

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

---

---

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**  
**INGENIERIA EN ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES**

**TOPICOS SELECTOS DE FIBRA OPTICA**

**MONOGRAFIA**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES**

**PRESENTA:**

**HINOJOSA GOMEZ LUIS CARLOS**

**ASESOR: ING. FRANCISCO JAVIER CUELLAR ORTEGA**

**PACHUCA, HGO, MEXICO 2007**

## **Agradecimientos**

El trabajo que se presenta en esta monografía, no es un esfuerzo individual. Ayuda de todos los tipos (ya sea económica, administrativa, social, investigación y otras) me fue dada de manera muy generosa, y es por esto que quiero tomar la oportunidad para reconocer las contribuciones de todos aquellos que aportaron algo en este trabajo.

A Jesucristo. Por darme el regalo de la vida y por permitirme llegar hasta aquí.

A mis padres. Gracias por todos sus esfuerzos para hacerme llegar a este punto de mi vida, por darme los valores que me hacen la persona que soy, por darme los medios para terminar mis estudios.

A mi hermano Humberto. Por darme el empuje y ayuda cuando lo necesitaba.

A los abuelitos, tíos, primos y demás. Por el apoyo, ayuda y afecto que siempre he recibido.

A Yaztmin Cruz Guerrero. Gracias por compartir conmigo el último año de la Universidad, por ayudarme con éste trabajo, por enseñarme cosas nuevas y contagiarme con esa alegría tan peculiar pero sobre todo por ser especial.

A Emmanuel Peláez Gil. Compadre, gracias por ser un gran apoyo, por confiar en mí, por tu sinceridad y seriedad.

Al Ing. Francisco Javier Cuellar Ortega, por el interés y dedicación a lo largo del desarrollo del trabajo, pero sobre todo gracias por los sabios consejos brindados y por ser un gran amigo y creer en mí.

Al Ing. Cristina Rodríguez Flores, por brindarme su amistad además de permitirme convivir con su familia, gracias por el soporte y apoyo en muchas ocasiones.

A los camaradas de la generación, Ali, Moni, Caro, Jarubi, Waldo, Peláez, Darío, Barragán, Geovany, Luis Salvador. Gracias por brindarme su apoyo y amistad.

A los compañeros de la Dirección de Telecomunicaciones de la UAEH, Alex, Xochitl, Emmanuel, los huastecos, Mayorico, gracias por permitirme formar parte de un grupo muy unido, pero sobre todo donde encontré muy buenos amigos.

A Waldo y Julio, por todas las tardes llenas de diversión y buen humor que pasamos compartiendo un domicilio.

Tener un amigo es un don, conservar a un amigo es una virtud y para mi es un honor el que me permitieran ser su amigo, GRACIAS A TODOS.

**Índice General**

Índice de figuras	i
Índice de tablas	vi
Introducción	vii
Objetivos	xi
Justificación	xii
Capítulo 1: Introducción a los sistemas ópticos	
1.1 Naturaleza de la luz	1
1.2 Fibra óptica	3
1.2.1 Forma de propagación de la información (luz) en la fibra óptica	5
1.2.2 Tipos de fibras ópticas	6
1.3 Redes ópticas e Internet	13
1.3.1 Elementos de un enlace fotónico	14
1.3.2 Multiplexado por división de longitud de onda	16
Capítulo 2: Degradación de la señal en la fibra óptica	
2.1 Atenuación	18
2.1.1 Pérdidas por absorción del material	21
2.1.1 Pérdidas lineales por dispersión espacial	25
2.1.3 Pérdidas no lineales por dispersión	27
2.1.4 Pérdidas por curvas de la fibra óptica	31
2.1.5 Pérdidas por conexión y empalmes	32
2.2 Dispersión temporal	34
2.2.1 Dispersión temporal intramodal	36
2.2.2 Dispersión temporal intermodal o modal	37
2.2.3 Dispersión del modo polarizado	38
2.3 Ventanas de operación u ópticas	39

---

Capítulo 3: Fuentes, receptores y amplificación óptica	
3.1 Fuentes ópticas	41
3.1.1 Diodo emisor de luz “LED”	43
3.1.2 El diodo láser (LD)	46
3.1.3 Circuitos de excitación	50
3.2 Detectores fotónicos	53
3.2.1 Tipos de detectores	54
3.2.2 Propiedades de los detectores fotónicos	55
3.2.3 Tipos de fotodetectores	57
3.2.4 Ruido en fotodetectores	64
3.2.5 Receptores ópticos	65
3.2.6 Tendencias	69
3.3 Amplificadores ópticos	70
3.3.1 Amplificadores ópticos de semiconductor (SOA)	70
3.3.2 Amplificadores de fibra dopada (DFA’s)	71
3.3.3 Amplificadores de fibra dopada con Erblio (EDFA)	74
3.3.4 Amplificadores de fibra dopada para oros rangos de longitud de onda	81
3.3.5 Amplificador óptico Raman	81
Capítulo 4: Empalmes y conectores de fibra óptica	
4.1 Empalmes	87
4.1.1 Principales causas de pérdidas en empalmes	88
4.1.2 Corte de la fibra	89
4.1.3 Tipos de empalmes	89
4.1.4 Técnicas de alineamiento de fibras	95
4.1.5 Protección del empalme	97
4.1.6 Máquinas de empalme de fibras	99
4.1.7 Realización de un empalme	100
4.2 Conectores	107
4.2.1 Partes de los conectores para fibra óptica	107
4.2.2 Parámetros de los conectores	109

---

4.2.3 Fuentes de pérdidas en los conectores	110
4.2.4 Tipos de pulido	112
4.2.5 Clasificación de los conectores ópticos	114
4.2.6 Instalación de conectores ópticos para fibra	120
Capítulo 5: Sistemas de transmisión	
5.1 Asynchronous Transfer Mode (ATM)	127
5.1.1 Tecnología ATM	128
5.2 Introducción a SONET	129
5.2.1 Sincronización de señales digitales	130
5.2.2 Señal básica SONET	131
5.2.3 Síncrono VS Asíncrono	132
5.2.4 Formato de estructura de trama	134
5.2.5 Multiplexado SONET	139
5.2.6 Elementos de red SONET	140
5.2.7 Configuraciones SONET	146
5.3 Introducción a PDH y SDH	149
5.3.1 Características de PDH	149
5.3.2 Características de SDH	150
5.3.3 Velocidades de SDH	151
5.3.4 Descripción general	152
5.3.5 Multiplexación SDH	153
5.3.6 Encabezados de trayecto	153
5.3.7 Estructura de trama STM – 1	154
5.3.8 Módulo de transporte síncrono de orden 1 (STM – 1)	154
5.3.9 Mapeo	155
5.3.10 Apuntadores	156
5.3.11 Encavezados de VC – 4	157
5.3.12 Formación de una trama STM – 1 a partir de 2Mbps	157
5.3.13 Elementos de una red de transporte SDH	158
5.4 Introducción a WDM	160

---

5.5 Redes ópticas WDM	164
5.6 Redes ópticas basadas en CWDM	168
Capítulo 6: Mediciones y procedimientos	
6.1 Testeo de empalmes	173
6.1.1 OTDR	173
6.1.2 Aceptación del empalme	173
6.1.3 Medición de pérdida total	175
6.2 Medición de pérdidas en los empalmes	176
6.2.1 Atenuación por tramo	176
6.2.2 Atenuación por empalme	176
6.3 Ejemplos de mediciones y equipo para empalme	177
6.3.1 Medición de atenuación total de un tramo (Medición de potencia)	177
6.3.2 Medición de atenuación por conectores	178
6.3.3 Equipo básico para mediciones ópticas	180
6.4 Medición de PMD	182
6.4.1 Procedimiento para medir la PMD	183
6.4.2 Interpretación de resultados	184
Capítulo 7: Componentes y redes de alta capacidad	
7.1 Redes ópticas de larga distancia	185
7.1.1 Ventajas	185
7.1.2 Retos	186
7.1.3 Problemas	186
7.1.4 Tecnología WDM en las OTN	186
7.1.5 Ruido en sistemas de LD amplificadas	187
7.1.6 Formatos de modulación utilizados en redes de LD	188
7.2 Componentes ópticos	188
7.2.1 Terminales de línea ópticas (OLT's)	188
7.2.2 Multiplexores ópticos Add/Drop	189
7.2.3 Filtros ópticos	193

7.2.4 Matriz de conmutación óptica u optical cross connect (OXC)	198
7.2.5 Conversores de longitud de onda	200
Conclusiones	203
Glosario	205
Bibliografía	217

**Índice de figuras**

1.1 Espectro electromagnético de frecuencias	1
1.2 Longitudes de onda utilizadas en comunicaciones ópticas	3
1.3 Partes componentes de la fibra óptica	5
1.4 Reflexión interna total	6
1.5 Fibra de índice escalonado	8
1.6 Perfil de la fibra de índice gradual	9
1.7 Fibra monomodo	10
1.8 Fibra monomodo del tipo step – index	11
1.9 Ejemplo hipotético de una troncal de Internet	14
1.10 Link fotónico típico	15
1.11 Enlace típico WDM	17
2.1 Espectro de atenuación teórico para la mecanismos de pérdidas intrínsecas	22
2.2 Espectro de absorción del ión OH <sup>-</sup> en la sílice	24
2.3 Espectro de atenuación medido para una fibra monomodo	25
2.4 Potencia máxima por canal para evitar la influencia defectos no lineales	29
2.5 Pérdidas por curvaturas y micro curvaturas	32
2.6 Defectos en el alineamiento de las fibras	33
2.7 Representación esquemática del ensanchamiento de los pulsos de luz	34
2.8 Representación de una fibra abrupta, gradual multimodo y abrupta monomodo	35
2.9 Representación gráfica de la dispersión por modo de polarización	38
2.10 Pérdidas totales en función de la longitud de onda	39
3.1 LED de perfil y superficie	44
3.2 Representación de acoplamientos LED – fibra óptica	45
3.3 Estructura de un diodo láser y espectro de radiación	48
3.4 Construcción de un láser VCSEL	49
3.5 Curva característica de un diodo láser	49
3.6 Efectos de la temperatura en un diodo láser	50
3.7 Esquema básico de un dispositivo foto detector	54
3.8 Esquema básico del funcionamiento de un fotoconductor	58
3.9 Esquema básico del funcionamiento de un fotodiodo p –n	59

---

3.10 Esquema de un fotodiodo pin	61
3.11 Esquema de un fotodiodo de avalancha	62
3.12 Distribución del campo eléctrico en un APD	63
3.13 Esquema general de un receptor	65
3.14 Amplificador de alta impedancia	66
3.15 Amplificador de transimpedancia	66
3.16 Diagrama de ojo	68
3.17 Esquema de un SOA	71
3.18 Diagrama a bloques de un EDFA	75
3.19 Diagrama de un EDFA de dos etapas con acceso medio entre etapas	77
3.20 Aplicaciones de un EDFA	79
3.21 Compensación de pérdidas en redes ópticas	80
3.22 Espectro de ganancia óptica de un amplificador óptico híbrido	81
3.23 Espectro transmitido de DWDM con seis longitudes de onda	83
3.24 Espectro recibido después de aplicar la SRS en una fibra larga	83
3.25 Configuración típica de un amplificador Raman	84
3.26 Ejemplo de un espectro recibido de un amplificador Raman	85
3.27 Ejemplo de un espectro recibido	85
4.1 Alineamiento de fibras mediante ranuras en V	90
4.2 Empalme de múltiples fibras utilizando varillas de cristal y adhesivos	91
4.3 Empalme mecánico mediante abrazadera y varillas	91
4.4 Empalme mecánico mediante abrazadera y ranuras en plástico	92
4.5 Procedimiento de empalme de fibras por fusión	93
4.6 Mangas termocontráctiles	97
4.7 Caja de empalmes	98
4.8 Máquina empalmadora RSU 12 de Ericsson	99
4.9 Procedimiento ilustrado de la realización de un empalme	104
4.10 Ilustración de las zonas de lijado para el sellado	105
4.11 Colocación del termocontraíble	105
4.12 Representación del cambio de coloración de los pigmentos de vulcanizado	106
4.13 Sellado de la entrada a la caja de empalme	106

---

4.14 Partes de un conector óptico	108
4.15 Fuentes de pérdidas en los conectores	111
4.16 Tipos de pulido para conectores ópticos	112
4.17 Conectores FC y adaptadores	115
4.18 Conector óptico SMA	116
4.19 Conector D4	116
4.20 Conector bicónico	117
4.21 Conectores SC y adaptador	118
4.22 Conector LSH	118
4.23 Conectores ST	119
4.24 Defectos en la cara final de la fibra	121
4.25 Fibra multimodo bien cortada	122
4.26 Técnica de pulido	122
4.26 Conector dañado por una alta potencia óptica	124
5.1 Formato de trama de la señal STS – 1	135
5.2 Estructura de la trama STS – 1	137
5.3 STS – 1 SPE en el interior de tramas STS – 1	138
5.4 Estructura de trama STS – N	138
5.5 Estructura básica de multiplexado SONET	140
5.6 Multiplexor Terminal	141
5.7 Regenerador	141
5.8 Multiplexor Add/Drop	142
5.9 Wideband Digital Cross – Connects	144
5.10 Conexión cruzada digital de Broadband	145
5.11 Digital Loop Carrier	146
5.12 Configuración Punto a Punto	146
5.13 Configuración punto a multipunto	147
5.14 Configuración de Hub network	147
5.15 Arquitectura de anillo	148
5.16 Estructura de trama de una señal SDH de nivel 1	154
5.17 Mapeo de una señal SONET a 2Mbps	159

---

5.18 Red TDM/WDM	161
5.19 Ejemplo de restauración del servicio en una red óptica WDM en malla	164
5.20 Utilización de los conmutadores en un esquema de protección	164
5.21 Multiplexación por división de tiempo	165
5.22 Multiplexación por división de longitud de onda	165
5.23 Evolución redes WDM, DWDM	168
5.24 Costes relativos CWDM vs DWDM	169
5.25 Planificación de canales en sistemas CWDM	170
6.1 Medición de empalmes promediados	176
6.2 Representación de atenuaciones controladas	177
6.3 Medición de la atenuación total de un tramo	178
6.4 Ejemplo de una medición de atenuación total	178
6.5 Medición de la atenuación producida por conectores	179
6.6 Medidor con ambos módulos (emisor y receptor)	180
6.7 Fuentes y medidores ópticos	180
6.8 Atenuador EXFO	181
6.9 Identificador de fibras y fallas Wavetek VFF5	181
6.10 Detector de tráfico EXFO LFD – 200	182
6.11 Conexión para la medición de PMD	184
7.1 Esquema representativo de una terminal de línea óptica	189
7.2 Conexión de dos nodos mediante 2 enlaces punto a punto	190
7.3 Esquema de utilización de un OADM	190
7.4 Configuración paralelo, conmutación de longitud de onda	191
7.5 Configuración paralelo, conmutación de banda	191
7.6 Configuración serie, conmutación de longitud de onda	192
7.7 Configuración serie, conmutación de banda	192
7.8 Funcionamiento de un FBG	193
7.9 Selección de una longitud de onda específica con un FBG	194
7.10 OADM implementado con un FBG	194
7.11 Estructura de funcionamiento de un TFF	195
7.12 Utilización de un TFF como OADM	196

7.13 Filtro acústico – óptico	196
7.14 Filtro Mach – Zehnder	197
7.15 Filtro AWG	197
7.16 OXC con núcleo eléctrico	198
7.17 OXC con núcleo óptico y conversores E/O/E	199
7.18 OXC con núcleo óptico conectado directamente a transponedores WDM	199
7.19 OXC todo óptico	199
7.20 Conversión optoelectrónica	201
7.21 Conversión optical gatin	202
7.22 Conversión interferométrica	202
7.23 Conversión con mezclado	202

**Índice de tablas**

1.1 Longitud de onda de cada color componente de la luz blanca	2
1.2 Parámetros de fibra multimodo de índice escalonado	7
2.1 Porcentaje de potencia de salida en función de la pérdida en dB	19
2.2 División de la atenuación según el factor que la produce	21
2.3 Tipos de impurezas	23
3.1 Comparativa de las características de un LED y un láser típicos	43
3.2 Materiales utilizados en la fabricación de LED's y sus características	44
4.1 Pérdidas por inserción en los distintos tipos de conectores	89
4.2 Características de la máquina empalmadora RSU 12 de Ericsson	100
5.1 Jerarquía SONET	132
5.2 Jerarquía no síncrona	132
5.3 Ordenes de multiplexación	151
5.4 Comparación entre tecnologías WDM según el tipo de aplicación	172
7.1 Parámetros básicos de los filtros ópticos	197

## Introducción

Las fibras ópticas constituyen el eje central del sistema de telecomunicaciones global. Estos filamentos de cristal, cuyo grosor es inferior al de un pelo humano, fueron diseñados para transportar grandes cantidades de datos que se pueden transmitir a través de una forma de luz. El incremento de la capacidad de las líneas telefónicas que ha permitido el desarrollo de la transmisión óptica es un fenómeno reciente.

Aunque en Estados Unidos existe un servicio telefónico para llamadas nacionales desde hace más de un siglo, no ha sido fácil realizar llamadas internacionales hasta hace relativamente poco. En 1956, el primer cable trasatlántico de hilo de cobre permitió la transmisión simultánea de 36 conversaciones telefónicas, un motivo de celebración entonces, un número insignificante ahora.

A finales de 1958, un estudio de Townes-Schawlow, "Infrared and Optical Masers" (Masers infrarrojos y ópticos), fue publicado en Physical Review, éste estudio incitó a una serie de científicos a intentar crear un dispositivo láser; en junio de 1960, el físico Theodore Maiman del laboratorio de investigaciones de Hughes Aircraft Company, lo logró mediante un rubí sintético.

Dicho éxito motivó a los investigadores a buscar un modo de convertir la luz visible en un medio de comunicación, surgiendo unos años después las fibras ópticas. La luz se canaliza por fibras de vidrio mediante una propiedad denominada reflexión interna total.

En 1820, Augustine-Jean Fresnel ya conocía las ecuaciones por las que se rige la captura de la luz dentro de una placa de cristal lisa y su ampliación a lo que entonces se conocía como cables de vidrio fue obra de D. Hondros y Peter Debye en 1910. Sin embargo, no fue hasta 1964, cuando Stewart Miller, de los Laboratorios Bell, dedujo maneras detalladas de demostrar el potencial del cristal como medio eficaz de transmisión a larga distancia.

Al igual que con el trabajo de Townes y Schawlow de la década anterior, un artículo de Kao-Hockham estimuló a una serie de investigadores a producir dichas fibras de baja pérdida. El gran avance se produjo en 1970 en Corning Glass Works, cuando Donald Keck, Peter Schultz y Robert Maurer lograron fabricar con éxito una fibra óptica de cientos de metros de largo con la claridad cristalina que Kao y Hockham habían propuesto. Poco después, Panish y Hayashi, de los Laboratorios Bell, mostraron un láser de semiconductores que podía funcionar continuamente a temperatura ambiente, y John McChesney y sus colaboradores, también de los Laboratorios Bell, desarrollaron independientemente métodos de preparación de fibras.

Como ya se mencionó, en los sistemas de comunicaciones por fibra óptica la información viaja en forma de rayos de luz, la cual sólo es una pequeña parte del espectro de la radiación electromagnética. La diferencia de las radiaciones en las diferentes partes del espectro electromagnético es una cantidad que puede ser medida de varias maneras: Como una longitud de onda, como la energía de un fotón, o como la frecuencia de oscilación de un campo electromagnético.

Para comprender el comportamiento de la luz, es necesario conocer algunas de las leyes que la rigen, tal es el caso de las leyes de Reflexión y de Refracción, las cuales nos muestran como se comporta en los diversos medios y nos dan panorama del principio de operación de las fibras ópticas.

El concepto de fibra óptica (FO) es sencillo, la FO es un medio físico (esencialmente transparente a la luz y al infrarrojo) compuesto frecuentemente de filamentos de vidrio y que transporta señales sobre la base de la transmisión de luz; para que se de una transmisión usando este medio se necesita que a los extremos de ésta existan dispositivos electrónicos que de un lado envíen la información en forma de rayos de luz, y del otro lado haya un interpretador de esta información que reciba y decodifique la señal.

Este medio de transmisión óptico se comporta como una guía de onda, lo cual permite la propagación de ondas electromagnéticas longitudinalmente. Es decir, una vez que la luz es insertada por uno de los extremos de la fibra, circula siempre en su interior reflejándose o

“rebotando” contra las paredes, hasta alcanzar el extremo opuesto. El cable de Cobre es también una guía de onda pero para frecuencias menores.

Las fibras ópticas se componen básicamente por tres estructuras concéntricas: núcleo (core), revestimiento (cladding) y un recubrimiento (buffer). El filamento de fibra óptica está compuesto por dos capas de virio, cada una con distinto índice de refracción. El índice de refracción del núcleo es mayor que el del revestimiento, razón por la cual, y debido a la diferencia de índices de refracción, la luz introducida al interior de la fibra se mantiene y propaga a través del núcleo. Esto se basa en el efecto denominado Reflexión Interna Total.

Algunos de los parámetros que se consideran para inserción de la luz en una fibra óptica son el cono de aceptación, ángulo de aceptación, abertura numérica, los cuales se relacionan con los conceptos de la naturaleza de la luz para determinar, por ejemplo, el número máximo de modos de luz (camino para los rayos de luz) que pueden existir en el núcleo de una fibra, donde se depende de su abertura numérica, de su diámetro y de la longitud de onda de la luz.

Las fibras ópticas se clasifican de acuerdo al modo de propagación que dentro de ellas describen los rayos de luz emitidos. En esta clasificación existen tres tipos:

- a) Multimodo de índice escalonado
- b) Multimodo de índice gradual
- c) Modo único o monomodo

Las características de transmisión son de importancia primordial al evaluar el uso de algún tipo de fibra, siendo de mayor interés la atenuación y el ancho de banda. Inicialmente el desarrollo de la fibra óptica estaba limitado por las enormes pérdidas que ésta presentaba, el inicio de su posibilidad real de uso se da en 1970 al obtener una fibra óptica con una atenuación aceptable como para competir con la red de cobre.

Una vez obtenida una fibra óptica de características aceptables, los científicos se vieron en la necesidad de crear los medios generadores del haz de luz para poder transmitir sobre este medio, así mismo, se requería de los traductores o receptores de dicha señal, y así poder establecer el sistema de comunicación completo.

Desde el año de 1970 en que se fabricaron las primeras fibras ópticas con atenuación de 20dB/Km., el desarrollo y mejoras tecnológicas de transmisores, receptores y fibra han permitido alcanzar atenuaciones de hasta 0.2dB/Km.

Si bien lo anterior es una realidad, también lo es la necesidad de un diseño óptimo de conexionado de la fibra, dado que una bobina de cable de fibra óptica puede ser de hasta 2Km. y que la distancia entre repetidoras puede ser de 30 o 40Km. se deben realizar empalmes entre tramos, entre cada final y los conectores, el diseño debe de mantener la reducida degradación de las propiedades de transmisión de la fibra, y así mantener la alta fiabilidad de la conexión.

De gran ayuda en la instalación y uso de la fibra óptica para grandes distancias es el uso de amplificadores ópticos de la señal o haz de luz que viaja a través de la fibra, siendo en 1980 cuando la aparición de amplificadores óptimos mejora el desempeño de los sistemas ya existentes de telecomunicación basados en fibra.

Pero no sólo la aparición de éstos amplificadores ha cooperado a la mejora de éstos sistemas, el empleo de protocolos de transmisión o multiplexación de señales ha incrementado enormemente el caudal de información que puede viajara por la fibra, siendo de interés la aplicación de la DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) en sistemas de larga distancia.

Teniendo un sistema de comunicación basado en fibra se hace necesaria la administración y monitoreo del mismo, y es en esta parte donde el uso del equipo de medición juega el papel final en la implementación del sistema, ya que con el equipo adecuado podemos asegurar que el desempeño siempre será el mejor y podremos denotar las fallas que se presenten en la vida del mismo.

## **OBJETIVO GENERAL**

La perspectiva primordial de ésta monografía es describir los sistemas de comunicación por fibra óptica para larga distancia así como sus características, aplicaciones y ventajas sobre otros medios de transmisión para grandes distancias, tomando como punto de partida los conceptos básicos de comunicación óptica.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Comprender el uso de la fibra óptica como medio de comunicación para largas distancias.
- Documentar visualmente la elaboración de empalmes.
- Efectuar mediciones en redes ópticas ya establecidas.
- Conocer las tecnologías de transmisión óptica actual.
- Describir las redes ópticas de alta capacidad.
- Enunciar redes ópticas de alta capacidad ya existentes.

## Justificación

Las redes de larga distancia al igual que la Internet se están basando cada vez más en líneas troncales de fibra óptica, éste hecho no es una casualidad, las ventajas que dicho medio ofrece sobre los otros la hacen de suma importancia en la ampliación del ancho de banda de las redes de larga distancia existentes y a futuro.

El desconocimiento de la utilización de la fibra óptica como línea troncal en redes de larga distancia, así como las mejoras que se han hecho a los sistemas ópticos en los últimos años, es por si mismo un fundamento para desarrollar un trabajo académico con el fin de difundir éstas mejoras.

La fibra óptica cuenta con características que la hacen atractiva para los operadores y prestadores de servicios de telecomunicación, lo que les permite mejorar su productividad, simplificar la activación y mantenimiento de la red, reducir costos y acelerar la activación de servicios y por consiguiente aumentar la satisfacción del cliente o usuario final.

El mayor uso de la fibra óptica es en redes de larga distancia, pero los avances tecnológicos que han presentado los componentes ópticos nos llevan a una mejora substancial en las redes ya establecidas (existe la posibilidad de aplicar los avances tecnológicos a las redes ya existentes) y futuras, dichas ventajas permiten la disminución de costos de operación, pero al mismo tiempo, ofrecen a las comunicaciones ópticas nuevos usos o aplicaciones, una nueva tendencia, de aparición reciente, es el extender la red óptica hasta la última milla (entiéndase hasta el equipo terminal) lo cual permitiría al usuario final disponer de servicios multimedia de alta calidad.

