_de_fibra_óptica)).