Por lo ya mencionado, se presenta la posibilidad de desarrollar un trabajo que permita dar los conceptos para comprender las redes ópticas, pudiendo ser también un material de ayuda en la educación de las Telecomunicaciones.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN A SISTEMAS ÓPTICOS

### 1.1 Naturaleza de la luz

Lo que llamamos luz sólo es una pequeña parte del espectro de la radiación electromagnética. La radiación electromagnética puede ordenarse en un espectro que va desde las ondas de frecuencia sumamente alta y longitud de onda corta a frecuencia sumamente baja y longitud de onda larga como se puede ver en la figura 1.1.

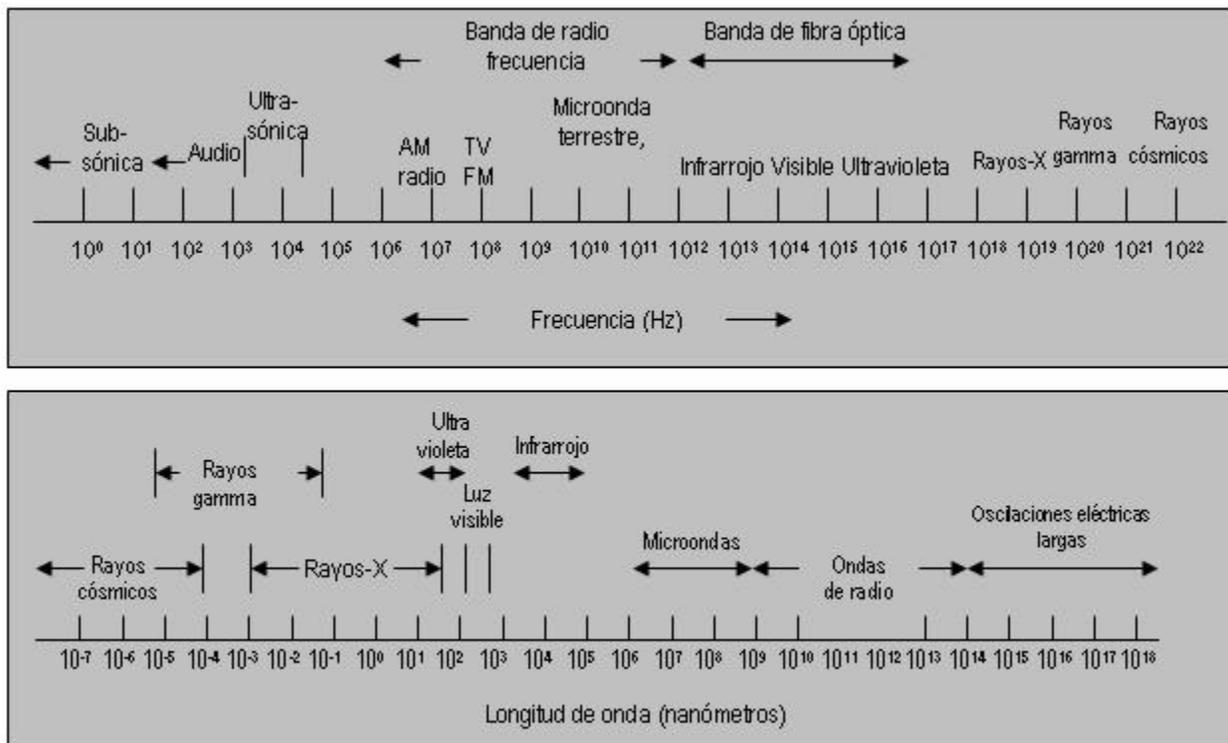


Figura 1.1: Espectro electromagnético de frecuencias<sup>a</sup>.

La diferencia de las radiaciones en las diferentes partes del espectro electromagnético es una cantidad que puede ser medida de varias maneras: Como una longitud de onda, como la energía de un fotón, o como la frecuencia de oscilación de un campo electromagnético.

<sup>a</sup> Figura tomada de <http://fortiz.8k.com>

En un extremo del espectro se ubican las ondas de radio con billones de longitudes de onda más largas que aquéllos de la luz visible. En el otro extremo del espectro están los rayos gamma que tienen millones de longitudes de onda más pequeñas que aquéllas de la luz visible.

La luz es una onda electromagnética, y por ende dicha onda puede oscilar en diferentes frecuencias, precisamente ésta define el “color”.

Hay algunas propiedades generales de la luz:

1. La luz puede viajar en el vacío, no así el resto de las ondas que necesitan de un medio material para hacerlo, por ejemplo el Sonido.
2. La velocidad de la luz es constante en el vacío, esto incluye a cualquier frecuencia de la misma, esto es 299 800 Km/seg. en el vacío (C).
3. La luz blanca esta compuesta por todas las longitudes de onda, la cual al pasar por un prisma (medio óptico) se difracta en diferentes ángulos según su longitud de onda descomponiéndose así en colores.

Los colores según la frecuencia están dados por la tabla 1.1:

Color	$\lambda(\text{Å})$	f (*1040Hz)
Violeta	4000 – 4600	7.5 - 6.5
Índigo	4600 – 4750	6.5 - 6.3
Azul	4750 – 4900	6.3 - 6.1
Verde	4900 – 5650	6.1 - 5.3
Amarillo	5650 – 5750	5.3 - 5.2
Naranja	5750 – 6000	5.2 - 5.0
Rojo	6000 – 8000	5.0 - 3.7

Tabla 1.1: Longitud de onda de cada color componente de la luz blanca con su respectiva frecuencia<sup>b</sup>.

En este trabajo sólo se tratará una parte del espectro electromagnético: La región óptica, donde la fibra óptica y los elementos ópticos trabajan. Como se puede apreciar en la figura 1.2 las

<sup>b</sup> Tabla tomada de <http://fortiz.8k.com>

longitudes de onda normalmente usadas en comunicaciones en las fibras de sílice están entre los 700nm – 1600nm. (0.7mm – 1.6mm).

Las fibras plásticas típicas transmiten mejor una longitud de onda visible que la del infrarrojo cercano, por lo que las comunicaciones sobre las fibras plásticas típicas es con luz visible. Sin embargo la fibra plástica no es tan transparente como el vidrio de sílice. Las fibras pueden ser fabricadas con otros materiales diferentes a la sílice de tal manera que pueden transmitir longitudes de ondas mayores que el infrarrojo.<sup>[1]</sup>

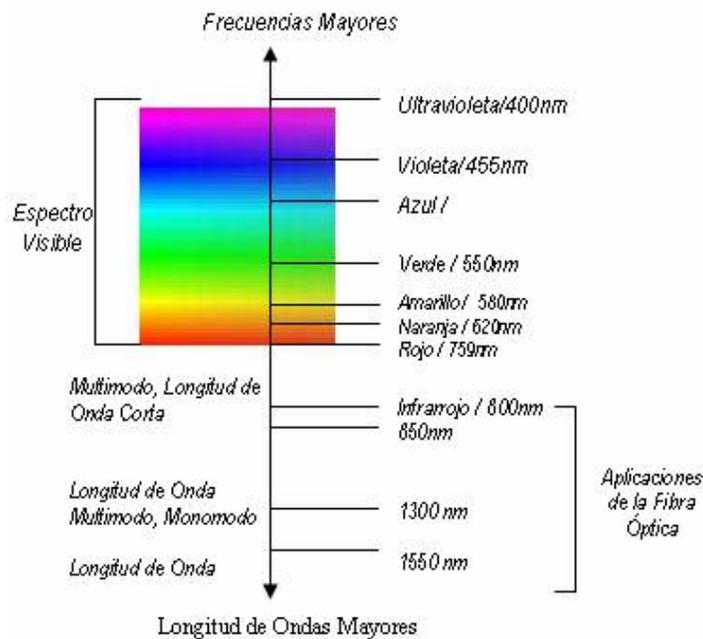


Figura 1.2: Longitudes de onda utilizadas en comunicaciones ópticas<sup>c</sup>.

## 1.2 Fibra óptica

La fibra óptica (FO) es un medio físico que transporta señales sobre la base de la transmisión de luz, para que esto ocurra, se necesita que a los extremos de ésta existan dispositivos electrónicos que de un lado envíen la información en forma de rayos de luz, y del otro lado haya un interpretador de esta información que reciba y decodifique la señal; la FO se

<sup>c</sup> Figura tomada de <http://fortiz.8k.com>

compone frecuentemente de filamentos de vidrio de alta pureza, muy delgados y flexibles, cuyo grosor es similar al de un cabello humano (de 2 a 125micras).<sup>[2]</sup>

La FO es esencialmente un medio “transparente” para las radiaciones electromagnéticas situadas en la banda visible y en el infrarrojo cercano. Esto quiere decir que la atenuación que sufre la luz al circular dentro de la fibra es muy baja. Este medio de transmisión óptico se comporta como una guía de onda, lo cual permite la propagación de ondas electromagnéticas longitudinalmente. Es decir, una vez que la luz es insertada por uno de los extremos de la fibra, circula siempre en su interior reflejándose o “rebotando” contra las paredes, hasta alcanzar el extremo opuesto. El cable de Cobre es también una guía de onda pero para frecuencias menores.

Aunque pueden ser construidas guías de onda ópticas a partir de diversos materiales, el Dióxido de Silicio ( $\text{SiO}_2$ ) es generalmente el elemento constitutivo de las fibras.<sup>[3]</sup> Este material lo conocemos en la vida cotidiana con el nombre de “vidrio”. Otro material con el que se hacen los filamentos es el plástico (polímeros artificiales).<sup>[1]</sup>

A diferencia de lo que sucede con el vidrio en la vida cotidiana, el Dióxido de Silicio se encuentra en un estado de pureza muy alto en la fibra óptica, lo que hace que la luz tenga atenuaciones mucho menores, y por lo tanto pueda recorrer distancias mucho más grandes. Alta pureza equivale a concentraciones insignificantes de otros tipos de moléculas “contaminantes”. Para tener una idea sobre la pureza que debe tener el Dióxido de Silicio en la fibra óptica, imaginemos transmitir luz a través de un vidrio de 60Km de espesor.

Un cable de fibra óptica está compuesto por tres estructuras concéntricas: núcleo (core), revestimiento (cladding) y un recubrimiento (buffer) cómo se puede apreciar en la figura 1.3.

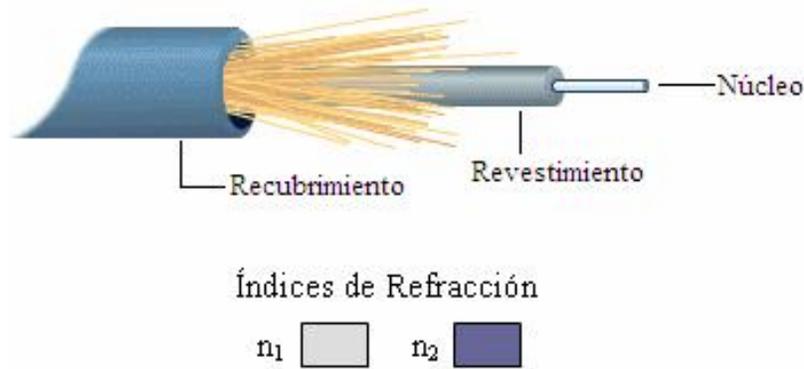


Figura 1.3: Partes componentes de la Fibra Óptica<sup>d</sup>.

El núcleo y el revestimiento de la fibra están hechos de Dióxido de Silicio; la luz se propaga a través de éstos. El recubrimiento sirve para dar a la fibra resistencia mecánica, protección ante agentes externos y permite su identificación a través de un código de colores.

Aunque el núcleo y el revestimiento están constituidos del mismo material, tienen índices de refracción diferentes, lo que hace que la luz quede confinada y se propague sin escapar de la fibra.<sup>[3]</sup>

### 1.2.1 Forma de propagación de la información (luz) en la fibra óptica

La transmisión de fibra óptica involucra el cambio de las señales eléctricas en pulsos de luz, usando un transmisor optoelectrónico, y enviando los pulsos hacia el núcleo de una fibra óptica. Ya que el núcleo y el revestimiento circundante tienen composiciones diferentes, la luz es atrapada dentro del núcleo. Al extremo opuesto, un receptor cambia los pulsos regresándolos a señales eléctricas.

La fibra óptica está compuesta por dos capas de vidrio, cada una con distinto índice de refracción. El índice de refracción del núcleo es mayor que el del revestimiento, razón por la cual, y debido a la diferencia de índices de refracción, la luz introducida al interior de la fibra se

<sup>d</sup> Figura tomada de <http://rares.com.ar>

mantiene y propaga a través del núcleo. Se produce por ende el efecto denominado de reflexión interna total, tal como se ilustra en la figura 1.4.

La luz inyectada en el núcleo choca en las interfaces núcleo – revestimiento con un ángulo mayor que el ángulo crítico reflejándose hacia el núcleo. Ya que los ángulos de incidencia y reflexión son iguales, el rayo de luz continúa en zigzag sobre toda la longitud de la fibra. La luz es atrapada en el núcleo. La luz que golpea las interfaces núcleo – revestimiento con un grado menor al ángulo crítico se pierde en el cladding<sup>[1]</sup>.

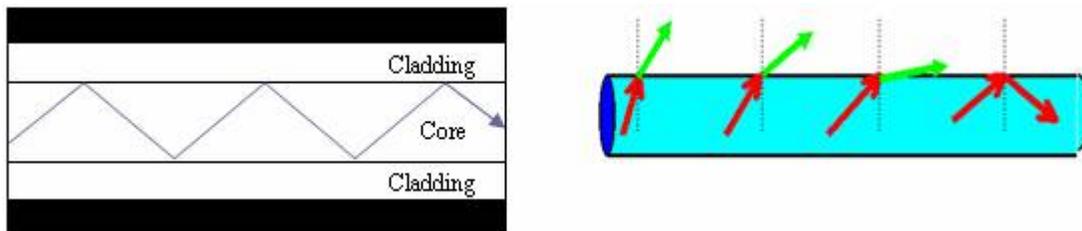


Figura 1.4: Reflexión interna total<sup>o</sup>.

### 1.2.2 Tipos de fibras ópticas

Las fibras ópticas se clasifican de acuerdo al modo de propagación que dentro de ellas describen los rayos de luz emitidos. En ésta clasificación existen tres tipos.<sup>[4]</sup>

- Multimodo de índice escalonado.
- Multimodo de índice gradual.
- Modo único o monomodo.

Para poder obtener los índices de refracción distintos entre el revestimiento y el núcleo de la fibra tales que satisfagan las condiciones de guía de luz se agrega impurezas al Silicio, tales como el Flúor, óxido de Fósforo y el óxido de Germanio que aumentan el índice de refracción. La fibra tipo modo único que es la que menores pérdidas presenta, se han logrado con Silicio puro en el núcleo y con el revestimiento dopado de Flúor, asegurando un rebote sin pérdida.

<sup>o</sup> Figura tomada de <http://fortiz.8k.com>

### 1.2.2.1 Fibra de índice escalonado (step index optical fibre)

Son aquellas en las cuales el valor del índice de refracción en el núcleo permanece siempre constante y mayor que el valor del revestimiento. Como se conoce en la fabricación de una fibra un núcleo cilíndrico de vidrio o plástico con índice de refracción  $n_1$  es cubierta por un recubrimiento igualmente de vidrio o plástico con un índice de refracción menor  $n_2$ .

Una fibra que esté constituida por un núcleo de vidrio y recubrimiento de plástico se le denomina fibra PCS (Plastic - Clad Silica). Se pueden obtener elevadas aperturas numéricas (NA) con éste tipo de fibras que además se caracterizan por tener un diámetro de núcleo ancho, elevada atenuación y pequeño ancho de banda. Lo importante de éste tipo de fibra es que al ser elevado el NA, permite el uso de LED como emisor de superficie de bajo costo, así como conectores baratos, en la tabla 1.2 se muestran dichos parámetros.

<i>Diámetro del núcleo mm</i>	<i>Recubrimiento <math>\mu m</math></i>	<i>NA</i>	<i>Atenuación dB/km 850 nm</i>	<i>Ancho de banda MHz-km</i>
1000	1250	0.20	10	20
800	1000	0.20	10	20
600	750	0.20	10	20
600	620	0.37	6	9
400	500	0.20	10	20
200	240	0.26	10	20
200	230	0.37	6	17
125	200	0.29	5	20
100	150	0.20	5	25
100	150	0.20	5	25
100	140	0.29	5	20

Tabla 1.2: Parámetros de Fibra Multimodo ---Índice – Escalonado<sup>f</sup>.

<sup>f</sup> Tabla tomada de <http://www.portalgsm.com>

En estos tipos de fibras los distintos modos de propagación o rayos siguen distintos caminos y llegan al otro extremo en instantes diferentes, provocando un ensanchamiento de la señal óptica transmitida como se puede ver en la figura 1.5.

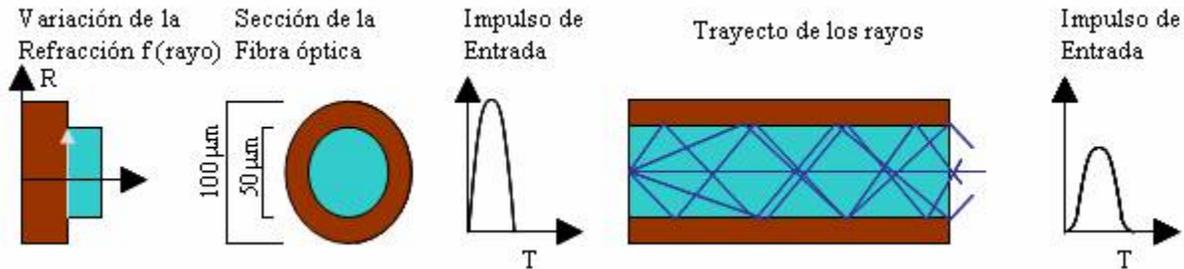


Figura 1.5: Fibra de índice escalonado<sup>g</sup>.

El número máximo de modos de luz (caminos para los rayos de luz) que pueden existir en el núcleo de una fibra depende de su apertura numérica, de su diámetro y de la longitud de onda de la luz.

Ésta propiedad de la luz relacionada con el hecho que la propagación de la potencia óptica en las fibras ópticas se puede dar en muchos modos, debe considerarse como una desventaja debido a que se generen muchas trazas y consecuentemente distintos tiempos de tránsito (Fenómeno Fading).

La luz de un emisor es distribuida uniformemente en el cono de aceptación de la fibra y la potencia óptica del pulso de entrada es distribuida uniformemente en todos los modos. Debido a que cada modo tiene un tiempo diferente de propagación (porque recorrerán distintas distancias), se producirá el efecto siguiente: Distorsión del pulso y se tendrá un ancho de banda limitado. A éste fenómeno se le llama la distorsión multimodo.

La distorsión multimodo recibe también el nombre de dispersión modal y la relación entre los tiempos de recorridos mínimos y máximos es directamente proporcional a la relación entre los índices de refracción del recubrimiento y del núcleo que es del orden del 1%.

<sup>g</sup> Figura tomada de <http://www2.udec.cl>

### 1.2.2.2 Fibras de índice gradual (graded index core)

Éste tipo de fibra consiste de un núcleo cuyo índice de refracción varía con la distancia a lo largo del eje con el objetivo de disminuir los efectos de la dispersión modal. Al igual que la fibra de índice escalonado, el núcleo está rodeado por el vidrio del cladding ó revestimiento de menor índice refractivo.

Las fibras de índice gradual ofrecen una buena aceptación de luz y ancho de banda, mejor de las ofrecidas por las fibras de índice escalonado. Otras características ofrecidas son:

- Diámetro del núcleo moderado
- Bajo NA
- Atenuación moderada.

El ancho de banda mejorado se debe a la estructura especial de la fibra que permite un índice de refracción distribuido como lo representa la figura 1.6.

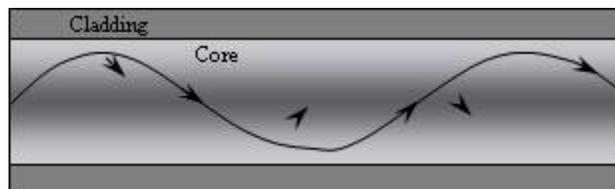


Figura 1.6: Perfil de la fibra de índice gradual<sup>h</sup>.

Debido a que la velocidad de la luz decrece con el crecimiento del índice de refracción, la velocidad de la luz para modos cerca del centro del núcleo es menor que en la zona cerca al límite con la corteza. Para perfiles parabólicos del índice de refracción, el tiempo de propagación, para varios modos es casi ecualizado, lo cual reduce la distorsión debido a la propagación multimodo.

Las fibras de índice gradual fueron diseñadas especialmente para las telecomunicaciones, por largo tiempo los diámetros estándares han sido de 50 y 62.5  $\mu\text{m}$  con un cladding de 125  $\mu\text{m}$ , algunas son fabricadas con un núcleo de 82.5  $\mu\text{m}$ .

<sup>h</sup> Figura tomada de <http://www.portalgsm.com>

Fue usada para algunas aplicaciones de Telecomunicaciones hasta mediados de los 80's, éstos tipos de fibras han permanecido en uso, principalmente en las redes de datos para transportar información a distancias moderadas, típicamente a no mas de un par de kilómetros.<sup>[5]</sup>

### 2.2.2.3 Fibras monomodo

Estas fibras están caracterizadas por contener un núcleo de pequeñísimo diámetro, pequeña NA, baja atenuación y gran ancho de banda. Tiene una banda de paso del orden de los 100 GHz/Km. Los mayores flujos se consiguen con esta fibra, pero también es la más compleja de implantar, construir y manipular. La figura 1.7 muestra que sólo pueden ser transmitidos los rayos que tienen una trayectoria que sigue el eje de la fibra, por lo que se ha ganado el nombre de "monomodo" (modo de propagación, o camino del haz luminoso, único).<sup>[6]</sup>

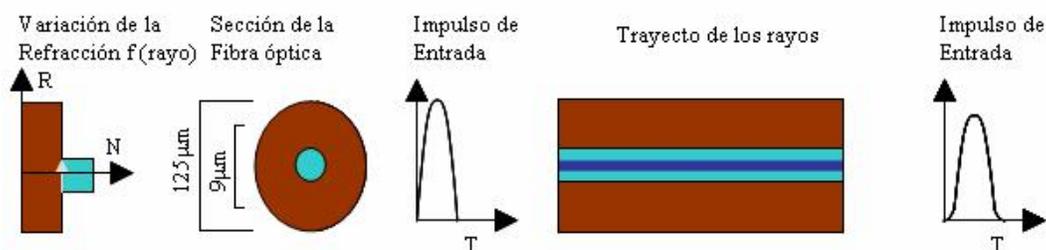


Figura 1.7 Fibra monomodo<sup>i</sup>.

El requerimiento básico para tener una fibra monomodo es que el núcleo sea lo suficientemente pequeño para restringir la comunicación a un solo modo. Este modo de orden menor puede propagarse en toda la fibra con núcleo pequeño. Desde que una transmisión en modo único evita la dispersión modal, el ruido modal, y otros efectos típicos de una transmisión multimodo, esta fibra puede transmitir señales a mayor velocidad y es la que se ha adoptado como estándar en las telecomunicaciones.

Al tipo de fibra monomodo más simple, frecuentemente se le denomina Fibra monomodo estándar, y tiene un perfil del tipo step – index, con una frontera de separación abrupta entre el índice superior del núcleo y el índice inferior del cladding. El diferencial de los índices refractivos esta generalmente por debajo del 1%, la figura 1.8 nos muestra una vista de los dos tipos principales de fibras monomodo del tipo step-index fabricados con sílice.

<sup>i</sup> Figura tomada de <http://www2.udec.cl>

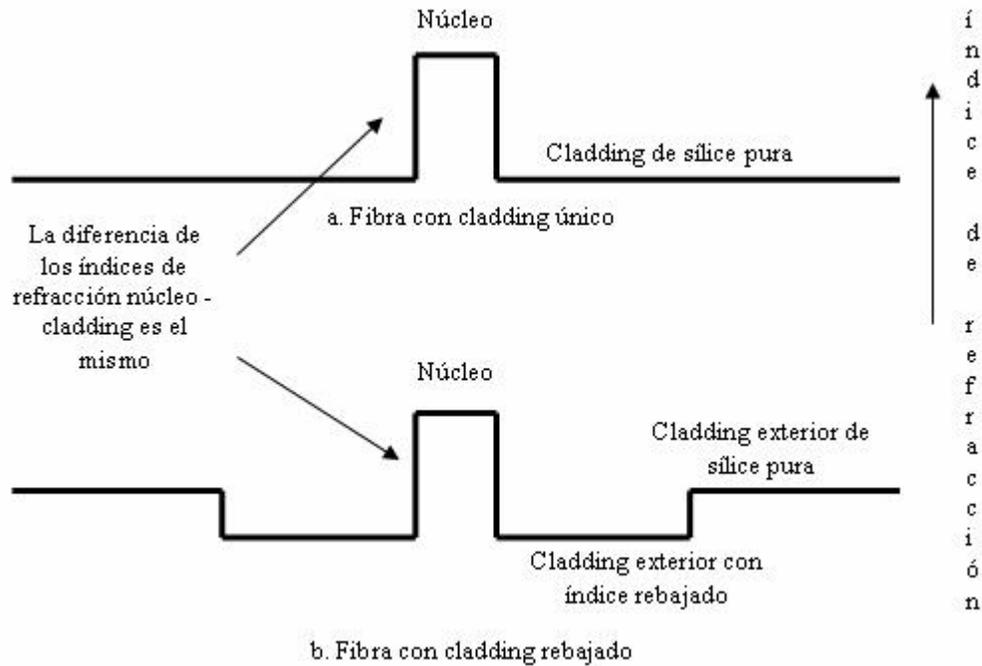


Figura 1.8 Fibras monomodo del tipo step-index<sup>1</sup>.

En la figura 1.8 se muestran dos tipos de fibras monomodo del tipo step-index. La diferencia entre los índices de refracción del núcleo y del cladding es el mismo, pero el cladding se ha rebajado en la fibra de la parte inferior, el cladding interior es dopado con Flúor para reducir el índice de refracción.

El diseño mas simple es el de una fibra con un cladding único como se muestra en la parte superior de la figura 1.8. El cladding es de sílice pura y el óxido de Germanio se le agrega al núcleo para incrementar su índice. Un diseño alternativo es logrado mediante el recorte del cladding como se muestra en la parte inferior de la figura. En este caso, el núcleo es fusionado con sílice dopado con menos óxido de Germanio que el primer caso. La parte interna del cladding que rodea al núcleo es dopado con Flúor, lo que reduce su índice de refracción por debajo del de la sílice pura.

Ambos diseños son típicos de fibras usadas en transmisiones de 1.3mm., con un núcleo de 9mm. Esto hace que el tamaño del núcleo sea bastante sensible a la longitud de onda de

<sup>1</sup> Figura tomada de <http://www.portalgsm.com>

operación, ya que el área del núcleo se incrementa proporcionalmente al cuadrado del diámetro. El núcleo de una fibra diseñada para operar a  $1.55\mu m$  tiene un área de más de tres veces mayor que una fibra de modo único usado a  $0.85\mu m$ .

Sin embargo el diámetro del núcleo es un parámetro físico que aparece en la ecuación para la transmisión de modo único, recuerde que una fibra monomodo es una guía de onda dieléctrica. Esto quiere decir que una porción de la luz se extiende en la guía hasta el cladding. Esta área de guía de luz es medido como el diámetro de modo de campo que se cita en las especificaciones de las fibras ya que es importante para el acoplamiento de la luz.

Típicamente la diferencia entre diámetro del modo de campo y el diámetro de un núcleo de una fibra monomodo del tipo step-index esta entre el 10% al 15%. Un diámetro de modo de campo típico para una fibra monomodo de tipo step-index es de  $9,3\mu m$  para una longitud de onda de  $1.31\mu m$  y de  $10.5\mu m$  para  $1.55\mu m$ .

*Longitud de Onda de Corte:* El diámetro máximo del núcleo de una fibra monomodo depende de la longitud de onda de transmisión, si se resuelve la ecuación para la longitud de onda, encontraremos que para un diámetro específico del núcleo, en una fibra monomodo la luz se transmitirá en un solo modo solamente para longitudes de onda mayores que un valor denominado longitud de onda de corte. Si la longitud de onda decrece, empezará a transmitir 2 modos a la onda de corte.

Así como el diámetro del núcleo de la fibra es una consideración importante en el diseño de la fibra, la longitud de onda de corte es importante para las aplicaciones de la fibra. Si deseamos que sólo un solo modo sea transmitido en un sistema de comunicación debemos de estar seguros que la longitud de la onda de transmisión sea mayor que la longitud de onda de corte. En la práctica las fibras son diseñadas con un ángulo de corte significativamente menor que la longitud de onda en la cual la fibra va a funcionar. Por ejemplo, una fibra de modo simple para ser usada en  $1.3\mu m$  probablemente tendrá un ángulo de corte inferior a los  $1.25\mu m$ .

Las fibras monomodo siempre permanecerán siendo monomodo para longitudes de onda de operación mayores a la longitud de onda de corte. Así una fibra cuya especificación es para trabajar a  $1.3\mu m$  también será monomodo para  $1.5\mu m$ . Sin embargo una fibra de  $1.55\mu m$  no será del tipo monomodo para  $1.3\mu m$ , y ni las de  $1.3\mu m$  y  $1.55\mu m$  serán del tipo monomodo para una longitud de onda de  $0.85\mu m$ .

Si la longitud de onda empieza a decrecer por debajo de la longitud de corte, primeramente se tendrá un segundo modo y así se irán adicionando nuevos modos. Los modos extras empezarán a interferirse unos con otros y con los modos primarios, causando serios problemas de desempeño. Así como las fibras multimodo, cualquier perturbación menor puede afectar al modo de propagación, a más modos será menos predecible las características de la fibra.

Si bien desde mediados de los 60's cuando Charles Kao dió a conocer las ventajas de las fibras monomodo los investigadores se percataron de ciertos inconvenientes para su aplicación, con el tiempo aparecieron otros inconvenientes inevitables que tuvieron que ser resueltos. Los investigadores se percataron que las propiedades de la fibra monomodo del tipo step – index no eran ideales, Su dispersión tiene un mínimo a  $1.31\mu m$ , pero su atenuación tiene su mínimo en  $1.55\mu m$ .

Los mejores amplificadores disponibles de fibras dopados en Erblio, operan entre los  $1.5$  y  $1.6\mu m$ , mientras la dispersión de la fibra estándar es relativamente alto. Esto y otras limitaciones han permitido a los investigadores desarrollar otros tipos de fibra monomodo con diferentes estructuras para alterar la dispersión.<sup>[5]</sup>

### **1.3 Redes ópticas e Internet**

La Internet se ha convertido en una de las más poderosas herramientas en muchas partes del mundo. Lo anterior no habría ocurrido si la infraestructura de la Internet no se hubiese desarrollado en la escala correcta con la exponencialmente creciente demanda de los consumidores por ancho de banda. Solo una troncal de comunicación óptica ha permitido a la

Internet crecer como este debe, y solo las troncales de comunicaciones ópticas permitirán a la Internet continuar su crecimiento.

La infraestructura de la Internet utiliza enlaces de comunicación óptica (también conocidos como enlaces fotónicos) para transferir datos de nodo a nodo en la troncal de Internet. La figura 1.9 muestra un ejemplo hipotético de una troncal de Internet en el cual los enlaces fotónicos interconectan los nodos. Adicionalmente, los enlaces fotónicos son usados en redes de anillo para interconectar nodos en el área metropolitana. En casos raros, los enlaces fotónicos son usados en áreas residenciales para conectar las casas y oficinas pequeñas a la Internet.

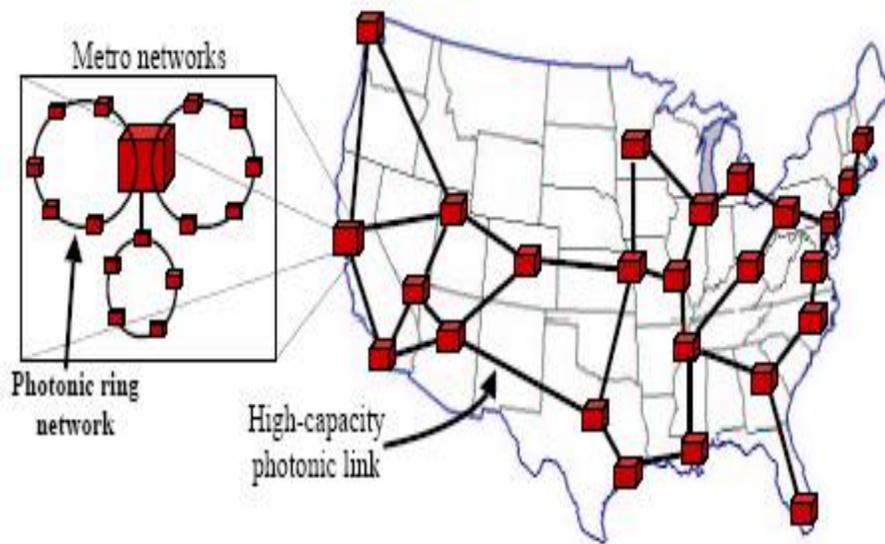


Figura 1.9: Ejemplo hipotético de una troncal de Internet<sup>k</sup>.

### 1.3.1 Elementos de un enlace fotónico

Un enlace fotónico típico es mostrado en la figura 1.10. Cuatro elementos clave forman un enlace fotónico. A la entrada del enlace, el subsistema del transmisor usa un láser semiconductor para transmitir una señal óptica de datos dentro de un cable de fibra óptica. Una señal digital es transmitida por la modulación de la potencia del láser entre dos niveles de potencia diferentes. A la salida del enlace, el subsistema del receptor usa un foto detector para

<sup>k</sup> Figura tomada de White, I.

convertir la señal óptica de datos en una señal electrónica, donde ésta puede ser procesada por el equipo de red del nodo.

El medio de transmisión para la señal óptica de datos es un cable de fibra óptica. Un enlace de fibra óptica típico guiará una onda electromagnética de una longitud de onda dentro del rango de 1530nm a 1610nm con menos de 0.25dB/Km. de pérdida, lo cual es un aproximado a un ancho de banda de 10THz. Hasta un ancho banda de 25THz. es posible el rango de los 200nm cercanos a 1550nm a una atenuación de menos que 0.5dB/Km. También, la atenuación para ondas de luz cerca de 1310nm es menos de 0.4dB/Km., lo cual es también excelente. Ningún otro medio puede guiar tal cantidad de ancho de banda con tan baja pérdida. Este es el porqué la fotónica es la tecnología actual para la Internet de hoy día y la del mañana, la cual continua requiriendo más capacidad de la que se pensó posible.

El cuarto elemento de un enlace fotónico, es el amplificador óptico. Aunque la atenuación del cable es increíblemente baja, los enlaces fotónicos se pueden extender a través de cientos de kilómetros. Consecuentemente, los amplificadores ópticos son necesarios para mantener la potencia de la señal de manera que ésta tenga la suficiente energía cuando llegue al receptor. El amplificador típico usado en enlaces fotónicos actuales es el Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (EDFA). De cualquier forma, otras tecnologías, como la amplificación Raman, se están haciendo mas populares por su implementación y en algunos casos para reemplazar EDFA's (White, A New Architecture And Technologies For High Capacity Next Generation Metropolitan Networks).

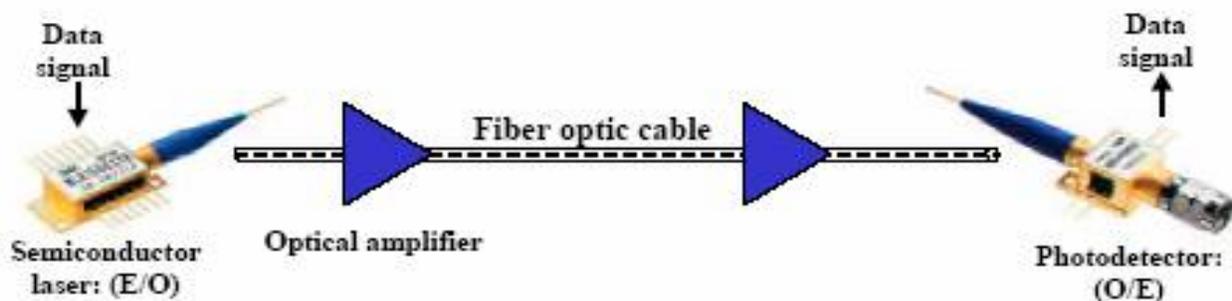


Figura 1.10: Link fotónico típico<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Figura tomada de White, I.

### 1.3.2 Multiplexado por división de longitud de onda

De tal manera en que la demanda por ancho de banda en la Internet continúe su crecimiento, la capacidad de la infraestructura fotónica debe escalar para permanecer delante de la demanda.

Dos posibilidades comunes para incrementar la capacidad de los enlaces fotónicos han sido empleadas. La primera técnica es el incrementar la velocidad de bit de la señal transmitida por el láser semiconductor. Durante la última década, las velocidades de transmisión de bit se han incrementado de 622Mb/s a 2.5Gb/s y a 10Gb/s. En el futuro, componentes fotónicos de 40GB/s pueden ser usados en los enlaces de gran capacidad del backbone de Internet.

Aunque escalar las velocidades de bit ha sido y continuará siendo una posibilidad efectiva de incrementar la capacidad de los enlaces fotónicos, la velocidad de incremento ha sido algo lineal.

Naturalmente, escalar la capacidad linealmente no permitirá al backbone fotónico el alcanzar la demanda creciente exponencialmente por ancho de banda. La técnica más prolífica para incrementar la capacidad de un enlace fotónico ha sido y seguirá siendo la Multiplexación por División de Longitud De Onda (WDM).

La figura 1.11 ilustra un enlace WDM. Múltiples láseres de semiconductor, cada uno a una única longitud de onda, son combinados en el cable de fibra óptica usando un multiplexor de longitud de onda. Las múltiples señales ópticas se propagan a través del cable de fibra juntas hasta que son demultiplexadas en el destino y recibidas por fotodetectores.

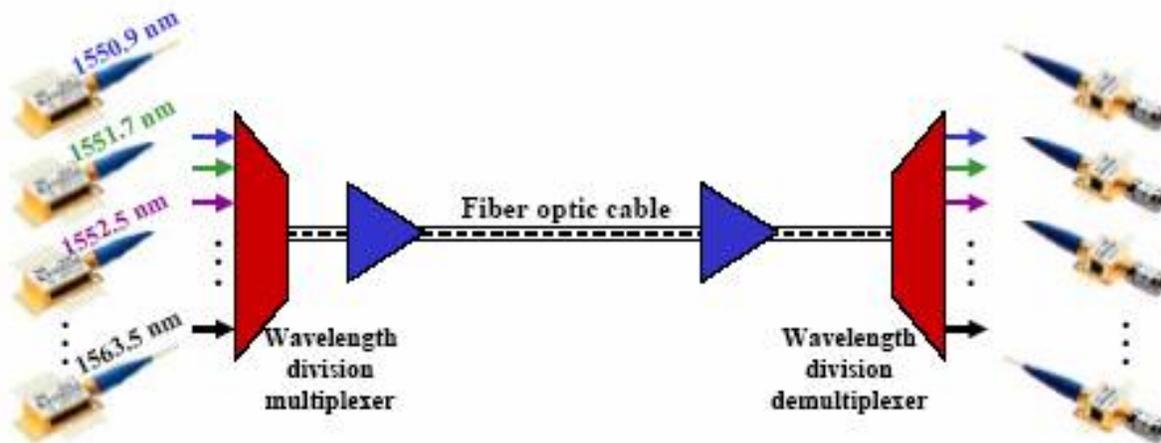


Figura 1.11: Enlace típico WDM<sup>m</sup>

Con la tecnología de hoy día, los valores de longitud de onda de las señales ópticas están típicamente espaciados por 100GHz., o en algunos casos 50GHz., como lo especifica la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Algunos sistemas nuevos están incluso usando espaciados de longitud de onda de 25GHz. En los primeros años de WDM, la región de longitud de onda de transmisión era entre aproximadamente 1530nm y 1565nm. Esto da la posibilidad de cerca de 40 longitudes de onda con espaciado de 100GHz (esto equipara a un espaciado de 0.8nm en la región de 1550nm). No es coincidencia que ésta región es la región de amplificación para EDFA's convencionales.

La región de longitud de onda de 1530 – 1565nm es a menudo conocida como la banda C, o banda convencional de longitud de onda. Recuérdese, de cualquier forma, que la región de baja pérdida de un cable típico de fibra óptica es mucho más amplia que sta región. Para explorar otras regiones de la ventana de transmisión, EDFA's que amplifican en la banda de longitud de onda larga (Banda L) fueron desarrollados posteriormente. No debería ser sorpresa que en años recientes los investigadores han intentado el desarrollar y perfeccionar tecnologías para amplificar en la banda de longitud de onda corta (Banda S) también. Finalmente, las nuevas tecnologías de amplificadores abrirán completamente el ancho de banda de 25THz. de los cables de fibra óptica estándar.<sup>[7]</sup>

<sup>m</sup> Figura tomada de White, I.

## CAPÍTULO 2

### DEGRADACIÓN DE LA SEÑAL EN LA FIBRA ÓPTICA

Las características de transmisión son de importancia primordial cuando se evalúa el uso de algún tipo de fibra. Las características de mayor interés son la atenuación (pérdidas de señal) y el ancho de banda.

Inicialmente el desarrollo de la fibra fue determinado por el tremendo potencial de las comunicaciones ópticas en lo que se refiere al ancho de banda de transmisión, pero la gran limitación venía fijada por las enormes pérdidas. De hecho unos pocos metros de un bloque de vidrio eran suficientes para reducir la señal a niveles despreciables de señal.

El arranque de las posibilidades reales de la fibra surgió en 1970 cuando se anunció la consecución de una fibra con una atenuación de 20dB/Km., cantidad considerada la mínima para competir con las líneas de cobre. Desde entonces se han conseguido progresos considerables, las fibras comerciales tienen atenuaciones inferiores a 1dB/Km., algunas fibras especiales han llegado a 0.01dB/Km. lo que posibilita la transmisión a distancias razonables sin regeneración de la señal.

La otra característica importante a analizar es el ancho de banda real, éste nos determina el número de bits que pueden transmitirse por unidad de tiempo. Cuando se consiguió bajar la atenuación a valores aceptables se empezó a trabajar en dicho punto consiguiéndose anchos de banda de decenas de GHz. para distancias de varios km.<sup>[8]</sup>

#### 2.1 Atenuación

Es probable que la pérdida de potencia en un cable de fibra óptica sea la característica más importante del cable. Con frecuencia se llama *atenuación* a la pérdida de potencia, y se entiende como una pérdida de potencia de la onda luminosa al atravesar el cable. La atenuación tiene varios efectos adversos sobre el funcionamiento, que incluyen la reducción del ancho de banda

del sistema, la rapidez de transmisión de información, la eficiencia y la capacidad general del sistema.

La fórmula normal con la que se expresa la pérdida total de potencia en una fibra es:

$$A_{(dB)} = 10 \log \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \quad (2.1)$$

en la que

$A_{(dB)}$  = reducción total de potencia (atenuación)

$P_{sal}$  = potencia de salida del cable (watts)

$P_{ent}$  = potencia de entrada al cable (watts)

En general, las fibras multimodo tienden a tener mayores pérdidas de atenuación que los cables monomodo, debido principalmente a la mayor dispersión de la onda luminosa, producida por las impurezas. La tabla 2.1 muestra la potencia de salida como porcentaje de la potencia de entrada para un cable de fibra óptica a distintos valores de pérdida en dB. Un cable con pérdida de 3dB reduce la potencia de salida a 50% de la potencia de entrada.

Pérdida (dB)	Potencia de salida (%)
1	79
3	50
6	25
9	12.5
10	10
13	5
20	1
30	0.1
40	0.01
50	0.001

Tabla 2.1: Porcentaje de potencia de salida en función de la pérdida en dB<sup>n</sup>.

<sup>n</sup> Tabla tomada de Tomasi, W.

Aunque la pérdida total de potencia es de principal importancia, la atenuación de un cable óptico se expresa, en general, en dB de pérdida por unidad de longitud. La atenuación se representa con un valor positivo de dB, porque por definición es una pérdida. La potencia óptica, en Watts, medida a determinada distancia a una fuente de potencia, se puede calcular con la siguiente ecuación:<sup>[9]</sup>

$$P = P_t * 10^{-Al/10} \quad (2.2)$$

en la que

$P$  = valor medido de la potencia (Watts)

$P_t$  = valor de la potencia de transmisión (Watts)

$A$  = pérdidas de potencia en el cable (dB/km)

$l$  = longitud del cable (Km.)

De igual manera, la potencia óptica, en decibelios, es

$$P_{(dB)} = P_{(ent)}(dBm) - Al \quad (2.3)$$

en la que

$P$  = valor medido de la potencia (dBm)

$P_{ent}$  = potencia de transmisión (dBm)

$A$  = pérdidas de potencia en el cable (dB/Km.)

Una vez que se sabe como se define la atenuación queda por conocer los mecanismos por los que ésta se produce. Estos mecanismos dependen de la composición de la fibra, la técnica de reparación y grado de pureza del material y la estructura de la fibra. Se dividen en áreas que incluyen la absorción del material, la dispersión del material (dispersión lineal y no lineal), pérdidas por curvaturas y microcurvaturas y pérdidas por acoplamiento hacia modos no permitidos o con pérdidas. Cuando se analicen las pérdidas totales del sistema además se deberán tener en cuenta las debidas a empalmes y conectores. Estas áreas se resumen en la tabla 2.2.



Tabla 2.2: División de la atenuación según el factor que la produce<sup>o</sup>.

### 2.1.1 Pérdidas por absorción del material

Estas pérdidas son debidas a la composición de la fibra y al método de fabricación. La potencia perdida se transforma en calor en la fibra. La absorción puede ser intrínseca (causada por los componentes del vidrio) o extrínseca (causada por impurezas no deseadas).

#### 2.1.1.1 Absorción intrínseca

Un vidrio de sílice tiene muy poca absorción debida a su estructura atómica en el rango espectral del infrarrojo cercano. Sin embargo, hay dos mecanismos de absorción intrínseca en otras zonas del espectro y que generan una absorción en el rango entre 0.8 y 1.7 $\mu\text{m}$ . Esto puede apreciarse en la figura 2.1, donde se muestra la curva de atenuación en función de la energía del fotón y de la longitud de onda para un material sin ninguna impureza.

Se ven las colas de dos picos de absorción, uno fundamental situado en la zona ultravioleta que es debido a excitación electrónica (cambio de nivel de un electrón) y otro en el infrarrojo (alrededor de las 7 $\mu\text{m}$ ) que se produce por la interacción de los fotones con vibraciones moleculares. Estas absorciones son las relacionadas con enlaces como los siguientes: Si-O (9.2 $\mu\text{m}$ ), Ge-O (11.0 $\mu\text{m}$ ). La atenuación de las fibras para  $\lambda > 1.5\mu\text{m}$  viene causada por las colas de estos picos.

<sup>o</sup> Tabla tomada de <http://www.iuma.ulpgc.es>

Ambos picos de absorción aunque lejanos de la zona de interés limitan la mínima atenuación que puede conseguirse.

Los efectos principalmente de la absorción debida a las vibraciones moleculares pueden limitarse. Por ejemplo, en algunos vidrios sin contenido en óxidos como los compuestos de fluoruros y cloruros tienen sus picos de absorción mucho más alejados de la zona de interés, por encima de las  $50\mu\text{m}$ , reduciendo mucho la atenuación producida por la cola del pico.

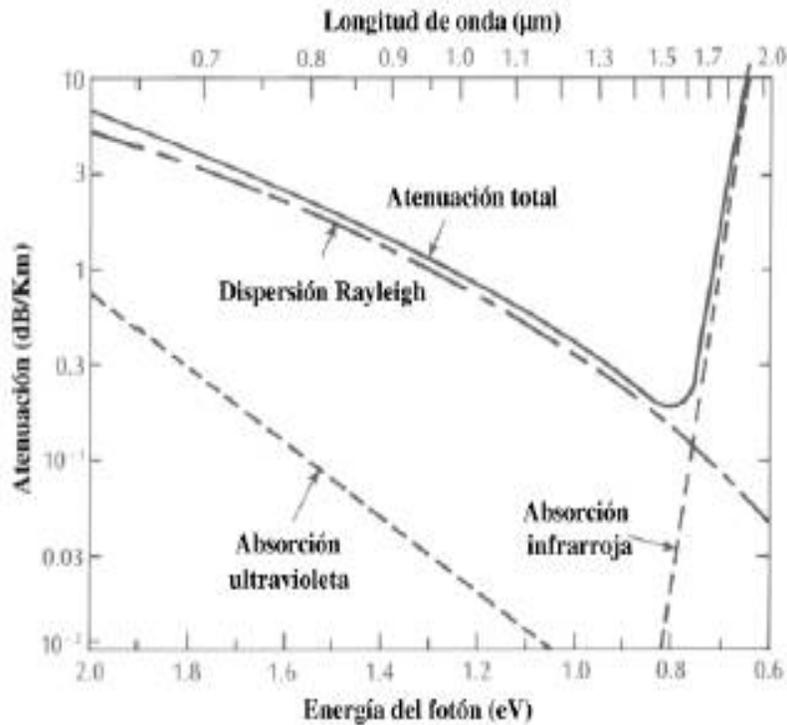


Figura 2.1: Espectro de atenuación teórico para los mecanismos de pérdidas intrínsecas en vidrios de  $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2^p$

### 2.1.1.2 Absorción extrínseca

En fibras comerciales fabricadas por medio de técnicas de manejo de material fundido las principales fuentes de atenuación son causadas por la absorción de materiales no deseados que son típicamente metales de transición. Algunas de las impurezas más típicas se muestran en la tabla 2.3, junto con la concentración necesaria para causar la mencionada atenuación. La

<sup>p</sup> Figura tomada de <http://www.iuma.ulpgc.es>

contaminación por metales de transición puede reducirse a niveles de concentración de  $10^{-10}$  mediante métodos como la oxidación en fase vapor que elimina gran parte de éste problema.

Otro problema relacionado con la absorción extrínseca es la causada por el agua (más concretamente el ión  $OH^-$ ) disuelta en el vidrio. Este ión está ligado a la estructura del vidrio y tiene picos de absorción por vibración que pueden estar entre  $2.7$  y  $4.2\mu m$ . dependiendo a que punto de la red del vidrio esté ligado. Estas vibraciones fundamentales dan sobre tonos que aparecen de forma armónica (como si de música se tratara) a  $1.38$ ,  $0.95$  y  $0.72\mu m$ ., como puede verse en la figura 2.2. Además aparecen combinaciones de los sobre tonos y las absorciones fundamentales del  $SiO_2$  a  $1.24$ ,  $1.13$  y  $0.88\mu m$ . con lo que se completa la figura 2.2. Como todos los picos son bastante abruptos aparecen valles entre los picos en la zona de  $1.3$  y  $1.55\mu m$ . donde la atenuación se reduce, aparecen lo que se han dado en llamar las ventanas de transmisión.

Impureza	Pico de Absorción (nm)	Atenuación (db/Km)
$Cr^{3+}$	625	1.6
$C^{2+}$	685	0.1
$Cu^{2+}$	850	1.1
$Fe^{2+}$	1100	0.68
$Fe^{3+}$	400	0.15
$Ni^{2+}$	650	0.1
$Mn^{3+}$	460	0.2
$V^{4+}$	725	2.7

Tabla 2.3: Tipos de impurezas. Pérdidas por absorción causadas por algunas impurezas metálicas ionizadas, junto con la longitud de onda de máxima absorción<sup>q</sup>.

<sup>q</sup> Tabla tomada de <http://www.iuma.ulpgc.es>

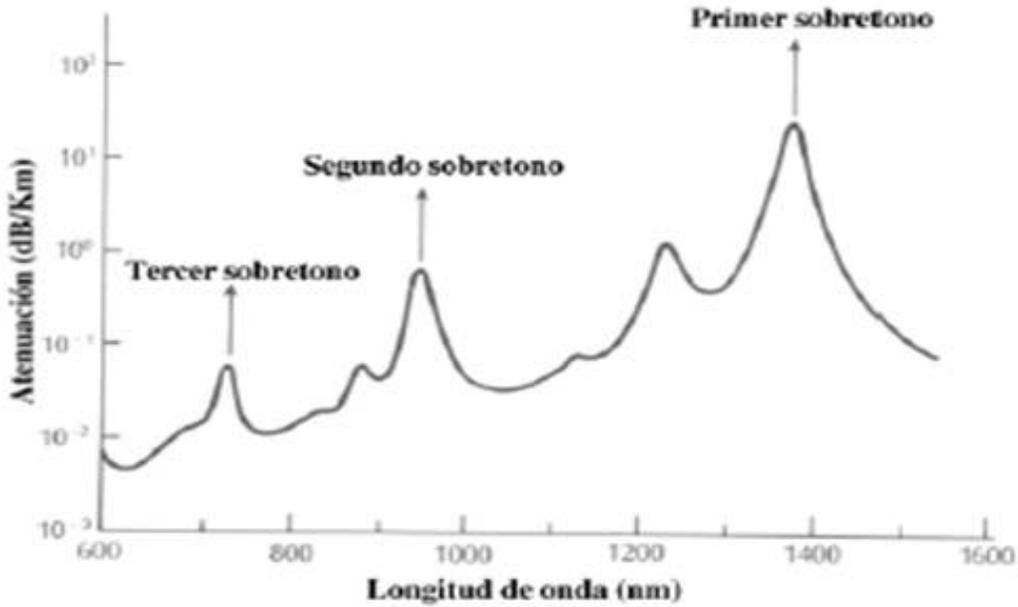


Figura 2.2: Espectro de absorción del ión  $\text{OH}^-$  en la sílice<sup>†</sup>.

Hay tres ventanas, las dos anteriormente citadas más otra alrededor de  $0.8\mu\text{m}$ . Cuando en transmisión por fibra se habla de segunda ventana nos referimos a la transmisión en  $1.3\mu\text{m}$ . y en tercera ventana en  $1.55\mu\text{m}$ .

Si se vuelve a mirar la figura 2.2 se extrañará de que no se cite una ventana a  $1.05\mu\text{m}$ ., la explicación la podemos encontrar en la figura 2.3, en ella se presenta una medida real de absorción de una fibra monomodo. Aquí se podrá apreciar mejor la segunda y tercera ventana de transmisión. La primera viene dada porque en un principio los únicos emisores que existían con potencia suficiente eran los láseres de GaAs que emiten en el rango de las  $0.8\mu\text{m}$ .

<sup>†</sup> Figura tomada de <http://www.iuma.ulpgc.es>

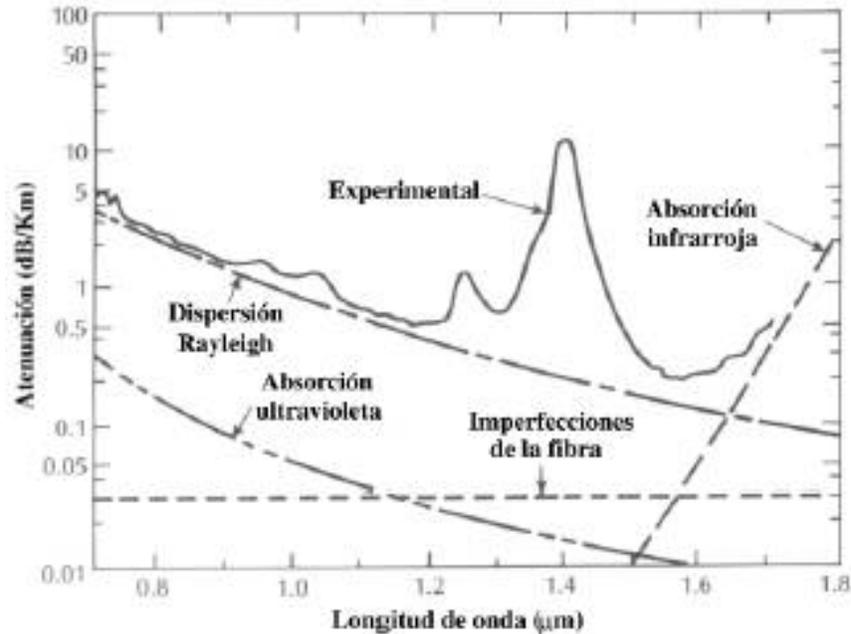


Figura 2.3: Espectro de atenuación medido para una fibra monomodo de ultra baja absorción. En la figura también aparecen los límites teóricos para la absorción intrínseca y Rayleigh<sup>s</sup>.

### 2.1.2 Pérdidas lineales por dispersión espacial

La dispersión lineal transfiere parte de la potencia contenida en un modo de propagación a otro modo de forma lineal (proporcional a la potencia del modo). Este proceso produce una atenuación ya que parte de la potencia transferida puede pasar a un modo no permitido que será radiado al exterior. Otra característica de este tipo de pérdidas es que no hay cambio de frecuencia (o longitud de onda) en el proceso de dispersión. Hay dos tipos principales en la dispersión lineal la Rayleigh y la Mie.

#### 2.1.2.1 Dispersión Rayleigh o pérdidas de Rayleigh

Es el mecanismo de dispersión predominante entre las colas de los picos de absorción ultravioleta e infrarrojo. Es causado por las inhomogeneidades de pequeña escala, pequeñas al

<sup>s</sup> Figura tomada de <http://www.iuma.ulpgc.es>

compararlas con el tamaño de la longitud de onda transmitida. Estas inhomogeneidades se manifiestan como fluctuaciones del índice de refracción y surgen debido a variaciones de composición en la fibra que se producen cuando ésta se enfría en su fabricación.

Las variaciones pueden ser reducidas mediante mejoras en la fabricación, pero las fluctuaciones de índice debidas a la congelación de defectos inhomogéneos (la densidad de defectos no es constante) es algo de carácter fundamental y no puede evitarse, lo cual se observó en la figura 2.1. Podemos apreciar que la atenuación disminuye con la longitud de onda, con lo que es preferible ir a longitudes de onda mayores (infrarrojo medio o lejano) y a índices de refracciones menores (la elección del material también cuenta).

Cuando un pulso de luz se envía en una fibra, parte del pulso se bloquea por partículas microscópicas en el vidrio (llamadas dopantes) y se esparce en todas las direcciones. Una parte de la luz se esparce de regreso en la dirección opuesta del pulso. Estas reflexiones son conocidas como backscatter. Las pérdidas por efecto Rayleigh son las de mayor influencia para las longitudes de onda comprendidas entre 400 y 1100nm. Evitarlas favorece, por tanto, la utilización de longitudes de onda lo mas altas posible.

### **2.1.2.2 Dispersión Mie O pérdidas de Mie**

La dispersión lineal también puede ser causada por inhomogeneidades de un tamaño similar a la longitud de onda transmitida. Son debidas a la estructura no exactamente cilíndrica de la fibra que es causada por imperfecciones de la fibra como las irregularidades en la entercará núcleo-revestimiento, éstas pueden ser la variación de la diferencia del índice de refracción a lo largo de la fibra, fluctuaciones en el diámetro, tensiones o burbujas. Cuando la inhomogeneidad es mayor que  $\lambda/10$  la intensidad dispersada depende mucho del ángulo.

Esta dispersión puede aminorarse:

- ✓ Reduciendo las imperfecciones debidas al proceso de fabricación.
- ✓ Controlar el proceso de la extrusión y recubrimiento.
- ✓ Incrementar la diferencia de índices de refracción

De este modo se puede reducir este tipo de dispersión a niveles despreciables

### **2.1.3 Pérdidas no lineales por dispersión**

Las fibras ópticas no siempre se comportan como canales de transmisión lineales en los cuales el incremento en la potencia de entrada implique un incremento proporcional de la potencia de salida. Hay varios efectos no lineales que en el caso que nos ocupa, la dispersión, provoca unos incrementos muy altos en la atenuación. Este efecto ocurre para elevadas potencias ópticas.

Esta dispersión no lineal genera que potencia de un modo sea transferida a otro, tanto en la misma dirección de propagación como en la contraria, este otro modo tendrá además una longitud de onda distinta. Esta dispersión depende fuertemente de la densidad de potencia óptica y sólo es significativa sobre determinados umbrales de potencia.

Los dos tipos de dispersión más importantes son la dispersión por estimulación Brillouin y Raman, ambos tipos sólo son observados a altas densidades de potencia en fibras ópticas monomodo de gran longitud. Estos fenómenos dispersivos de hecho proporcionan ganancia óptica pero con una variación de la longitud de onda. Estos fenómenos pueden aprovecharse para amplificación óptica.<sup>[8]</sup>

### 2.1.3.1 Dispersión por estimulación Raman

La dispersión de Raman se refiere a la interacción que sufren las ondas ópticas con las vibraciones moleculares del material. Las ondas incidentes se dispersan al chocar con las moléculas y experimentan una reducción de su frecuencia óptica. Este desplazamiento de frecuencia coincide precisamente con la frecuencia de vibración de las moléculas (llamada frecuencia de Stokes). Una cuestión a tener en cuenta se produce cuando se inyectan simultáneamente dos ondas ópticas separadas por la frecuencia de Stokes en un medio Raman activo. En este caso, la onda de menor frecuencia experimentará una ganancia óptica generada por, y a expensas, de la onda de mayor frecuencia (bombeo). Este proceso de ganancia se conoce como dispersión estimulada de Raman (SRS, Stimulated Raman Scattering) y constituye la base para la fabricación de los amplificadores ópticos de Raman. La eficiencia del proceso no lineal es directamente proporcional a la potencia de bombeo, la longitud efectiva de la fibra y un coeficiente de ganancia que depende del material, e inversamente proporcional al área efectiva de la fibra. El coeficiente de ganancia de Raman crece de forma aproximadamente lineal hasta una separación entre portadoras de unos  $500\text{cm}^{-1}$  ( $1\text{ cm}^{-1}$  equivale a  $30\text{ GHz}$ ). Esto significa que dos canales cualesquiera separados en frecuencia menor de  $15\text{THz}$ . se acoplarán entre sí por medio del SRS. Para una longitud de onda de  $1550\text{nm}$ , el coeficiente de ganancia Raman posee un valor máximo en torno a  $7 \cdot 10^{-12}\text{ cm./W}$ .

En el caso de un sistema óptico mono portadora puede generarse dispersión espontánea de Raman que posteriormente sea amplificada. No obstante, para que se produzca una degradación significativa son necesarias potencias ópticas del orden de  $1\text{ W}$ . En cambio, en sistemas con multiplexación de longitud de onda (WDM) la situación es bastante diferente, dado que ahora existen multitud de canales y las señales situadas a longitudes de onda superiores serán amplificadas por los canales situados a longitudes de onda inferiores. En la región de  $1550\text{nm}$ ., el perfil de ganancia Raman de la sílice acoplará canales separados hasta  $100\text{nm}$ ., por lo que la degradación se producirá para potencias ópticas bastante inferiores. Para unos cuantos canales, el límite de potencia decrece como  $1/N$  debido a que el espectro Raman es bastante ancho y las potencias de todos los canales contribuyen al proceso de SRS. Conforme se añaden más canales, el ancho de banda óptico ocupado aumenta y las interacciones entre canales resultan más

significativas, decreciendo el límite de potencia óptica como  $1/N^2$ . Estos resultados se representan en el gráfico de la figura 2.4.

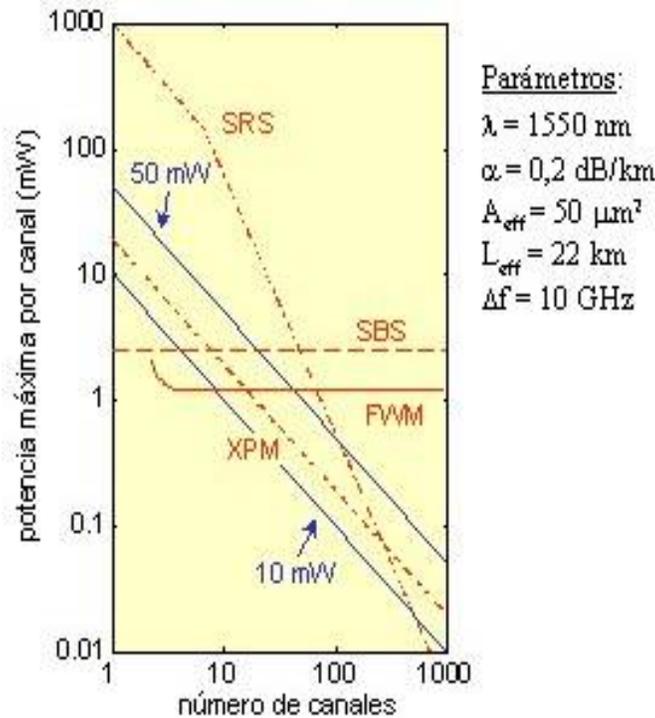


Figura 2.4: Potencia máxima por canal para evitar la influencia de distintos efectos no lineales<sup>1</sup>.

Recientes estudios teóricos y experimentales han demostrado que en un sistema WDM el SRS conduce a una distribución de potencia exponencial en los canales que aumenta con la distancia. Una posible solución para eliminar estos efectos de diafonía consiste en el empleo de la técnica de inversión espectral. La técnica de inversión espectral consiste en la conjugación de la señal óptica y se ha utilizado con éxito en la cancelación de la diafonía producida por SRS en redes WDM. Su implementación se basa en fenómenos no lineales como el mezclado de cuatro ondas o técnicas de generación de frecuencia diferencia.<sup>[10]</sup>

<sup>1</sup> Figura tomada de <http://www.radioptica.com>

### 2.1.3.2 Dispersión por estimulación Brillouin

La dispersión por estimulación Brillouin puede explicarse como una modulación de la luz debida a vibraciones térmicas moleculares en el interior de la fibra. La luz dispersada aparece como unas bandas de frecuencia laterales (como una modulación de frecuencia), estas bandas laterales aparecen en transmisión en la dirección contraria a la de la luz dispersada.<sup>[8]</sup>

El proceso no lineal de dispersión estimulada de Brillouin (SBS, Stimulated Brillouin Scattering) es similar al SRS, salvo que el SBS depende de ondas sonoras en lugar de vibraciones moleculares. En este aspecto, ambos procesos involucran tres ondas según las cuales la onda óptica incidente (bombeo) se convierte en una onda de Stokes de mayor longitud de onda por medio de la excitación de una vibración molecular (SRS) o de un fonón acústico (SBS). No obstante, existen importantes diferencias entre el SBS y el SRS que conducen a consecuencias distintas en el sistema de comunicaciones ópticas.

En primer lugar, el valor de pico del coeficiente de ganancia en fibras ópticas monomodo es dos órdenes de magnitud superior ( $4 \cdot 10^9$  cm./W) que el coeficiente de ganancia para el SRS y aproximadamente independiente de la longitud de onda. Como consecuencia de ello, bajo determinadas condiciones el SBS será el proceso no lineal dominante. En segundo lugar, el ancho de banda de ganancia óptica del SRS es del orden de  $200 \text{ cm}^{-1}$ . Por lo tanto, no existe prácticamente reducción en la ganancia Raman para láseres de bombeo de gran ancho de línea. El ancho de banda del SBS en fibras de sílice, por otro lado, es de unos 20-100MHz a 1550nm y varía como  $\lambda^{-2}$ . En este caso, la máxima ganancia del SBS se producirá para láseres con anchos de línea inferiores a 20MHz. Adicionalmente y a diferencia del SRS, el cual puede actuar en ambas direcciones, el SBS se produce únicamente en la dirección de propagación opuesta a la del bombeo, generando una onda reflejada hacia el transmisor y provocando la atenuación de la potencia óptica inyectada. En el caso de fibras estándar operando a 1550nm. la onda dispersada se encuentra desplazada con respecto a la onda incidente una frecuencia de unos 11 GHz.

Con respecto al nivel de potencia óptica crítico para el cual el SBS degrada la calidad del sistema, éste se encuentra en torno a los 3 mW. En sistemas multicanal con multiplexación por longitud de onda (WDM) puede demostrarse que cada canal óptico interactúa con la fibra independientemente de los otros, por lo que la potencia crítica se mantiene constante aumentando el número de canales del sistema. Por último, conviene indicar que el SBS es bastante sensible al formato de modulación empleado. Velocidades de modulación elevadas producen espectros ópticos anchos y una reducción de la amplificación estimulada por Brillouin. De este modo, el empleo de modulaciones PSK permite reducciones mayores que utilizando modulaciones ASK o FSK. Para aumentar el nivel de potencia crítica del SBS en sistemas modulados en intensidad suelen utilizarse técnicas de modulación de fase de la portadora óptica que no afectan al proceso de detección directa. Un efecto beneficioso se obtendría empleando modulación directa frente a modulación externa debido precisamente al chirp de frecuencia introducido en el transmisor óptico que provoca un ensanchamiento del espectro de modulación.<sup>[10]</sup>

#### **2.1.4 Pérdidas por curvas de la fibra óptica**

Las pérdidas por curvatura como se puede ver en la figura 2.5a se producen porque los rayos de luz en el exterior de una curva pronunciada no pueden viajar con suficiente rapidez como para mantener el ritmo de los demás rayos, y se pierden. A medida que la luz recorre la curva, la luz del exterior de la misma debe viajar más deprisa para mantener una fase constante de la onda. Según se va reduciendo el radio de curvatura, se llega a un punto en que parte de la onda tendría que viajar más rápido que la velocidad de la luz. En ese punto, la luz del guía ondas se pierde. Las pérdidas por curvatura también pueden ocurrir en escala más pequeña. Curvas pronunciadas del núcleo de una fibra con desplazamientos de unos pocos milímetros o menos, causadas por la protección exterior de la fibra, la fabricación, el procedimiento de instalación, etc., pueden causar también pérdidas de potencia. Las cuales se denominan pérdidas por micro curvaturas y pueden ser significativas para grandes distancias.<sup>[11]</sup>

Las micro curvaturas son pequeñas desviaciones y tortuosidades que por diversas causas presenta el eje de la fibra como se muestra en la figura 2.5b, por ejemplo cuando se aplica presiones irregulares a la fibra óptica después de su fabricación. Es necesario tener en cuenta este tipo de atenuación porque su causa es muy correcta y puede originar modificaciones de la atenuación de una fibra óptica cableada, respecto a los valores teóricos esperados que pueden superar todas las previsiones. En cambio con un adecuado control de los procesos de fabricación, enfundado y cableado (incluso instalación) de la fibra óptica, se conseguirá mantener el coeficiente adicional de atenuación debida a microcurvaturas dentro de límites tolerables.<sup>[12]</sup>

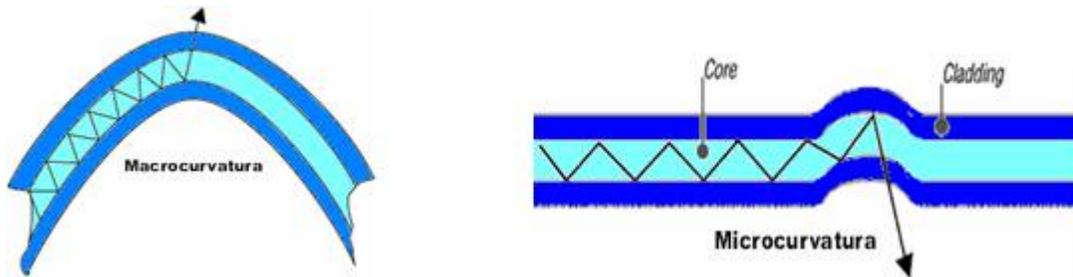


Figura 2.5: Pérdidas por curvaturas y microcurvaturas<sup>u</sup>.

### 2.1.5 Pérdidas por conexión y empalmes

En los cables de fibra pueden presentarse pérdidas por acoplamiento en cualquiera de los tres tipos siguientes de uniones ópticas: conexiones de fuente luminosa a fibra, conexiones de fibra a fibra y conexiones de fibra a fotodetector. Las pérdidas en las uniones se deben, a uno de los siguientes problemas de alineación: desalineamiento lateral, desalineamiento de entrehierro, desalineamiento angular y acabados superficiales imperfectos. Estas imperfecciones se ven en la figura 2.6.

**Desalineamiento lateral.** Figura 2.6a, y es el desplazamiento lateral o axial entre dos tramos de cables de fibra adjuntos. La cantidad de pérdida puede ser desde un par hasta varias décimas de dB, o hasta varios dB. Esta pérdida suele ser despreciable si los ejes de las fibras se alinean a menos de 5% del diámetro de la fibra menor.

<sup>u</sup> Figura tomada de <http://www.yio.com.ar>

**Desalineamiento de entrehierro.** Figura 2.6b, y a veces se llama *separación entre extremos*. Cuando se hacen *empalmes* en fibra óptica, las fibras se deben tocar realmente. Mientras más alejadas queden, la pérdida de luz será mayor.

**Desalineamiento angular.** Éste se ve en la figura 2.6c, y a veces se llama *desplazamiento angular*. Si el desplazamiento angular es menor que  $2^\circ$ , la pérdida será menor que 0.5 dB.

**Acabado superficial imperfecto.** Figura 2.6d. Los extremos de las dos fibras adjuntas deben estar muy pulidos y asentar entre sí. Si los extremos de las fibras están menos de  $3^\circ$  fuera de la perpendicular, las pérdidas serán menores que 0.5dB.<sup>[9]</sup>

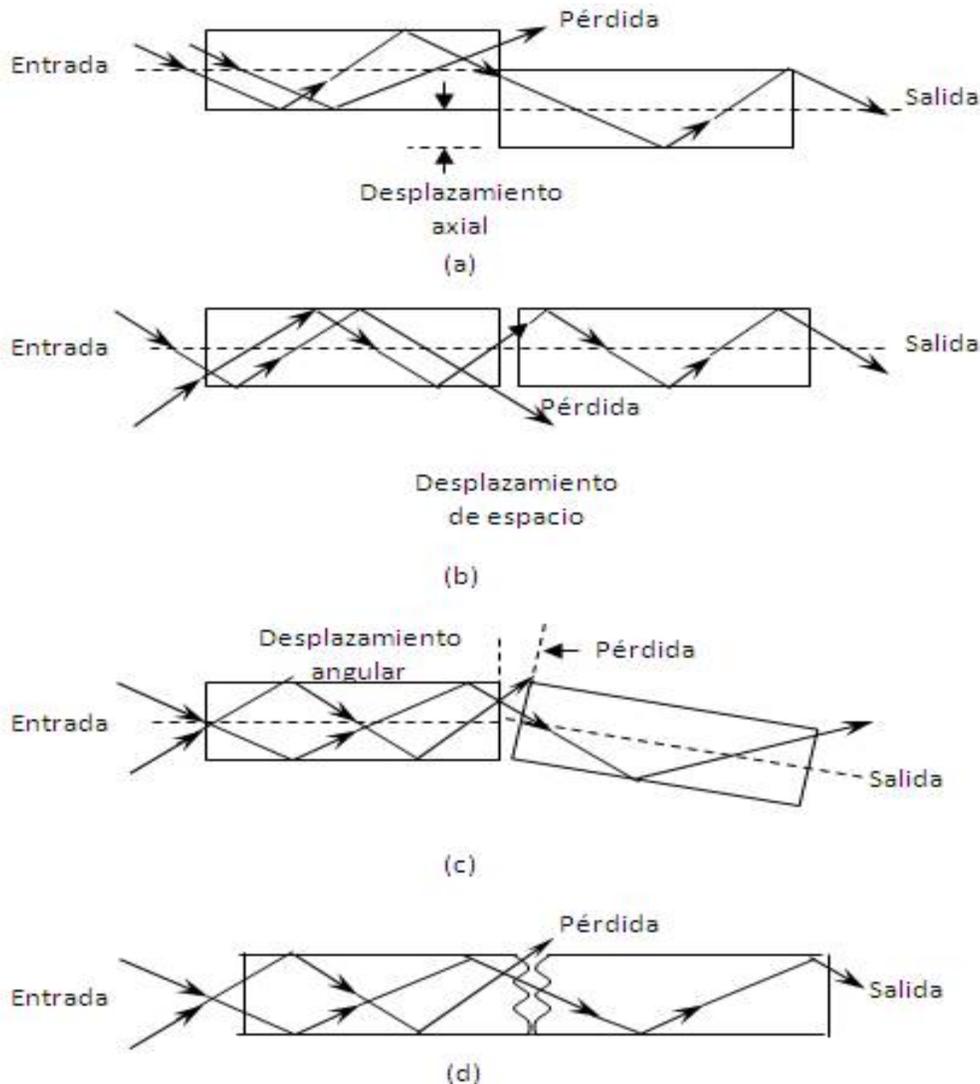


Figura 2.6: Defectos en el alineamiento de las fibras: (a) desalineamiento lateral; (b) desalineamiento de entrehierro; (c) desalineamiento angular; (d) acabado superficial<sup>v</sup>.

<sup>v</sup> Figura tomada de <http://www.ub.edu.ar>

## 2.2 Dispersión temporal

La dispersión temporal de la señal óptica tiene los mismos efectos que para señales eléctricas, genera distorsión tanto en señales analógicas como digitales, es como pasar una señal a través de un filtro paso bajo. Si analizamos lo que le ocurre a una señal digital que se transmite como pulsos de luz a través de una fibra óptica los mecanismos de dispersión temporal ensanchan los pulsos según avanzan en la fibra. El fenómeno aparece representado en la figura 2.7 en la cual puede observarse cómo cada pulso se ensancha y acaba superponiéndose con sus vecinos llegando a ser indistinguible en la recepción. Este efecto se conoce como Interferencia entre Símbolos (en inglés ISI de Inter Symbol Interference), el número de errores en la recepción se incrementa cuando la ISI se incrementa. La dispersión temporal por si sola limita el ancho de banda para una longitud de fibra determinada cuando los símbolos ya no pueden separarse.

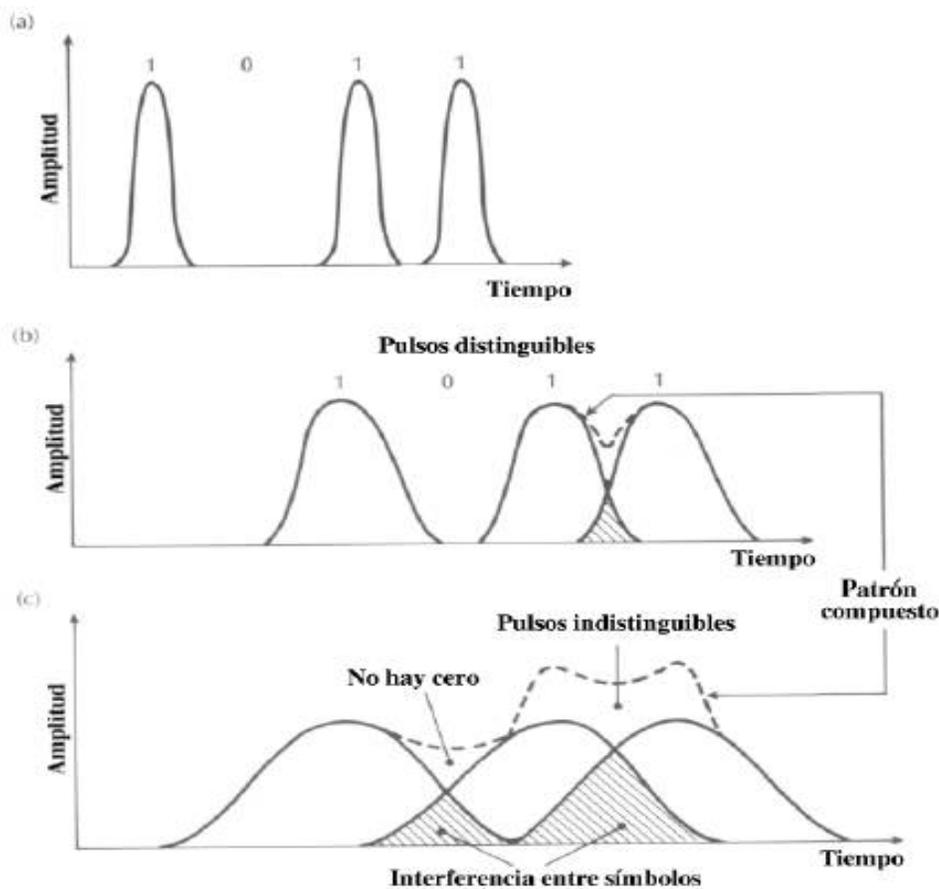


Figura 2.7: Representación esquemática del ensanchamiento de los pulsos de luz según se transmiten por la fibra óptica<sup>w</sup>.

<sup>w</sup> Figura tomada de <http://www.iuma.ulpgc.es>

### Diferencias entre tipos de fibras

Los tres tipos típicos de fibras y su efecto sobre la dispersión temporal de las señales que se transmiten por ellas están representadas en la figura 2.8. Puede observarse que las fibras multimodo sufren de una dispersión temporal mayor que las monomodo y entre las multimodo la de índice abrupto tienen una dispersión mucho mayor que las de índice gradual. El ancho de banda de las fibras monomodo está en el rango de los GHz, mientras que en las multimodo estamos en el rango de entre decenas a cientos de MHz. Por supuesto no sólo el tipo de fibra fija el ancho de banda sino también la longitud del enlace, así pues para la comunicación por fibra óptica entre dos puntos el ancho de banda una vez fijado el tipo de fibra viene determinado por la distancia entre repetidores regenerativos (amplifican la señal y la regeneran eliminando pues el ensanchamiento). Tras estos datos ya podemos entender el motivo por el cual la medida de las propiedades dispersivas de una fibra concreta se hace como el ensanchamiento de la señal (tiempo) sobre una unidad de distancia, por ejemplo  $ns./km$ .

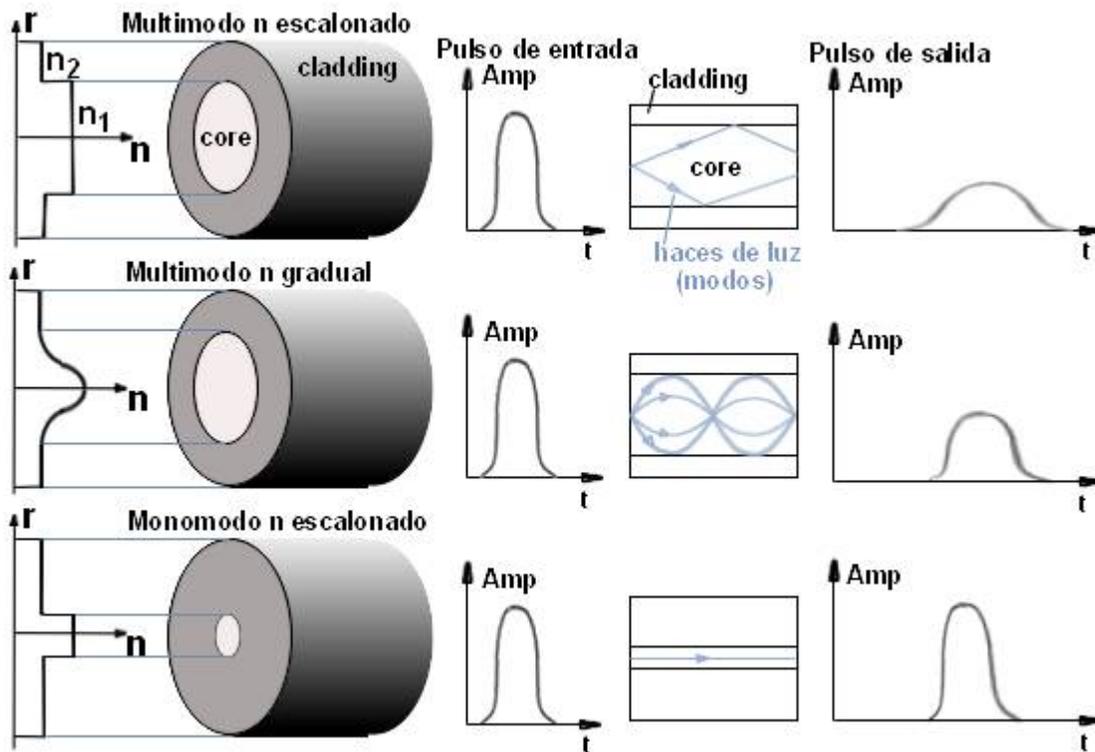


Figura 2.8: Representación de una fibra abrupta multimodo, una gradual multimodo y una abrupta monomodo<sup>x</sup>.

<sup>x</sup> Figura tomada de <http://www.iuma.ulpgc.es>

El ancho de banda es inversamente proporcional a la distancia, esto conduce a la definición de un parámetro para la capacidad de la fibra para transmitir información, este parámetro se conoce como el producto longitud-ancho de banda ( $L * B_{opt}$ ). Como valores típicos de este parámetro para los tres tipos de fibras de la figura 2.8 tenemos 20 MHz/Km., 1 GHz/Km. y 100 GHz/Km. para las fibras abruptas multimodo, graduales multimodo y monomodo respectivamente.

Los mecanismos por los que se origina la dispersión temporal son por dispersión cromática, dispersión modal y dispersión del modo polarizado.

### **2.2.1 Dispersión temporal intramodal**

La dispersión intramodal o cromática puede darse en todos los tipos de fibra y es debido a que el emisor óptico no es totalmente monocromático sino que tiene un ancho de banda espectral. En el caso de los láseres el ancho de banda es pequeño pero en los LED's ya es un porcentaje significativo respecto a la frecuencia central de emisión, este ancho de banda no nulo implica que puede haber diferencias en la velocidad de transmisión de cada una de las componentes espectrales de la señal. Las diferencias en la velocidad de transmisión ensancharán los pulsos de luz dentro de un modo, por ello se llama intramodal. Las diferencias en los retardos de las diferentes componentes cromáticas de cada modo pueden ser debidas a dos motivos, las propiedades dispersivas del material de la fibra (dispersión del material) y al guiado en la estructura de la fibra (dispersión de la guía-onda).

#### **2.2.1.1 Dispersión del material**

El ensanchamiento del pulso debido a la dispersión del material es el resultado de las velocidades de los distintos componentes cromáticos que forman parte del espectro del emisor. La velocidad de fase de una onda plana propagándose en el interior de la fibra varía de forma no lineal con la longitud de onda,. El ensanchamiento del pulso debido a la dispersión del material puede obtenerse a partir del retardo de grupo  $t_g$  que es la inversa de la velocidad de grupo  $v_g$ .

### **2.2.1.2 Dispersión de la guía - onda**

El fenómeno de guiado en el interior de la fibra también puede causar dispersión temporal. Es debido a la variación de la velocidad de grupo con la longitud de onda para un modo particular. Basándonos en la aproximación geométrica sabemos que un modo se define con el ángulo que hay entre el rayo y el eje de la fibra. Si este ángulo se modificara al cambiar la longitud de onda tendríamos dispersión ya que los caminos recorridos serían distintos para cada longitud de onda.

Las fibras multimodo en las que los modos principales se transmiten lejos de la longitud de onda de corte están prácticamente libres de este fenómeno, de hecho es despreciable frente a la dispersión del material. En las fibras monomodo el modo fundamental está cercano a la longitud de onda de corte y la dispersión de la guía-onda ya no es despreciable, aunque es difícil separar ambos tipos de dispersión de forma numérica.

### **2.2.2 Dispersión temporal intermodal o modal**

El ensanchamiento de los pulsos debido a dispersión temporal intermodal, también llamada dispersión modal, es debida a los retardos de propagación entre distintos modos y por tanto no afecta a las fibras monomodo. Los distintos modos que constituyen un pulso lumínico tienen distintas velocidades de grupo y por tanto el ensanchamiento del pulso depende de las diferencias entre los tiempos de transmisión del modo más lento y más rápido. Este mecanismo genera la diferencia mayor en el comportamiento de las fibras de la figura 2.8. Las fibras multimodo sufren este fenómeno y entre ellas en mucha mayor medida las de índice abrupto, por tanto a partir de ahora todos los comentarios irán dedicados a fibras multimodo.

El ensanchamiento en fibras graduales es mucho menor que el que se obtiene en fibras con índice abrupto, la relación entre ambas puede ser de 100. Esto implica que las fibras graduales tienen una gran ventaja por su mucho mayor ancho de banda.

### 2.2.3 Dispersión del modo polarizado

Un mecanismo que contribuye al ensanchamiento del pulso que se propaga por una guía onda óptica está relacionado con la birrefringencia de la fibra. Aunque el fenómeno viene caracterizado por magnitudes de pequeño valor frente a la dispersión cromática, presenta gran importancia cuando se trabaja con fibras monomodo que tienen el cero de dispersión cromática en las proximidades de la ventana de trabajo. En fibras monomodo, las dos componentes del modo fundamental se encuentran polarizadas perpendicularmente entre sí como se puede apreciar en la figura 2.9.

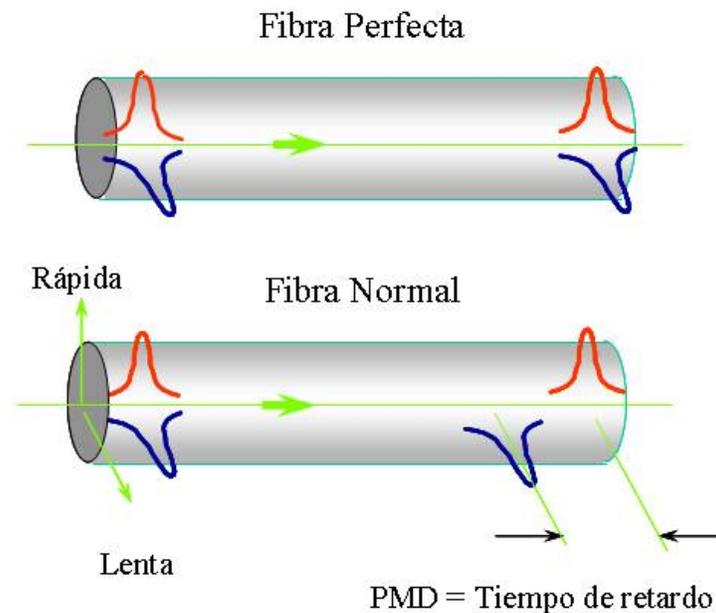


Figura 2.9: Representación gráfica de la Dispersión por Modo de Polarización<sup>y</sup>. Tomada de [www2.uah.es](http://www2.uah.es)

Debido a las asimetrías del núcleo, es decir a no presentar exactamente el mismo índice de refracción ni el mismo diámetro, en las dos direcciones perpendiculares de cada componente del modo, estas se propagarán con velocidades de grupo diferentes y alcanzarán el extremo en tiempos distintos. Este fenómeno se conoce como dispersión del modo polarizado (PMD) y ha sido ampliamente estudiado en los últimos años, debido a su influencia en los sistemas que trabajan con amplificación óptica en la ventana de los 1550 nm. con fibras de dispersión desplazada (dispersión cromática casi nula en las longitudes de onda de trabajo).<sup>[13]</sup>

<sup>y</sup> Figura tomada de <http://www2.uah.es>

### 2.3 Ventanas de operación u ópticas

Como suma de todos los efectos enumerados anteriormente, si se mide la atenuación espectral que presenta una fibra óptica, se obtiene una curva similar a la reflejada en la figura 2.10. Aunque la forma sea similar para casi todas las fibras de sílice, la escala de atenuaciones dependerá de la naturaleza de la fibra: Proceso de fabricación empleado para obtenerla, materiales que contenga, estructura geométrica, etc.<sup>[14]</sup>

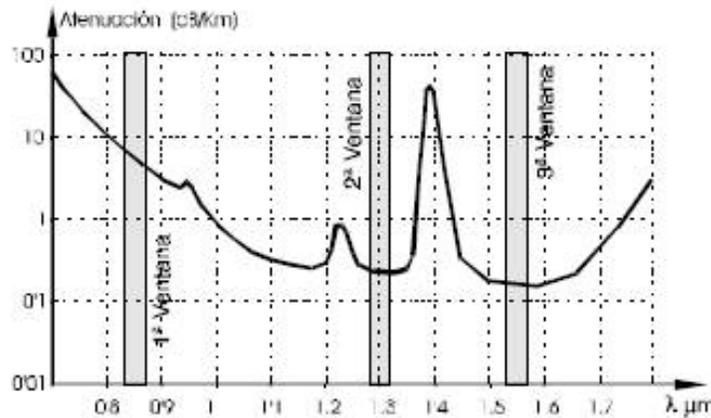


Figura 2.10: Pérdidas totales en función de la longitud de onda<sup>2</sup>.

Se ha descubierto por medio del análisis matemático y también a través de experimentos que en varios materiales existen las llamadas "ventanas ópticas". Esto significa que a unas determinadas frecuencias, las ondas pasaran a través de esos materiales más fácilmente que a otras frecuencias (luminosas). Parece ser que en el caso de las fibras ópticas, si tenemos frecuencias por encima de unas 1,28 micras (o en la región infrarroja), los efectos de dispersión y de las pérdidas de material debidas a la propagación de las ondas tienden a cancelarse unas con otras y crear "ventanas" (significando una transmisión a esas frecuencias realmente buena pues se han reducido las pérdidas en la fibra). Algunos experimentos tienden a demostrar que trabajando en frecuencias aún mayores que las infrarrojas, se puede llegar a conseguir unas características de transmisión, incluso sobre distancias superiores que las que hasta ahora se habían alcanzado.

<sup>2</sup> Figura tomada de <http://www ldc.usb.ve>

Lo que se desea es la "ventana" apropiada para que los rayos de luz puedan ser enviados a nuestros dispositivos entrada/salida y obtener las mejores características de computación, control y comunicación. Esto quiere decir que los dispositivos de salida deben ajustarse a la fibra óptica para la transmisión de las frecuencias de la luz apropiadas con la intensidad correcta, así como con el ángulo de entrada y la polarización adecuadas. El dispositivo de entrada debe ser diseñado de forma que acepte eficientemente esa polarización para asegurar un sistema lo más fiable, eficiente y de coste eficaz.<sup>[15]</sup>

Existen en el espectro tres ventanas de aplicación u ópticas:

- ✓ La ventana de 850nm que abarca desde 800nm a los 900nm. Los haces de luz en este rango tienen tonalidades rojas e infrarrojas y su potencia se considera como baja, la mayoría de los equipos de redes utilizan esta ventana. La fibra óptica multimodo trabaja con esta ventana.
- ✓ La ventana de los 1310nm que cubre desde los 1250nm hasta los 1350nm. Esta gama de luz es invisible y su potencia es alta, sólo los equipos de redes de excelente calidad o para cubrir largas distancias utilizan esta ventana. La fibra óptica monomodo trabaja con esta ventana y opcionalmente la multimodo.
- ✓ La ventana de los 1500nm que va desde los 1500nm hasta los 1600nm. Propiamente son emisiones láseres invisibles, su potencia se considera muy alta y sus aplicaciones comerciales se ven muy reducidas debido al alto costo de los equipos. Sólo la fibra óptica Monomodo soporta esta ventana.<sup>[16]</sup>

## CAPÍTULO 3

# FUENTES, RECEPTORES Y AMPLIFICACIÓN ÓPTICA

### 3.1 Fuentes ópticas

Las fuentes de luz para telecomunicaciones vía fibras ópticas deben de ser compatibles con la fibra: pequeñas, fáciles de modular a las velocidades utilizadas en los sistemas de comunicación y confiables. Dos tipos de fuentes de luz son compatibles para estas aplicaciones, los diodos emisores de luz (LED) y los diodos láser (LD). Estos dispositivos son diodos semiconductores que operan en polarización directa y emiten luz cuando los huecos y electrones se recombinan en la zona activa. La modulación se realiza variando la corriente de excitación de los diodos, para lo cual se utiliza un circuito que proporciona una corriente modulada de niveles altos (10mA – 100mA). Estos tipos de fuentes de luz proporcionan suficiente potencia óptica (0.005mW – 25mW) para transmitir señales a través de las fibras ópticas a varios kilómetros. En aplicaciones ordinarias, la potencia de salida puede variarse con la corriente de operación para frecuencias de modulación de hasta varias decenas de MHz, sin necesidad de modulación adicional o externa.

Los sistemas diseñados en los años 70 utilizaron dispositivos con capas epitaxiales de AlGaAs crecidas en substratos de GaAs, los cuales emiten luz en la longitud de onda de 800 nm – 900 nm, que se detecta con fotodiodos de alta sensibilidad. Los LED de estas longitudes de onda, como fuentes de luz de alta velocidad se limitaron a usarse en distancias cortas de transmisión y los LD fueron las fuentes adecuadas para los sistemas de telecomunicaciones. El desarrollo de las fibras ópticas con poco contenido de OH, dio como resultado menor atenuación en la longitud de onda de 1300nm, por un factor de tres y algo menor en 1550 nm. La dispersión cromática en 1300nm es menor que en 850nm. Esto motivó el desarrollo de los materiales semiconductores para fuentes de luz en esta ventana.

A la fecha se han desarrollado semiconductores con doble cristal mezclado de InGaAsP que pueden crecerse epitaxialmente en sustratos de InP en varias composiciones para cubrir el intervalo de longitud de onda de 920nm a 1650nm.

Los LED generan luz por emisión espontánea, radiándola en todas direcciones, por lo que un porcentaje pequeño se acopla a la fibra óptica, normalmente del tipo multimodo. El LD tiene construida internamente una cavidad resonante tal, que cuando se excede la corriente de umbral se tiene una emisión estimulada con gran amplificación de luz que se genera con alta coherencia, la cual puede acoplarse dentro de una fibra multimodo o monomodo.

En la selección de la fuente óptica compatible con la fibra deben de tomarse en cuenta varias características, tales como: su geometría, su atenuación como función de la longitud de onda, su distorsión de retardo y sus características modales. Cuando se decide seleccionar un LED o un LD se debe hacer un compromiso entre las ventajas y limitaciones de cada dispositivo.<sup>[17]</sup>

A continuación se presenta una tabla comparativa entre el LED y el Láser.

<b>Característica</b>	<b>LED</b>	<b>LASER</b>
Potencia de salida	Linealmente proporcional a la corriente conducida	Proporcional a la corriente sobre el umbral
Corriente	Conduce corriente de 50 a 100 mA Pico	Corriente de umbral de 5 a 40 mA
Potencia del acoplamiento	Moderada	Alta
Velocidad	Lento	Rápido
Ancho de banda	Moderado	Alto
Longitudes de onda que se pueden utilizar	0.66 a 1.65 $\mu\text{m}$	0.78 a 1.65 $\mu\text{m}$
Tipo de Fibra	Solamente multimodo	Multimodo o monomodo
Facilidad de uso	Fácil	Difícil
Tiempo de vida	Muy larga vida	Larga vida
Costo	\$5 - \$300	#100 - \$10 000

*Tabla 3.1: Comparativa de las características de un diodo LED y un diodo LASER típicos<sup>a</sup>.*

<sup>a</sup> Tabla tomada de <http://www.eie.ucr.ac.cr>

### **3.1.1 Diodo emisor de luz “LED”**

Del acrónimo del inglés Light Emitting Diode, un LED es una unión semiconductor p-n que emite luz cuando se polariza directamente.

Cuando se une un semiconductor tipo n con un semiconductor tipo p, se tiene que tanto los electrones libres en la región n, como los huecos libres en la región p no tienen la suficiente energía para sobrepasar la barrera de unión y desplazarse hacia la región opuesta. En este punto, la energía potencial de los huecos, siendo opuesta a la de los electrones provoca un incremento en la barrera de unión.

Al aplicar un voltaje directo en la unión y agregar impurezas dopantes para proveer una mayor cantidad de electrones y huecos durante la emisión, la barrera de separación se reduce. Si la energía suplida es al menos igual que la energía en la región prohibida los electrones libres y los huecos libres tendrán la suficiente energía para moverse en la región de unión. Cuando un electrón libre se une con un hueco libre en la barrera de unión, el electrón puede pasar a la banda de valencia. La energía perdida en la transición es convertida en energía óptica en forma de un fotón.

#### **3.1.1.1 Construcción**

Diversos materiales y aleaciones se utilizan para obtener diferentes niveles de energía en la banda prohibida. La siguiente tabla presenta algunos de los materiales usados en la fabricación de LED's, así como su longitud de onda de operación y su energía de banda prohibida.<sup>[18]</sup>

Material	Longitud de onda (nm)	Energía de banda prohibida (eV)
GaInP	640 - 680	1.82 - 1.94
GaAs	900	1.4
AlGaAs	800 - 900	1.4 - 1.55
Ingaes	1000 - 1300	0.95 - 1.24
InGaAsP	900 - 1700	0.73 - 1.35

Tabla 3.2: Materiales utilizados en la fabricación de LED's y sus características<sup>b</sup>.

Para la fabricación de LED's de alta eficiencia que acoplen suficiente energía es necesario que la recombinación de electrón - hueco se realice en un área pequeña, y que los fotones emitidos se radien en una dirección preferida. Esto se logra confinando a los portadores de carga en un área pequeña con barreras de potencial y confinando a los fotones con perfiles adecuados de índices de refracción.

Existen dos tipos de LED uno que emite la luz a través de la superficie de la zona activa y otro que emite a través de la sección transversal.

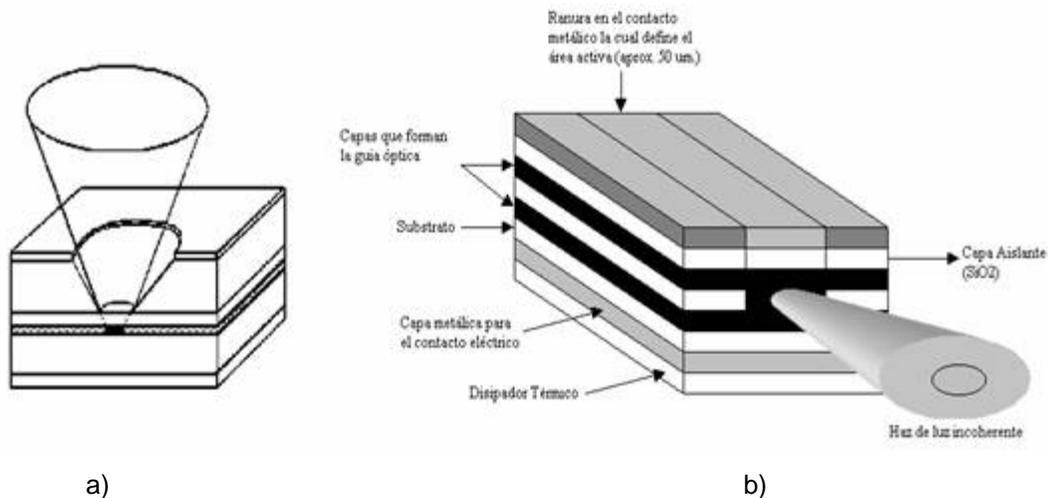


Figura 3.1: a) Led de perfil, b) Led de superficie<sup>c</sup>.

<sup>b</sup> Tabla tomada de <http://www.eie.ucr.ac.cr>

<sup>c</sup> Figura tomada de Jardón, A. H.

El acoplamiento entre un LED y la fibra óptica puede ser directo, solamente colocando la fibra en la proximidad a la zona de emisión o a través de una lente. Una ilustración de estos dos acoplamientos se muestra en la figura 3.1<sup>[17]</sup>:

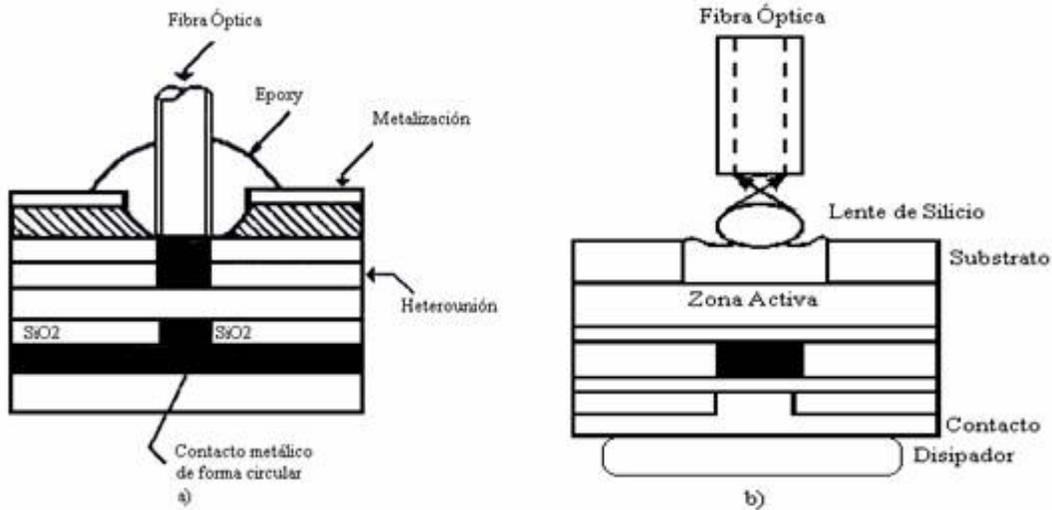


Figura 3.2: Representación de acoplamientos LED – Fibra Óptica<sup>d</sup>.

### 3.1.1.2 Características de operación de un LED

La potencia óptica generada por un LED es linealmente proporcional a la corriente que circula por el dispositivo cuando es directamente polarizado. Típicamente un LED opera alrededor de los 50 a 100 mA y requiere un voltaje de 1.2 a 1.8V.

Un LED puede ser modulado analógicamente o digitalmente, como se detalla a continuación:

La modulación digital se puede hacer mediante una fuente de corriente, la cual hace simplemente que el LED se encienda y se apague. La modulación analógica requiere de una componente de corriente directa para tener todo el tiempo el valor de la corriente total en la dirección de polarización directa. Sin esta componente dc, una oscilación negativa en la señal de corriente podría polarizar inversamente el diodo, apagándolo.

<sup>d</sup> Figura tomada de Jardón, A. H.

Los LED's comerciales presentan un ancho de banda relativamente pequeño. Valores típicos se encuentran dentro del rango de 1 a 100 MHz. El tiempo de levantamiento típico de un LED va de unos pocos nano segundos hasta 250 ns. La eficiencia de acoplamiento depende del patrón de radiación del diodo. Los LED's son muy confiables y de larga duración si se les utiliza dentro de los límites de potencia, voltaje, corriente y temperatura especificados por el fabricante.

### **3.1.2 El diodo láser (LD)**

La palabra Láser es el acrónimo en inglés de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, que corresponde a amplificador de luz por emisión estimulada de radiación.

Los diodos Láser son semiconductores complejos que convierten la señal eléctrica en señal de luz. La corriente inyectada en la unión p-n semiconductor polarizada con DC se transforma en señal luminosa debido a la combinación interna de los electrones inyectados. El resultado es que la potencia óptica a la salida del dispositivo es capaz de seguir (hasta una cierta velocidad impuesta por su ancho de banda de modulación) las variaciones temporales de la corriente eléctrica de inyección, donde se emplea este efecto para regular la luz, la combinación se produce por emisión estimulada<sup>[18]</sup>.

A mediados de la década de los setenta, con la introducción del uso de la segunda y tercera ventana (1300 y 1500nm), da como resultado el avance en las fuentes emisoras, sobre todo en rayos láser. En 1977 se consigue el primer láser semiconductor de la segunda ventana y en 1979 el láser para la tercera ventana. Hasta la década de los ochenta los láser disponibles eran del tipo Fabry – Perot (FP), estos son láser más económicos pero ruidosos y lentos. En este tipo de láser la potencia óptica de salida se encuentra en una cavidad formada por dos espejos parcialmente reflectantes. Éste láser se caracteriza por emitir varias longitudes de onda equiespaciadas (láser multimodal)

Cuando la transmisión se pasó a la tercera ventana y por el alto valor del coeficiente de dispersión cromática, se necesitó obtener fuentes con un ancho de banda reducido, eso significa reducir la cantidad de modos o longitudes de onda. Por lo tanto, dejar el láser de un solo modo. Es así, como aparecen los láser monomodo. Las estructuras más desarrolladas de este tipo de láser son los de realimentación distribuida (DFB) y el láser con Reflectores de Bragg Distribuidos (DBR).

El láser monomodo se utiliza en aplicaciones digitales de alta velocidad, debido a su bajo ruido y linealidad. Desde finales de los noventa estos láseres son de tipo comercial. Su anchura típica espectral es de 10 MHz, modulables a alta velocidad, pudiendo sobrepasar los 10 Gb/s. Un requisito que se le ha exigido a los láseres semiconductores es la posibilidad de sintonizar su emisión de luz a un margen de longitud de onda. Los láseres DFB y DBR cumplen con dicho requisito si tienen la configuración de multielectrodo, donde se divide el electrodo superior en dos o tres secciones para conseguir una atenuación no uniforme, con un control sobre ciertos parámetros como la corriente de alimentación, longitud de onda de emisión y corriente de modulación.<sup>[17]</sup>

### **3.1.2.1 Funcionamiento**

Cuando el diodo es directamente polarizado, las cargas son introducidas dentro de la capa activa donde la recombinación tiene lugar causando la emisión espontánea de fotones, caso semejante al explicado para la emisión del LED, sólo que algunas de las cargas introducidas dentro del semiconductor son estimuladas para emitir otros fotones. Si la densidad de corriente es lo suficientemente alta, entonces un gran número de cargas introducidas están disponibles para estimular la recombinación. Entonces de este modo la ganancia óptica se hace mayor.

La corriente de umbral es alcanzada cuando es lo suficientemente grande como para vencer las pérdidas del diodo. En este punto, la oscilación láser ocurre. La corriente de umbral debe ser pequeña para prevenir el sobrecalentamiento del semiconductor, particularmente cuando opera de forma continua o con altos picos de potencia.

### 3.1.2.2 Construcción

La construcción de los diodos láser tiene una estructura muy similar a los diodos emisores de luz. La cavidad láser, típicamente de 300 nm, se conforma al pegar a lo largo de las caras frontal y superior del semiconductor planos cristalinos paralelos. Por medio de esto, se logra una cantidad importante de reflexión que provee la suficiente realimentación para que se presente la oscilación y se genere así la emisión estimulada.<sup>[18]</sup>

La diferencia consiste en que la emisión de un Diodo Láser es por lo regular de perfil, y sobre éste, las superficies tienen características de espejos semirreflejantes. La estructura del Láser así como una comparación de los espectros emitidos por un LED y un Diodo Láser se ilustra en la siguiente figura<sup>[17]</sup>:

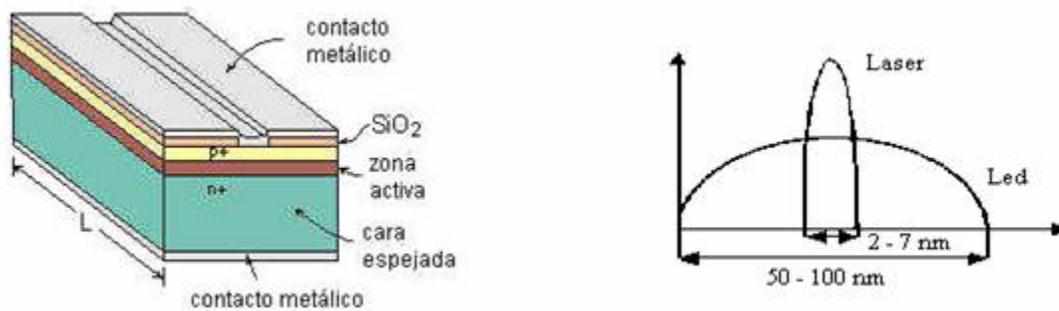


Figura 3.3: Estructura de un diodo láser y espectro de radiación<sup>o</sup>.

Otro tipo de arquitectura que se utiliza es el VCSEL que emite la luz láser verticalmente desde su superficie y tiene una cavidad vertical. Su funcionamiento es bastante semejante al de un diodo láser semiconductor de flanco emitido. El corazón de este láser es una región activa que emite luz. Capas de materiales semiconductores sobre y debajo de la región activa crean espejos. Cada espejo reflejante produce un estrecho rango de longitudes de onda regresando a la cavidad causando una emisión de luz de una simple longitud de onda.

<sup>o</sup> Figura tomada de Jardón, A.

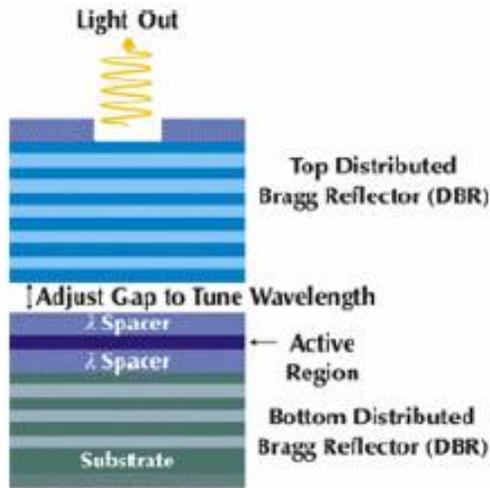


Figura 3.4: Construcción de un Láser VCSEL<sup>f</sup>.

### 3.1.2.3 Características de operación

La curva característica de potencia contra la corriente cuando el diodo láser se halla directamente polarizado se presenta a continuación:

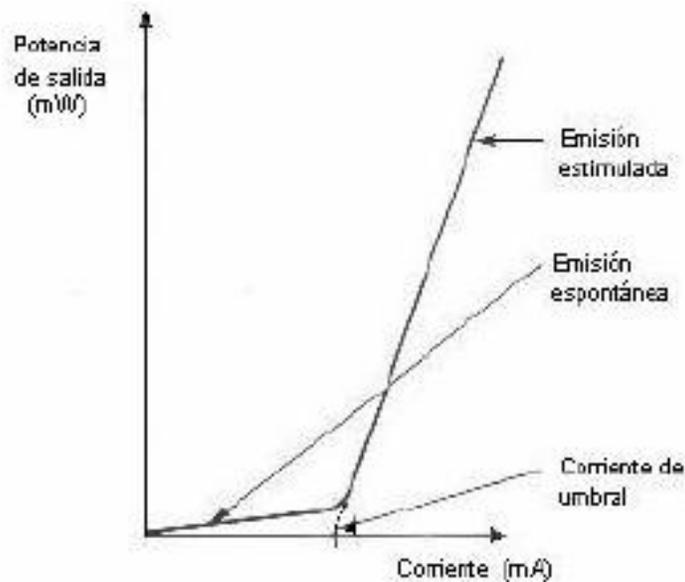


Figura 3.5: Curva característica de un diodo láser<sup>f</sup>.

La potencia de salida para un diodo láser que opera de forma continua varía típicamente de 1mW. a 10 mW. La corriente de operación es generalmente de 20 a 40mA por encima de la

<sup>f</sup> Figura tomada de <http://www.eie.ucr.ac.cr>

corriente de umbral. Los diodos láser son más sensitivos a los cambios de temperatura que los LED's conforme aumenta la temperatura, la ganancia del diodo decrece, hasta que más corriente es requerida para que la oscilación pueda continuar, provocando un incremento de la corriente de umbral. La longitud de onda de un diodo láser también depende de la temperatura. Esta se incrementa debido a la dependencia del índice de refracción del material con la temperatura. Típicamente, estos cambios son del orden de  $0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ .

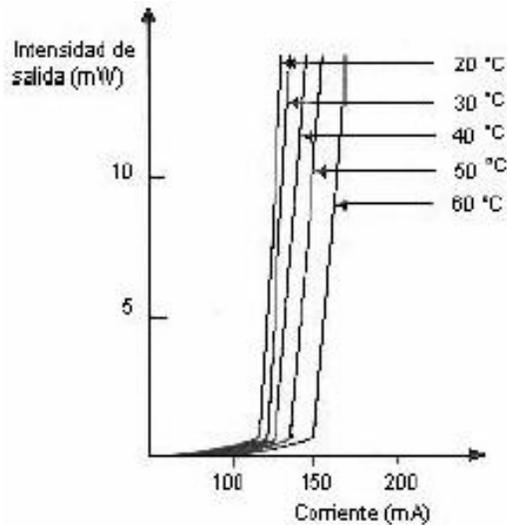


Figura 3.6: Efectos de la temperatura en un diodo Láser<sup>g</sup>.

Al igual que los diodos emisores de luz los diodos láser pueden ser modulados digitalmente o analógicamente. Los diodos láser son más rápidos que los diodos emisores de luz, debido a que el tiempo de levantamiento del LED es determinado por la emisión espontánea natural del material, y el tiempo de levantamiento de un diodo láser depende del tiempo de vida de emisión estimulada. Para que se genere una ganancia, el tiempo de vida estimulado debe ser menor que el tiempo de vida espontáneo.<sup>[18]</sup>

### 3.1.3 Circuitos de excitación

Los circuitos de excitación para las fuentes de luz antes mencionadas tienen como función, convertir el voltaje de la señal a transmitir en una corriente modulada con un valor pico

<sup>g</sup> Figura tomada de <http://www.eie.ucr.ac.cr>

adecuado a las características normales de operación de la fuente óptica que se use. Hay muchos circuitos que pueden utilizarse como excitadores de fuentes ópticas y cada uno muestra ciertas características particulares, por lo que la selección de éstos depende del tipo de sistema (analógico o digital), y del tipo de fuente de luz (LED o LD).

En los sistemas de transmisión analógicos por fibras ópticas de distancias cortas sin repetidores, los LED son las fuentes preferidas, debido a que presentan mayor linealidad que los LD y su distorsión armónica es aceptable.

Para sistemas analógicos por fibras ópticas de banda ancha y distancias grandes de transmisión, las fuentes de luz utilizadas son los LD, debido a que proporcionan mayor rapidez y más potencia. Su punto de polarización se fija aproximadamente a la mitad de su región lineal, para que la modulación se realice alrededor de dicho punto. La polarización varía de un dispositivo a otro. Además está en función de la temperatura y del envejecimiento, por lo que se requiere de un sistema de control para mantener el punto de operación fijo, ya que un corrimiento de este punto puede sacar al LD fuera de operación o dañarlo, también se requiere de un circuito de protección contra transitorios. El circuito de excitación del LD para señales analógicas debe de ser bastante confiable, por lo que la realización de éste es sofisticada.

En los sistemas de transmisión digital por fibras ópticas, el circuito de excitación transforma los niveles lógicos disponibles en su entrada a niveles de corriente adecuados para excitar a la fuente óptica.

Dada la impedancia dinámica que presentan el LED y el LD una sola etapa de amplificación de corriente puede usarse para modular la fuente óptica, con pulsos de corriente de ancho de 2ns. a 10ns. de acuerdo con las características del LED o LD. Esto puede lograrse utilizando un solo transistor de microondas y compensaciones simples, con el fin de tener tiempos de subida y de bajada pequeños en los pulsos ópticos de salida. El LD requiere un nivel de polarización aproximadamente igual o mayor a la corriente de umbral, sin sobrepasarse demasiado y a partir de este nivel realizar la modulación. También se requiere de un circuito de control automático de nivel para asegurar una potencia de salida y profundidad de modulación

constante con respecto a las variaciones de temperatura y degradaciones del LD. Es importante mantener el nivel de polarización y la corriente de modulación dentro de los niveles de operación para obtener un funcionamiento óptimo, así como también tener circuitos de protección contra transitorios.

### **3.1.3.1 Circuito de excitación para diodos láser**

El circuito de excitación que se requiere, debe tener la capacidad de reaccionar a excitaciones de alta velocidad. Existen varias formas de excitar directamente al láser, los más comunes emplean MESFET o GaAsFET, HFET, diodos Gun, diodos Trapatt o transistores bipolares de silicio y de Heterounión. El uso de los transistores bipolares es el más extendido y el más adecuado a velocidades menores o iguales de 140Mbit/s, si se requiriese transmitir información a más altas velocidades, es necesario considerar otras alternativas. Usando MESFETS, HFET o HBJT se ha logrado modular a velocidades del orden de varios Gbit/s.

Los diodos láser tienen una baja impedancia cuando se polariza arriba de la corriente de umbral, la cual está determinada principalmente por la resistencia de volumen y la inductancia de las terminales. El excitador del láser debe ser, por lo tanto, una fuente de corriente de alta impedancia. Tomando en cuenta además que las señales digitales de entrada tienen que ser ECL (“1” = -0.8V, “0” = -1.8V), para velocidades > 30 Mbit/s el excitador que resulta adecuado para el desarrollo de transmisores de la tercera y cuarta jerarquía telefónica es el de arreglo diferencial o emisor acoplado.

### **3.1.3.2 Elección del circuito de control para el diodo láser**

Se han desarrollado muchas formas de hacer el circuito de control automático para regular la salida óptica de un diodo láser. Entre las más conocidas están las siguientes:

1. Circuito de control de la potencia pico mínima.
2. Circuito con retroalimentación del retardo de encendido.
3. Circuito de control de la posición del pedestal o codo de umbral.
4. Circuito de control de pendiente o de cambios de pendiente.

5. Circuito con retroalimentación de la potencia óptica media.
6. Circuitos con control de temperatura usando elementos termoeléctricos tipo Peltier.
7. Estabilización del espectro (control de longitud de onda).

La lista está ordenada en forma cronológica de aparición de estas diferentes alternativas del circuito de control. Los circuitos (1, 2, 3, 4, 5) están controlados mediante retroalimentación de la potencia óptica media. Los circuitos (6) además se les incorporan elementos termoeléctricos y el circuito (7) controla además la longitud de emisión del espectro de luz para su uso en sistemas monomodo y multiplexación por división de longitud de onda.

Para transmisores digitales de velocidad media y para aplicación, donde no se contempla emplear multiplexores por longitud de onda, la configuración que conviene utilizar es la de control de la potencia óptica media. Para este control se incrementa la corriente de polarización con el objeto de compensar incrementos en la corriente de umbral provocados por aumentos de temperatura y la corriente de modulación, la cual se usará para compensar cambios en la pendiente de eficiencia por envejecimiento.<sup>[17]</sup>

### **3.2 Detectores fotónicos**

Un detector es el final de un sistema de comunicaciones ópticas, donde la luz inyectada desde un láser de semiconductor a una fibra óptica se convierte otra vez en una corriente eléctrica. Dicha corriente, a su vez, será amplificada, filtrada, y llevada al sistema de decisión. Los detectores usados en sistemas de comunicaciones ópticas están basados también en materiales semiconductores donde la absorción de fotones va a dar lugar a un aumento de la conductividad del medio a través del efecto fotoeléctrico: absorción de fotones y generación de pares electrón-hueco. En particular estos detectores están basados en uniones p-n especiales que presentan ventajas tales como: pequeña área de detección, alta responsividad, bajo ruido y ancho de banda elevado.<sup>[19]</sup>

### 3.2.1 Tipos de detectores

Existen dos tipos fundamentales de detectores de luz, los térmicos y los fotónicos que operan con mecanismos de transducción diferentes. Los detectores térmicos absorben (detectan) la energía de los fotones incidentes en forma de calor con lo que se produce un incremento en la temperatura del elemento sensor que implica también un cambio en sus propiedades eléctricas como por ejemplo la resistencia. El cambio en esta propiedad eléctrica en función del flujo radiante recibido es lo que permite su medida a través de un circuito exterior. La mayoría de esta clase de fotodetectores es bastante ineficiente y relativamente lento como resultado del tiempo requerido para cambiar su temperatura, lo que les hace inadecuados para la mayor parte de las aplicaciones fotónicas.

Los detectores fotónicos no utilizan la energía del fotón en forma de calor, sino que la invierten al incrementar la energía de sus portadores de carga, con lo que se modifican las propiedades de conducción eléctrica de los sistemas detectores en función del flujo de fotones recibido. Este proceso de conversión implica la transformación de los fotones incidentes en electrones, pero esta respuesta simple no tendría ninguna relevancia si esos electrones no se ponen en movimiento para generar una corriente, que es la magnitud que realmente podemos medir, para ello en ocasiones hay que aplicar un campo eléctrico, dando lugar a un esquema como el de la figura 3.7. Dado su origen, la corriente así generada recibe el nombre de fotocorriente. Es a esta clase de detectores a la que nos vamos a dedicar en este tema.

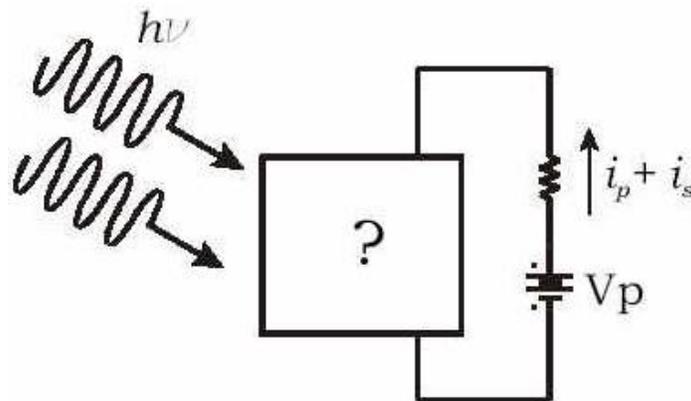


Figura. 3.7: Esquema básico de un dispositivo fotodetector<sup>h</sup>.

<sup>h</sup> Figura tomada de <http://www.info-ab.uclm.es>

### 3.2.2 Propiedades de los detectores fotónicos

Son los más utilizados en los sistemas de comunicaciones, y como ya se ha dicho, están basados en la capacidad de ionización de un material semiconductor, de forma que los diferentes dispositivos que veremos no son más que variaciones de este mismo principio. Para caracterizar el comportamiento de estos detectores, existen unos parámetros fundamentales a tener en cuenta en el proceso de selección para cada aplicación particular. Estos parámetros son:

- ✓ Eficiencia cuántica
- ✓ Responsividad
- ✓ Tiempo de respuesta
- ✓ Características de ruido

En general, los fabricantes de dispositivos proporcionan datos relacionados con estas características fundamentales, aunque en ocasiones no se den éstos de manera explícita. Aparte de la información de los dispositivos como detectores de radiación, también hay que tener en cuenta sus propiedades eléctricas en virtud de las características de componente electrónico que presentan.

#### 3.2.2.1 Eficiencia cuántica

Se define como la probabilidad de que un fotón incidente sobre el dispositivo genere un par de portadores que contribuyen a la corriente del detector. No todos los fotones incidentes generan portadores que contribuyan a la *fotocorriente*, los efectos de reflexión en la superficie, transparencia del material a los fotones de energía inferior a la del *gap* de energía prohibida del mismo, la probabilidad de absorción cerca de la superficie del dispositivo y la rápida recombinación de portadores en este caso por la abundancia de defectos, hace que la eficiencia

cuántica se reduzca. El problema de la recombinación superficial puede minimizarse si se realiza un crecimiento cuidadoso de los cristales que forman los dispositivos.

### 3.2.2.2 Responsividad

Hace referencia a la corriente que circula por el dispositivo en función de la potencia óptica incidente. La responsividad crece con  $\lambda$  hasta que se alcance el valor de la longitud de onda de corte. Al presentar una dependencia con  $\lambda$ , los fabricantes pueden proporcionar bien una figura con el rango total de longitudes de onda para las que es útil el dispositivo o el dato para la  $\lambda$  en la que responsividad es máxima. La responsividad del detector puede degradarse cuando la potencia óptica incidente es muy elevada. Se produce entonces la saturación del detector, es decir, se pierde la relación lineal entre la potencia óptica recibida y la corriente generada. En general, la responsividad dependerá también de factores como la temperatura y el ángulo de incidencia de la radiación sobre el detector.

La responsividad también es llamada fotosensibilidad, sensibilidad, sensibilidad espectral, etc.

### 3.2.2.3 Tiempo de respuesta

Va a ser un parámetro decisivo cuando la radiación incidente varía en el tiempo, en general los fotodiodos y sus variantes van a ser más rápidos que los fotoconductores. La rapidez en la respuesta a las variaciones del flujo de fotones recibido dependerá del propio material, de las características constructivas del componente y del circuito electrónico al que se encuentre acoplado. Aún con ciertas precauciones en el siguiente dato, los valores típicos en la respuesta de los detectores fotónicos suelen ser inferiores al micro segundo.

Este dato puede aparecer en las hojas de especificaciones bajo diferentes formas, como tiempo de subida y bajada, como frecuencia de operación, etc.

### 3.2.2.4 Características de ruido

El dispositivo también genera una corriente aleatoria que fluctúa en torno a su valor medio, y estas fluctuaciones pueden llegar a ser críticas cuando en nuestra aplicación tengamos bajos niveles de luz. Entre las posibles fuentes de ruido, podremos encontrar la llegada de fotones no deseados al detector, la generación espontánea de pares  $eh$  (corriente de oscuridad), ruido de ganancia y el ruido asociado a los circuitos electrónicos del receptor. Al ruido dedicaremos un apartado especial al final de este capítulo.

### 3.2.3 Tipos de fotodetectores

Existen, en general, dos tipos de fotodetectores:

- ✓ **Fotoconductivos:** Generan flujo de corriente en presencia de luz
  
- ✓ **Fotovoltaicos:** Generan un voltaje en presencia de luz.

En recepción óptica se usan principalmente del tipo fotoconductivos y constituye el caso más simple de la aplicación de materiales semiconductores a la detección de radiación óptica, pues consiste simplemente en la absorción de luz por parte de un trozo de semiconductor con contactos eléctricos, tal y como aparece en la figura 3.8a. Cuando un fotón alcanza al semiconductor y es absorbido, se produce la generación de un par electrón – hueco. La influencia del campo eléctrico que hay entre los contactos provoca la migración de electrones y huecos hacia ellos, con lo que se produce un cambio en la resistencia del material en función de la cantidad de luz que reciben, es decir, su conductividad aumenta proporcionalmente al flujo de electrones recibido, con lo que se obtiene una fotocorriente cuantificable. Con este tipo de fotodetectores se puede registrar esa fotocorriente o bien medir la caída de tensión en una resistencia de carga colocada en serie con el dispositivo.

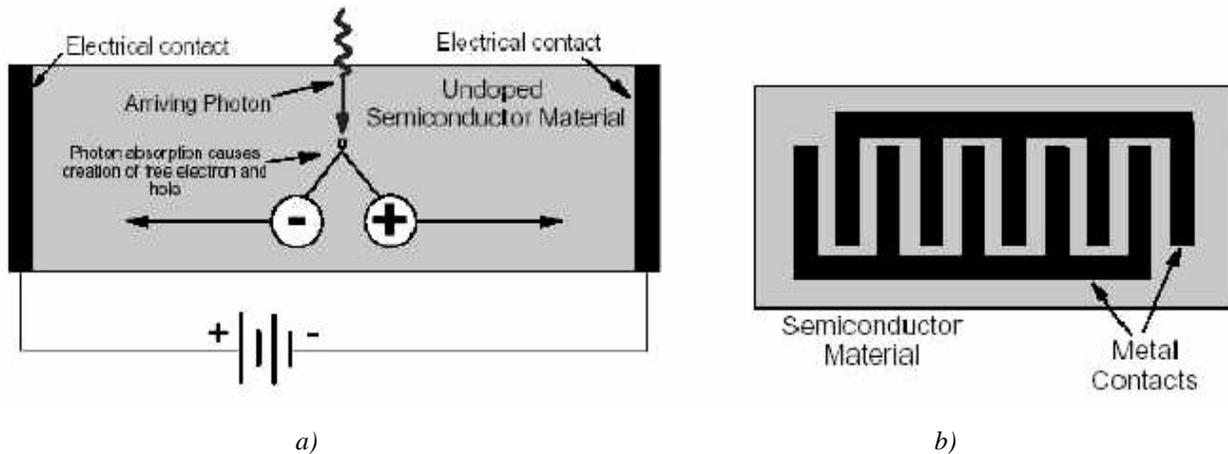


Figura 3.8: a) Esquema básico del funcionamiento de un fotoconductor. b) Configuración más habitual para fotoconductores comerciales<sup>1</sup>.

Una configuración usual de esta clase de detectores es la que se muestra en la figura 3.8b, donde el ánodo y el cátodo se encuentran sobre la misma superficie del material de forma que el tiempo de transición entre uno y otro se minimiza al tiempo que se maximiza la transmisión de luz. Aquí se encuentra una característica útil para los detectores en general, y es que cuanto menor sea su tamaño, su comportamiento en conmutación será mejor, aunque esta reducción en las dimensiones hace que recolecte menos luz.

De la misma forma que en el caso de los fotoconductores, el fenómeno que interviene es la absorción de radiación por parte de un material semiconductor, generando pares de portadores de carga que contribuyen a la foto corriente. Existen diferentes configuraciones para los fotodiodos, cada una de ellas con características específicas. A continuación, se describirán aquellos foto detectores comúnmente utilizados en receptores ópticos: P-N, P-I-N, APD, y MSN, que además presentan propiedades que también encontraremos en foto detectores más complejos.

### 3.2.3.1 Fotodiodo P-N

A grandes rasgos, podemos definir un fotodiodo *p-n* como una unión *p-n* en la que la corriente inversa aumenta con el flujo de fotones incidente.

<sup>1</sup> Figura tomada de <http://www.info-ab.uclm.es>

En principio, los fotones pueden ser absorbidos en toda la estructura como en el caso de los fotoconductores, pero aquí aparece el efecto de la unión, de forma que existe un campo eléctrico intenso en la zona de la unión con la dirección n-p (Figura 3.9) que es capaz de separar los pares de portadores generados rápidamente, disminuyendo así la probabilidad de que se produzcan recombinaciones que impidan la contribución a la foto corriente. Es en esta zona donde será deseable que se produzca la absorción. A temperatura ambiente existe una cierta probabilidad de que se produzcan transiciones espontáneas entre bandas aún en ausencia de iluminación, con lo que se puede generar una pequeña corriente que recibe el nombre de corriente de oscuridad. Esta corriente de oscuridad dependerá de la temperatura y de las condiciones eléctricas de operación del fotodiodo.

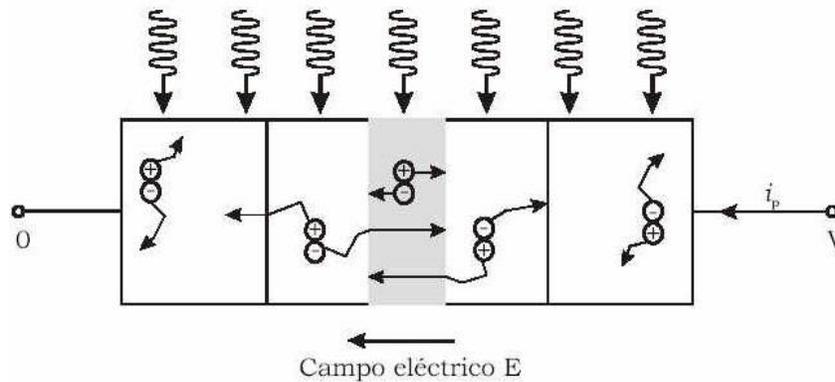


Figura 3.9: Esquema básico del funcionamiento de un fotodiodo p-n<sup>1</sup>.

El tiempo de respuesta está limitado, como es lógico, por el tiempo de tránsito de los portadores a través de la zona de la unión, así como por la constante de tiempo del circuito asociado. Hay además otra contribución a la fotocorriente por parte de los portadores generados fuera de la zona de la unión, pero con cierta proximidad a ella. Estos portadores tienen la posibilidad de alcanzar la zona de transición por medio de la difusión térmica dentro de los materiales neutros, con lo que el campo eléctrico puede hacer que atraviesen rápidamente la zona de transición comunicándoles una cierta aceleración. En este caso, esos portadores generados fuera de la zona de la unión pueden contribuir a la corriente. Sin embargo, los procesos asociados con la difusión de portadores dentro de la estructura son muy lentos, lo que hace que los dispositivos basados en fotodiodos p-n no puedan ser utilizados en sistemas que requieran de una

<sup>1</sup> Figura tomada de <http://www.info-ab.uclm.es>

alta velocidad de conmutación, aunque en general presentarán un menor tiempo de respuesta que los fotoconductores.

Como se ha visto, la zona en que interesa que se produzca la incidencia del flujo de fotones de forma que se consiga la mayor eficiencia cuántica, es la zona de la unión o zona de transición. Pero esa zona es físicamente muy delgada. Para mejorar las prestaciones del fotodiodo  $p-n$ , la idea más sencilla sería aumentar el tamaño de esa zona de transición, y eso es lo que se pretende con la siguiente configuración.

Existen tres formatos clásicos de operación con un fotodiodo: circuito abierto (modo fotovoltaico), cortocircuito y polarizado inversamente (modo fotoconductor).

El comportamiento de los fotodiodos en régimen de conmutación, está directamente relacionado con el tiempo de respuesta del componente. En general, ese tiempo de respuesta va a depender de la constante RC del circuito

En general, los fotodiodos operan con una fuerte polarización inversa con el objetivo de crear un campo eléctrico intenso en la zona de la unión, de forma que aumente la velocidad de los portadores en ella reduciendo así el tiempo del transitorio, además, se incrementa la anchura de la zona de transición, con lo que facilitamos la absorción de fotones en la zona de interés a la vez que reducimos la capacitancia de la unión, lo que también contribuye al incremento en la velocidad de respuesta.<sup>[20]</sup>

### 3.2.3.2 Fotodiodo P-I-N

La unión  $p-n$  presenta un problema grave para utilizarla como fotodetector en comunicaciones ópticas, debido al tiempo de difusión de los portadores generados fuera de la zona de unión, con tiempos del orden del nano segundos. Una manera de disminuir la contribución de la difusión de portadores es hacer la zona de unión muy grande.<sup>[19]</sup>

En este caso, la zona de la unión se ensancha mediante la adición de un material intrínseco o ligeramente dopado entre las zonas  $p$  y  $n$ . Con ello conseguimos una zona de transición extensa que favorece la absorción de fotones y su conversión a corriente útil. En principio, este dispositivo, que aparece de forma esquemática en la figura 3.10, puede funcionar bajo las mismas condiciones que el fotodiodo  $p-n$ , y presentan una serie de ventajas sobre éstos:

- Aumenta la probabilidad de absorción de fotones dado el significativo aumento del volumen de material absorbente.
- El ensanchamiento de la zona de transición disminuye la capacitancia de la misma, con lo que la respuesta del dispositivo será más rápida por la reducción de la constante de tiempo RC.
- Pueden conseguirse tiempos de respuesta del orden de decenas de ps, correspondiente a anchos de banda de .50 GHz.

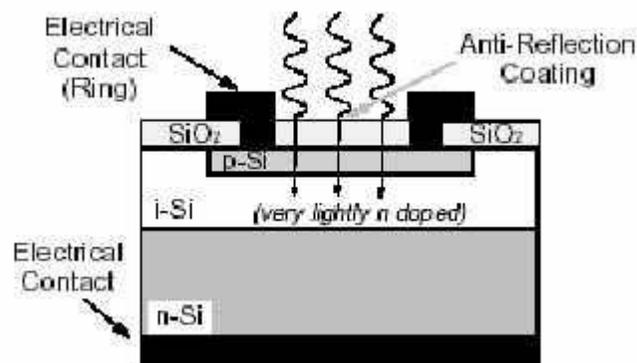


Figura 3.10: Esquema de un fotodiodo  $pin^k$ .

Existen una serie de consideraciones a tener en cuenta cuando trabajemos con este tipo de fotodiodos según la configuración indicada en el apartado anterior. Cuando el P-I-N opera en modo fotoconductor tiene problemas para niveles de iluminación bajos, pues la corriente térmica generada es una fuente bastante importante de ruido. Para niveles de luz suficientes, esto no representa ningún inconveniente y la respuesta es más rápida que si opera en modo fotovoltaico. En este modo, con una menor corriente de oscuridad ofrece una buena sensibilidad a bajos

<sup>k</sup> Figura tomada de <http://www.info-ab.uclm.es>

niveles de luz. El inconveniente en este caso es la baja foto corriente generada, lo que hace que requiera una inmediata amplificación.

Las diferencias con el caso anterior en cuanto a sus características ópticas y eléctricas son mínimas, la forma más habitual de emplearlos es en el modo fotoconductor, lo que hace que los parámetros suministrados se refieran a éste principalmente.

### 3.2.3.3 Fotodiodos de avalancha (APD)

Esta clase de fotodiodos genera una cascada de portadores en movimiento a partir de la incidencia de un fotón, con lo que amplifican la señal durante el proceso de foto detección.

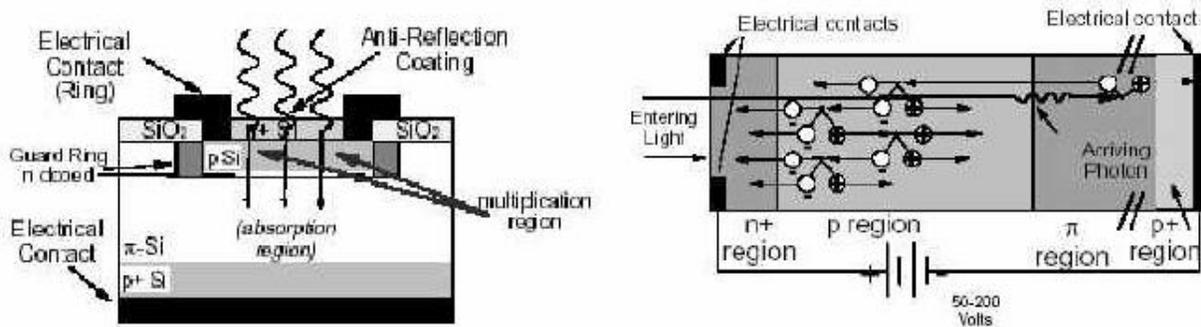


Figura 3.11: a) Esquema de un fotodiodo de avalancha. b) esquema del funcionamiento de un APD<sup>1</sup>.

En su forma básica, un APD es un diodo P-I-N con una fuerte polarización inversa (puede llegar a ser del orden de miles de Voltios frente a los .3V de un fotodiodo convencional). La principal diferencia estructural es que la zona intrínseca se dopa ligeramente de tipo p y se la renombra como capa  $\pi$ . Típicamente es más ancha que una zona  $i$  y se diseña de forma que el campo eléctrico a través de ella sea lo más uniforme posible, como se ve en la figura 3.12.

<sup>1</sup> Figura tomada de <http://www.info-ab.uclm.es>

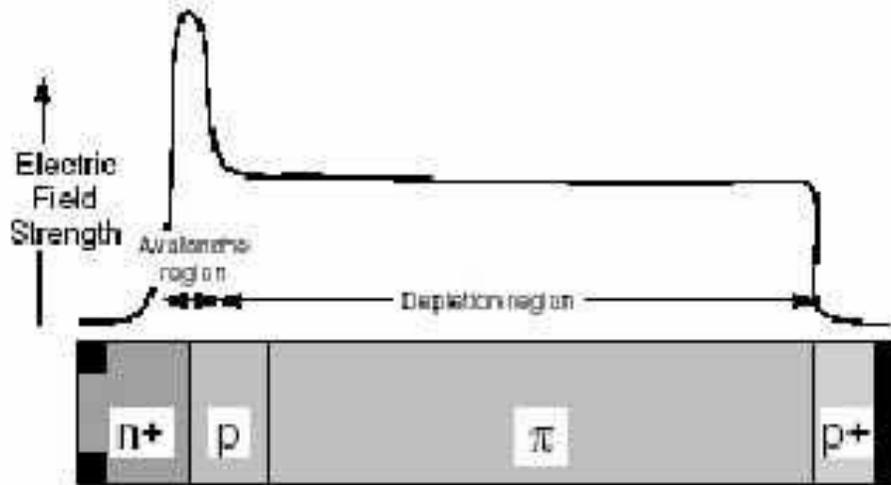


Figura 3.12: Distribución del campo eléctrico en un APD<sup>m</sup>.

Los fotones atraviesan la unión n+ p (que se fabrica muy delgada) y son absorbidos en la capa  $\pi$ , donde se generan los pares electrón – hueco. El potencial eléctrico en esta capa es suficiente para arrastrar a los portadores hacia los contactos eléctricos. En las proximidades de la unión n+ p el campo eléctrico es tan intenso (figura 3.12) que los electrones son fuertemente acelerados con lo que aumenta su energía. Cuando estos electrones rápidos colisionan con los átomos de la red cristalina, se generan nuevos pares electrón – hueco, proceso conocido como ionización por colisión. Estos pares de portadores así generados también son acelerados con lo que tanto los electrones como los huecos pueden contribuir al proceso de multiplicación.

El problema que se encuentra es ¿cuándo se detiene el proceso?, para controlar el proceso de avalancha, lo que se suele hacer es diseñar los dispositivos de forma que sólo uno de los portadores sea capaz de ionizar, de forma que al cabo de cierto tiempo todos esos portadores alcanzan la parte n de la zona de transición (p en el caso de huecos).

Así pues, resumiendo las características de los APD, se puede decir que la alta sensibilidad es uno de los motivos fundamentales para su utilización, pues un solo fotón puede generar una señal detectable por el circuito asociado. La velocidad de respuesta va a estar limitada, como en casos anteriores, por el tiempo del transitorio y los efectos RC. La reducción

<sup>m</sup> Figura tomada de <http://www.info-ab.uclm.es>

de la capacitancia es un factor que contribuye al aumento de la velocidad, pero hay que tener en cuenta el tiempo de generación de la avalancha, que es un valor intrínsecamente aleatorio lo que hace del APD un dispositivo intrínsecamente ruidoso. Máxime teniendo en cuenta que la avalancha afecta a todos los electrones libres, incluidos los generados térmicamente. También las altas tensiones de polarización pueden causar episodios de ionización espontánea, lo que incrementa aún más el ruido.

Este tipo de fotodiodo estará especialmente indicado en aquellas aplicaciones en las que la sensibilidad sea lo más importante, como por ejemplo en aquellas en que se requiera un área extensa de detección o efectuar ésta a larga distancia. Sin embargo, si lo que se pretende es aunar la velocidad con la sensibilidad, es más útil utilizar fotodiodos P-I-N con preamplificación.

### 3.2.4 Ruido en fotodetectores

En sistemas de comunicaciones ópticas el fotodiodo se espera que funcione con baja potencia de luz incidente. Por eso es muy importante tener información acerca del ruido que va a estar presente en el receptor (el sistema receptor consiste en el fotodiodo más la electrónica asociada). Por lo tanto, el sistema receptor ha de estar optimizado para mantener una relación señal a ruido determinada:

Se puede también definir la sensibilidad del receptor como la mínima potencia óptica para conseguir una determinada relación señal a ruido. Los mecanismos fundamentales de generación de ruido en fotodetectores son el ruido cuántico o de disparo (shot noise) y el ruido térmico. También existen otros tipos de ruido menos importantes como la corriente de oscuridad (ruido generado por el fotodetector en ausencia de luz) o la corriente de fugas superficial.<sup>[20]</sup>

- El **ruido cuántico** aparece porque la fotogeneración de portadores es en sí un proceso aleatorio.

- El **ruido térmico** (también ruido de *Johnson*) aparece porque en cualquier elemento de un circuito los electrones sufren movimientos aleatorios, que inducen una corriente aleatoria incluso en la ausencia de luz. El elemento que más influye en la generación de esta corriente aleatoria que se superpondrá a la que genera el diodo será la resistencia de carga.

### 3.2.5 Receptores ópticos

El receptor de un sistema de comunicaciones ópticas se diseña de acuerdo al tipo de señal que le va a llegar: si es digital, analógica o si es detección directa o coherente. En la gran mayoría de los casos los receptores se diseñan para sistemas digitales de detección directa, cuyo esquema más general consta de tres partes, tal y como se muestra en la figura 3.13. Se hará enfoque en la primera etapa.

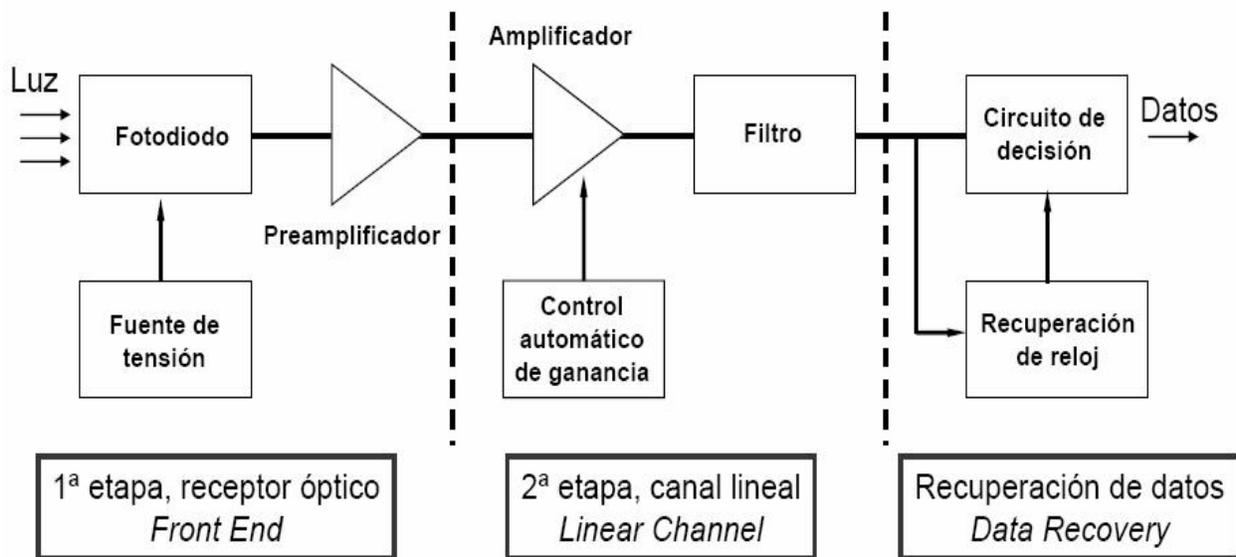


Figura 3.13: Esquema general de un receptor<sup>n</sup>.

#### 3.2.5.1 Primera etapa (Front End)

La primera etapa, también denominada receptor óptico, consta de un fotodiodo y un preamplificador, que amplifica la señal generada por el fotodiodo para su posterior tratamiento. La primera etapa necesita un diseño adecuado porque el ruido que introduzca el preamplificador

<sup>n</sup> Figura tomada de <http://www.info-ab.uclm.es>

representa la mayor contribución de todos los amplificadores que haya en cascada, y porque se necesita una gran amplificación sin que se limite el ancho de banda, lo cual es complicado.

Los dos circuitos fundamentales usados en comunicaciones ópticas son:

*Amplificador de alta impedancia:* La  $R_L$  ha de ser grande para minimizar el efecto del ruido térmico. El problema está en que el ancho de banda de este esquema viene limitado por la constante de tiempos del circuito RC ( $C_T$  da cuenta de la capacidad parásita del diodo y de la del amplificador), por lo que sólo se usa en esquemas en que el ancho de banda no es muy importante

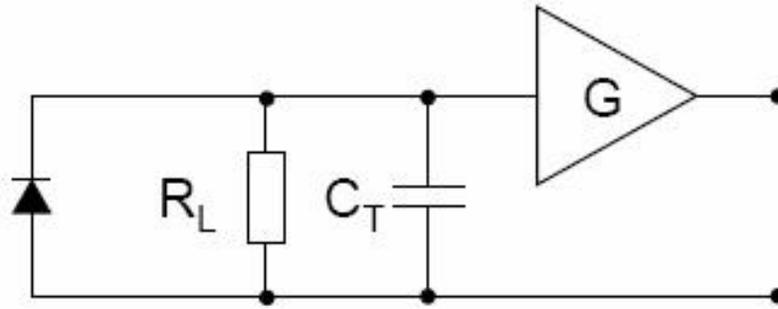


Figura 3.14: Amplificador de alta impedancia<sup>o</sup>

*Amplificador de transimpedancia:* Este esquema presenta un ancho de banda mejorado frente al anterior ya que la ganancia viene dada por  $R_L$  pero la constante de tiempo viene reducida en un factor  $G$ . Generalmente los receptores ópticos presentan este esquema más que el otro. Evidentemente habrá que trabajar el problema de la realimentación del circuito.

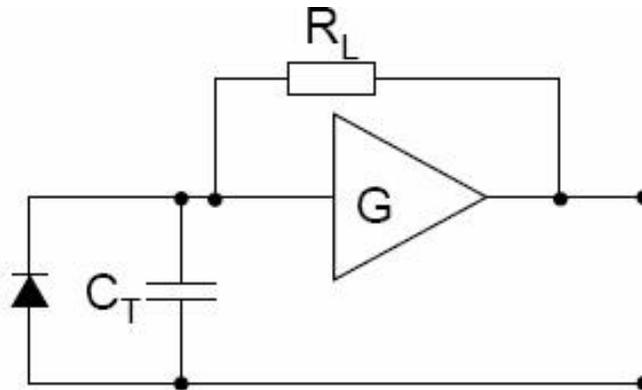


Figura 3.15: Amplificador de transimpedancia<sup>o</sup>.

<sup>o</sup> Figura tomada de <http://www.info-ab.uclm.es>

Los amplificadores que se va a necesitar colocar en la primera etapa, en cualquier caso, han de ser amplificadores de alta impedancia de entrada y bajo ruido. Existen varias posibilidades, basadas en diversos tipos de transistores:

- ✓ Amplificadores FET de alta impedancia: GaAs-> MESFETs y Si-> MOSFETs o JFETs
- ✓ Amplificadores de transistor bipolar de alta impedancia (BJT): de Si.
- ✓ Amplificadores de transistor FET con tecnología híbrida, HEMT (*High Electron Mobility Transistor*) o MODFET: son de GaAs
- ✓ Amplificadores de transistor bipolar de tecnología híbrida (HBT): normalmente de InP.

Los amplificadores basados en tecnología de silicio no se usan prácticamente hoy en día por su bajo ancho de banda y a principio de los 80 fueron sustituidos para aplicaciones de comunicaciones ópticas por los MESFET de tecnología de GaAs que presentan mejores anchos de banda. Según se fueron necesitando anchos de banda más importantes se fueron desarrollando los otros tipos de transistores, que son los que se utilizan hoy en día para aplicaciones de alta velocidad: HEMTs, MODFETs (ambos son FETs con propiedades especiales) y HBTs.

### **3.2.5.2 Segunda etapa, canal lineal**

Después de que la señal ha sido detectada y preamplificada se pasa al canal lineal, donde existe un amplificador con control automático de ganancia y un filtro paso bajo. El control automático de ganancia está para que el sistema de decisión reciba un mismo valor de potencia medio independientemente del valor de potencia incidente en el detector. El filtro paso bajo está para reducir el ruido al máximo (el ruido depende del ancho de banda), por lo que modificará la forma del pulso y creará algo de ISI (*intersymbol interference*) (el valor de  $\Delta f$  que va a dejar pasar el filtro es incluso menor que la tasa de transmisión, siendo el límite último que limita el ancho de banda del sistema).

### 3.2.5.3 Tercera etapa, recuperación de datos

El sistema de decisión recupera el reloj de la comunicación tratando de aislar la componente de frecuencia  $f$  de la señal recibida, lo que aporta información sobre el tiempo de bit o *bit slot*. Esta recuperación de reloj no es sencilla de realizar, sobre todo en modulación NRZ. No obstante se suelen modificar los datos antes de transmitirse para que haya suficientes transiciones y el reloj se pueda recuperar de forma satisfactoria.

El circuito de decisión compara la salida del canal lineal con un valor umbral y decide si hay un bit '1' ó '0' en un intervalo. Es importante, dentro de este valor de tiempo de bit saber en qué tiempo es mejor realizar la comparación. Una manera de saberlo es a través del diagrama de ojo, formado al superponer secuencias de 2-3 bits en las cuales queda una región de máxima separación entre señales. Ese momento es el mejor para realizar la comparación. El diagrama de ojo también da una idea gráfica y rápida de si la comunicación se está comportando adecuadamente.

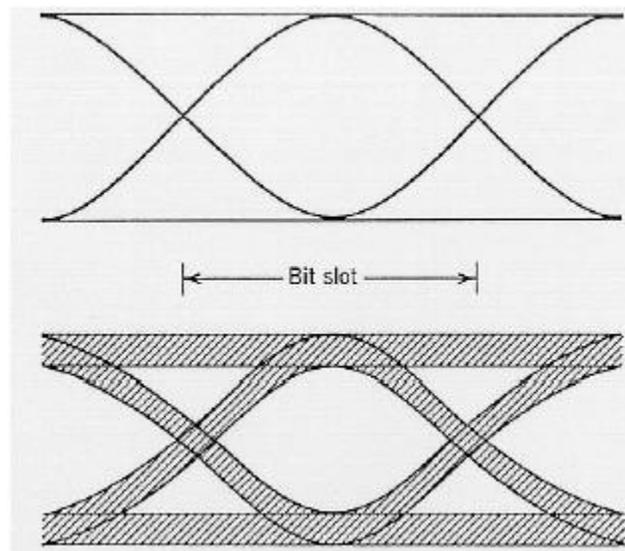


Figura 3.16: Diagrama de ojo<sup>p</sup>.

<sup>p</sup> Figura tomada de <http://www.info-ab.uclm.es>

### 3.2.6 Tendencias

#### 3.2.6.1 Receptores Integrados

Es evidente que dado el desarrollo de la tecnología de fabricación de semiconductores no debería representar un problema insalvable el realizar la 1ª etapa de amplificación integrada en el mismo chip en que se construye el fotodiodo. Para detectores de silicio esto es directo, porque la tecnología de circuitería en silicio está muy desarrollada, pero no lo es tanto para InP o GaAs. En cualquier caso a estos circuitos receptores se les denomina Circuitos Integrados Optoelectrónicos (OEIC), y de esta manera se minimiza el ruido en la 1ª etapa al tener todos los componentes bajo control.

Uno de los dispositivos sobre los que más se ha trabajado ha sido el PIN-FET que actúa como amplificador de bajo ruido. En detectores de 2ª y 3ª ventana (InGaAsP) el desarrollo de estos detectores no es tan sencillo ya que están contruidos sobre InP y los FET con mejores anchos de banda (MESFET) no se pueden realizar sobre este substrato (sí sobre GaAs).

Lo que se ha desarrollado en los últimos años es la tecnología denominada híbrida o *flip-chip*, esto es, realizar el fotodiodo en una tecnología (InP) y los FET en otra (GaAs) y unir los diferentes materiales a nivel de circuito. Con esto se han conseguido realizar receptores ópticos con sensibilidades mayores que las obtenidas al integrar un APD en un circuito. Los últimos avances en estas tecnologías son las híbridas InGaAs para el detector y HBTs para amplificación en tecnología de InP.

#### 3.2.6.2 Sensibilidad del receptor

Como se comentó anteriormente la sensibilidad de un detector (receptor en este caso) viene dada por la mínima cantidad de potencia necesaria para conseguir una determinada relación señal a ruido. Ahora se está centrando en sistemas digitales modulados en intensidad, por lo que podemos definir la sensibilidad del receptor como la mínima potencia necesaria para conseguir un determinado BER.

Las siglas BER significan tasa de error de bit (Bit Error Rate), de forma que un BER de  $10^{-6}$  significa que hay un error cada  $10^6$  bits enviados. Los sistemas de comunicaciones actuales trabajan con BERs de  $10^{-9}$  e incluso más pequeños. Si no se dice otra cosa se entenderá que el BER necesario es de  $10^{-9}$ .<sup>[20]</sup>

### **3.3 Amplificadores ópticos**

Con la demanda de distancias de transmisión mas largas, los amplificadores ópticos se han convertido en un componente esencial en los sistemas de fibra óptica de larga distancia. Los amplificadores ópticos de semiconductor (SOAs), amplificadores de fibra dopada con Erblio (EDFAs), y los amplificadores ópticos Raman disminuyen los efectos de la dispersión y atenuación permitiendo un desempeño mejorado en los sistemas ópticos de larga distancia.

#### **3.3.1 Amplificadores ópticos de semiconductor (SOA)**

Esencialmente son diodos láser, sin espejos finales, los cuales tienen fibra sujeta en ambos extremos. Estos amplifican cualquier señal óptica que llega a cualquiera de las fibras y transmite una versión de la señal amplificada a la segunda fibra. Los SOA's son típicamente construidos en un pequeño empaque, y trabajan en sistemas de 1310nm. y 1550nm. Además transmiten bidireccionalmente haciendo del tamaño reducido del dispositivo una ventaja sobre los regeneradores de EDFA's. De cualquier forma, las desventajas de los SOAs, incluyen alta pérdida de acoplamiento, dependencia de polarización, y una alta figura de ruido. La figura 3.17 ilustra el esquema de un SOA.

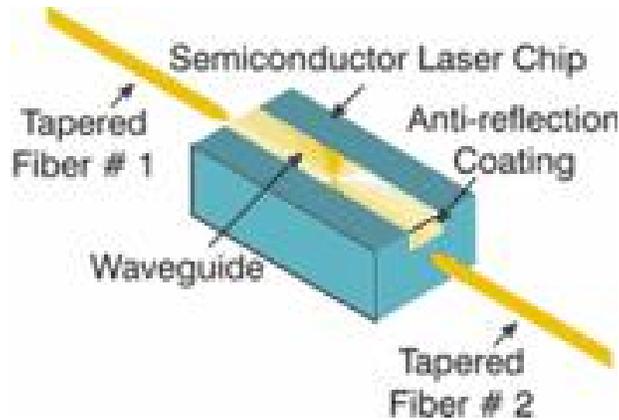


Figura 3.17: Esquema de un SOA<sup>q</sup>.

Las redes ópticas modernas utilizan los SOA's de la siguiente manera:

- Power Booster: Muchos diseños de láser sintonizable arrojan baja potencia óptica y deben ser inmediatamente seguidos por un amplificador óptico. (Un power booster puede usar un SOA o EDFA).
- In – Line Amplifier: Permite a las señales ser amplificadas dentro del trayecto de la misma
- Conversor de longitud de onda: Se refiere al cambio de la longitud de onda de la señal óptica.
- Preamplificador del Receptor: Los SOAs pueden colocarse antes de los detectores para mejorar la sensibilidad.

### 3.3.2 Amplificadores de fibra dopada (DFA's)

Son amplificadores ópticos los cuales usan una fibra óptica dopada como medio de ganancia para amplificar una señal óptica. La señal a ser amplificada y una longitud de onda de bombeo son multiplexadas dentro de la fibra dopada y a través de la interacción con los iones dopantes la señal es amplificada.

<sup>q</sup> Figura tomada de <http://www.fiber-optics.info>

La amplificación es lograda por la emisión estimulada de fotones de los iones dopantes en la fibra dopada. La longitud de onda de bombeo excita a los electrones a un nivel de energía mucho mayor desde el cual pueden decaer o regresar debido a la emisión estimulada de un fotón a un nivel de energía inferior. Los niveles de energía implicados generalmente forman un sistema de 3 o 4 niveles y por lo tanto incluyen a una transición no irradiante ya sea desde el nivel de energía más alto y/o de regreso al nivel de energía mas bajo.

La ventana de amplificación está definida por el ión dopante usado, la estructura del cristal de la fibra óptica y las longitudes de onda de bombeo usadas.

Aunque las transiciones electrónicas de un solo ión son bien definidas, el ampliamiento del nivel de electrones ocurre cuando los iones son incorporados dentro del cristal de la fibra óptica y de este modo las longitudes de onda que pueden ser amplificadas también son ampliadas. Esta ampliación es homogénea y heterogénea lo cual conduce a un espectro de ganancia que no es uniforme en contra de la longitud de onda. La ampliación del ancho de banda de ganancia de los amplificadores de fibra los hace particularmente de utilidad en los sistemas de comunicación por multiplexación por división de longitud de onda (WDM) ya que un solo amplificador puede ser utilizado para amplificar todas las señales que están siendo portadas en una fibra.

### **3.3.2.1 Ruido en amplificadores de fibra dopada**

La principal fuente de ruido en DFA's es la Emisión Espontánea Amplificada (ASE), la cual tiene un espectro aproximadamente igual al espectro de ganancia del amplificador.

Así como también por la decadencia por la emisión estimulada, los electrones en el nivel de energía más alto pueden decaer también por la emisión espontánea, lo cual ocurre aleatoriamente, dependiendo de la estructura del cristal y el nivel de inversión. Los fotones son emitidos espontáneamente en todas las direcciones, pero una proporción de estos será emitida en una dirección que caen dentro de la apertura numérica de la fibra y son de este modo capturados y guiados por la fibra.

Aquellos fotones capturados pueden interactuar con otros iones dopantes, y son de esta manera amplificados por la emisión estimulada. La emisión espontánea inicial es por consiguiente amplificada en la misma manera como lo son las señales, de ahí el termino Emisión Espontánea Amplificada.

La ASE es emitida por el amplificador en las dos direcciones directa e inversa, pero solo la ASE directa es de una preocupación directa para el desempeño del sistema ya que ese ruido se copropaga con la señal a el receptor donde esta degrada el desempeño del sistema. Los contrarestadotes de ASE propagante pueden, sin embargo, conducir a una degradación del desempeño de los amplificadores ya que la ASE puede agotar el nivel de inversión y por ello reducir la ganancia del amplificador.

### **3.3.2.2 Saturación de ganancia**

La ganancia es lograda en un DFA debido a la inversión de población de los iones dopantes. El nivel de inversión de un DFA es puesto, primordialmente, por la potencia de la longitud de onda de bombeo y la potencia en las longitudes de onda amplificadas. Tal como la potencia de la señal se incrementa, o la potencia de bombeo se reduce, el nivel de inversión se reducirá y por esto la ganancia del amplificador será reducido. Este efecto es conocido como saturación de ganancia “A medida que el nivel de la señal se incrementa, el amplificador se satura y no puede producir potencia de salida alguna y de esta forma la ganancia se reduce”.

La saturación es también comúnmente conocida como compresión de ganancia. Para logran un desempeño óptimo en cuanto a ruido los DFA's son operados bajo una pequeña cantidad de compresión de ganancia, ya que reduce la tasa de emisión espontánea, y por ello se reduce la ASE.

### 3.3.2.3 Efectos inhomogéneos

Debido a la porción inhomogénea del grosor de la línea de ensanchamiento de los iones dopantes, el espectro de ganancia tiene una componente inhomogénea y la saturación de ganancia ocurre, en una pequeña extensión, de manera inhomogénea. Este efecto es conocido como *Spectral Hole Burning* debido al hecho de que una señal de alta potencia a una longitud de onda puede “quemar” un hueco en la ganancia de las longitudes de onda cercanas a esa señal por la saturación de iones ensanchados inhomogéneamente.

Los huecos espectrales varían en su ancho dependiendo de las características de la fibra óptica en cuestión, pero es típicamente menor a 1nm. en la longitud de onda corta de la banda C y de unos cuantos nms. en la longitud de onda larga de la banda C.

### 3.3.2.3 Efectos de la polarización

Aunque el DFA es principalmente un amplificador independiente a la polarización, una pequeña porción de los iones dopantes interactúan preferiblemente con ciertas polarizaciones y una pequeña dependencia (típicamente <0.5dB) a la polarización puede ocurrir. El cambio en la ganancia es principalmente dependiente a la alineación de la polarización del bombeo y las longitudes de onda. Esto es, para aclarar, si las dos longitudes de onda están interactuando con el mismo subconjunto de iones dopantes o no.<sup>[21]</sup>

### 3.3.3 Amplificadores de fibra dopada con Erblio (EDFA)

El amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA) es el amplificador de fibra mas comúnmente usado ya que su ventana de amplificación coincide con la tercera ventana de transmisión de las fibras ópticas basadas en sílice.

Dos bandas se han desarrollado en la tercer ventana de transmisión: la Convencional o Banda C, de aproximadamente 1525nm. – 1565nm. y la *Larga* o banda L, de aproximadamente

1570nm. a 1610nm. Ambas bandas pueden ser amplificadas por los EDFA's pero es normal el usar un amplificador diferente, cada uno optimizado para la respectiva banda, por cada banda.<sup>[22]</sup>

La explosión de las aplicaciones de la multiplexación densa por división de longitud de onda (DWDM) hace a este tipo de amplificadores ópticos un bloque esencial en la construcción de sistemas de fibra óptica. Los EDFA's permiten a la información ser transmitida a grandes distancias sin la necesidad de repetidores convencionales. La fibra es dopada con Erblio, un elemento de las tierras raras, que tiene los niveles de energía apropiados en sus estructuras atómicas para amplificar luz. Los EDFA's son diseñados para amplificar luz a 1550nm. El dispositivo utiliza un láser de bombero de 980nm. o de 1480nm. para inyectar energía dentro de la fibra dopada. Cuando una señal débil a 1310nm. o 1550nm. entra a la fibra, la luz estimula los átomos de tierra rara para que liberen su energía almacenada como una luz adicional a 1550nm. o 1310nm. Este proceso continúa hasta que la señal termine de pasar a través de la fibra, haciéndose cada vez más fuerte a su paso por ésta.

La figura 3.18 muestra completamente un EDFA de doble bombeo que incluye todos los componentes comunes de un módem EDFA.

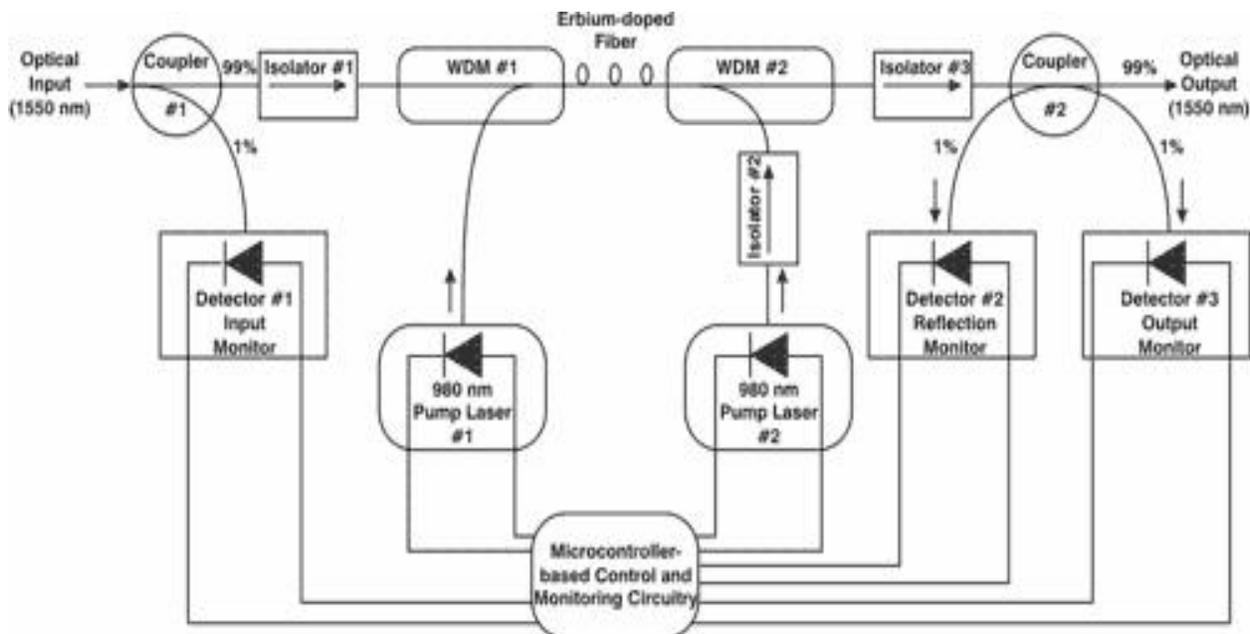


Figura 3.18: Diagrama a bloques de un EDFA<sup>†</sup>.

<sup>†</sup> Figura tomada de <http://www.fiber-optics.info>

El acoplador de entrada, acoplador #1, permite al microcontrolador monitorear la luz de entrada a través del detector #1. El aislador de entrada #1 está por lo regular siempre presente. El WDM #1 está siempre presente, provee un promedio de la inyección de la longitud de bombeo de 980nm. dentro del largo de la fibra dopada con Erblio. El WDM #1 también permite a la señal óptica de entrada ser acoplada dentro de la fibra dopada con Erblio con la mínima pérdida óptica. La fibra dopada con Erblio es usualmente de decenas de metros de largo.

La energía a 980nm. bombea al átomo de Erblio dentro de un estado excitado de decadencia lenta. Cuando la energía en los 1550nm. viaja a través de la fibra causa la emisión estimulada de radiación, como en un láser, permitiendo a la señal de 1550nm. ganar fuerza. La fibra de Erblio tiene relativamente alta pérdida óptica, así que su largo es optimizado para proveer la máxima potencia de salida en la banda deseada de los 1550nm.

El WDM #2 está presente solo en los EDFA's de doble bombeo. Éste acopla energía adicional de 980nm. del láser de bombeo #2 en el otro extremo de la fibra dopada con Erblio, incrementando la ganancia y la potencia de salida. El aislador #3 está por lo regular siempre presente.

El acoplador #2 es usado para monitorear las reflexiones de retorno dentro del EDFA. Esta utilidad puede ser usada para detectar si el conector en la salida óptica ha sido desconectado. Esto incrementa la señal reflejada de retorno y el microcontrolador puede ser programado para deshabilitar los láseres de bombeo en este caso, proveyendo una medida de seguridad para los técnicos trabajando con los EDFA's.

La figura 3.19 muestra un EDFA de dos etapas con acceso medio entre etapas. En este caso, dos EDFA's de etapa sencilla son empacados juntos. La salida de la primera etapa del EDFA y la entrada a la segunda etapa del EDFA son llevadas hasta el usuario. El acceso medio entre etapas es importante en sistemas de fibra óptica de alto rendimiento.

Para reducir la dispersión a lo largo del sistema, se puede usar periódicamente fibra compensadora de dispersión (DCF). De cualquier forma, se pueden suscitar problemas con el uso de DCF, en su mayoría perdida por inserción que alcanza hasta los 10dB. Colocando la DCF, en el punto de acceso medio entre etapas del EDFA de dos etapas se reducen los efectos perjudiciales en el sistema, y permite una ganancia notable.

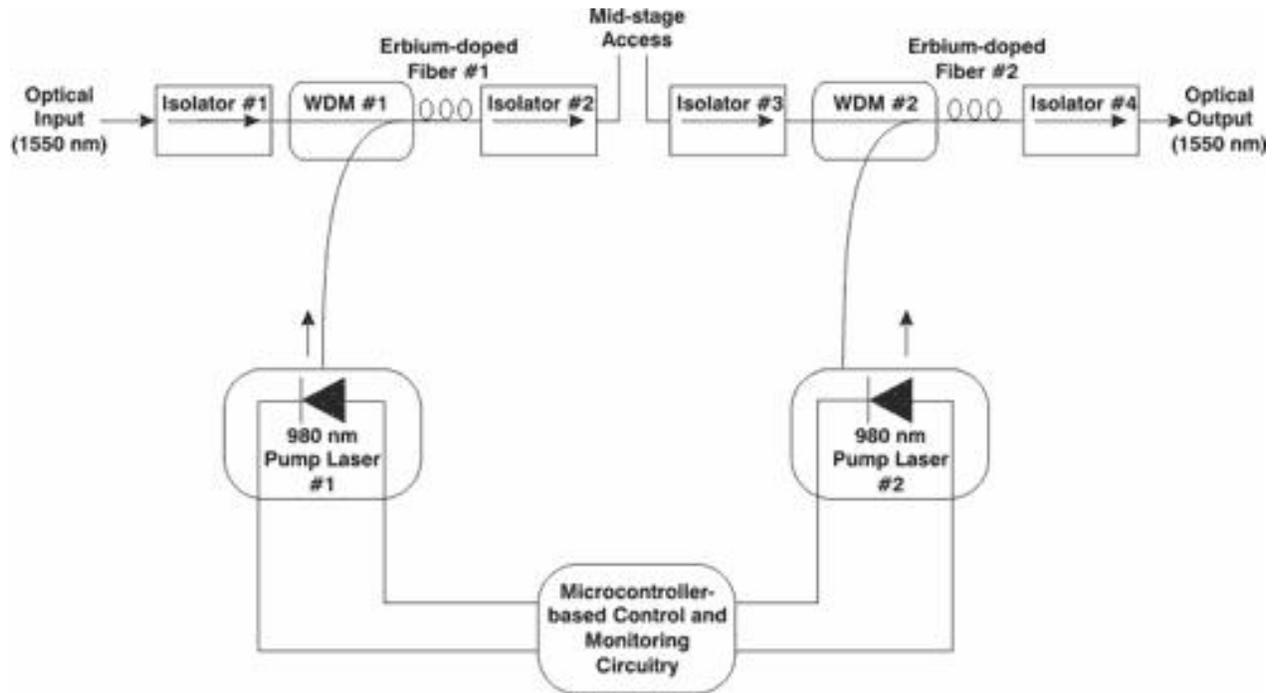


Figura 3.19: EDFA de dos etapas con acceso medio entre etapas<sup>s</sup>.

La entrada óptica pasa primero a través del aislador óptico #1, luego la luz pasa a través del WDM #1, el cual provee un promedio de la inyección de la longitud de onda de bombeo a 980nm. Dentro del primer tramo de fibra dopada con Erbio. El WDM #1 también permite a la señal óptica de entrada ser acoplada dentro de la fibra dopada con Erbio con la mínima pérdida óptica. Como en su configuración característica, en los EDFA de bombeo doble, la energía de 980nm. Bombea los átomos de Erbio en un estado excitado que decae lentamente. Cuando la luz en la banda de los 1550nm. Viaja a través de la fibra dopada con Erbio causa la emisión estimulada de radiación. Tal cual la señal óptica gana fuerza, la salida de la fibra dopada va después al aislador óptico #2, del cual la salida está disponible para el usuario.

<sup>s</sup> Figura tomada de <http://www.fiber-optics.info>

Típicamente, un dispositivo compensador de dispersión será conectado en el punto medio de acceso entre etapas. La luz después viaja hacia el aislador #3 y el WDM #2, el cual acopla una energía adicional de 980nm. de un segundo láser de bombeo dentro del otro tramo de fibra dopada, incrementando la ganancia y la potencia de salida. Finalmente la luz pasa a través del aislador #4.

Los fotones amplifican la señal evitando casi todos los componentes activos, un beneficio de los EDFA's. Debido a que la potencia de salida de un EDFA puede ser alta, un diseño dado de algún sistema requiere de menos amplificadores. Y aun otro beneficio de los EDFA's es la independencia de las tasas de datos lo cual quiere decir que las actualizaciones solo requieren de cambiar las terminales de lanzamiento y recepción. El diseño más básico de un EDFA amplifica la luz sobre una banda muy estrecha de 12nm. Añadiendo filtros de ecualización de ganancia se puede incrementar la banda a más de 25nm. Otras fibras dopadas exóticas incrementan la banda de amplificación a 40nm.

A causa de que los EDFA's mejoran el rendimiento del sistema, encuentran uso en sistemas de comunicaciones ópticas de larga distancia, sistemas de altas tasas de datos y en sistemas de entrega de CATV. Los sistemas de larga distancia necesitan amplificadores debido a las distancias de la fibra usada. Las aplicaciones de CATV a menudo necesitan dividir la señal en muchas fibras, y los EDFA's fortalecen la señal antes y después de la división entre fibras. Hay otras 4 aplicaciones importantes que generalmente requieren de amplificadores de fibra óptica: amplificadores de potencia/boosters, amplificadores en línea, preamplificadores o compensación de pérdidas para redes ópticas. Abajo es descrita en detalle cada aplicación.

### **3.3.3.1 Amplificador de potencia/booster**

La figura 3.20 ilustra las primeras 3 aplicaciones de los de los amplificadores ópticos. Los amplificadores de potencia (también conocidos como booster amplifiers) son colocados directamente después del transmisor óptico. Esta aplicación requiere que el EDFA tome una señal de entrada grande y provea el nivel máximo de salida. La respuesta a una señal pequeña no es tan importante porque la salida directa del transmisor es usualmente de -10dB. o más grande. El

ruido añadido por el amplificador en este punto también no es tan crítico porque la señal de entrada tiene un radio de señal a ruido grande (SNR) .

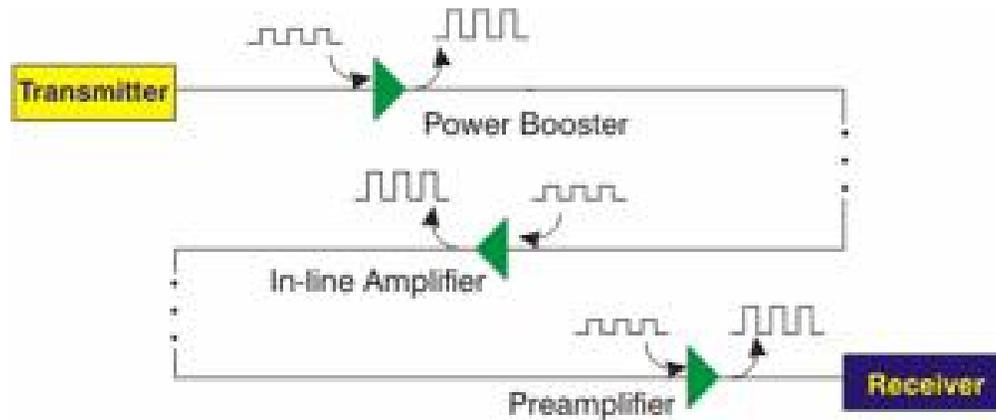


Figura 3.20: Aplicaciones de un EDFA<sup>1</sup>.

### 3.3.3.2 Amplificadores en línea

Los amplificadores en línea o repetidores en línea, modifican una señal pequeña de entrada y la regeneran para retransmisión hacia la fibra. Controlando el desempeño de la señal pequeña y ruido añadido por el EDFA se reduce el riesgo de limitar el largo de un sistema debido al ruido producido por los componentes de amplificación.

### 3.3.3.3 Preamplificadores

La pasada sensibilidad del receptor de -30dBm a 622Mb/s era aceptable, de cualquier forma, hoy en día, las demandas requieren sensibilidad de -40dBm. o de -45dBm. Este desempeño puede ser logrado al colocar un amplificador óptico antes del receptor. Regenerar la señal en este punto presenta una señal mucho más grande a la entrada del receptor, y de este modo se facilitan las demandas del diseño del receptor. Esta aplicación requiere de prestar atención cuidadosamente al ruido añadido por el EDFA, el ruido añadido por el EDFA debe ser el mínimo para maximizar la relación de señal a ruido recibida.

<sup>1</sup> Figura tomada de <http://www.fiber-optics.info>

### 3.3.3.4 Compensación de pérdidas en redes ópticas

Insertando un EDFA antes de un divisor óptico de 8 x 1 incrementa la potencia a casi +19dBm. Permitiendo a cada una de las ocho cuerdas de salida proveer +9dBm. haciendo la salida casi igual a la potencia original del transmisor. El divisor óptico por sí solo tiene una pérdida óptica por inserción nominal de 10dB. El transmisor tiene una salida óptica de 10dBm. Con esto se quiere decir que las salidas ópticas del divisor sin un EDFA serían de 0dBm. Esta potencia de salida sería aceptable para la mayoría de las aplicaciones digitales; sin embargo; en aplicaciones de CATV análogo esta es la potencia mínima recibida aceptable. Entonces, insertando el EDFA antes del divisor óptico incrementa enormemente la potencia de salida.

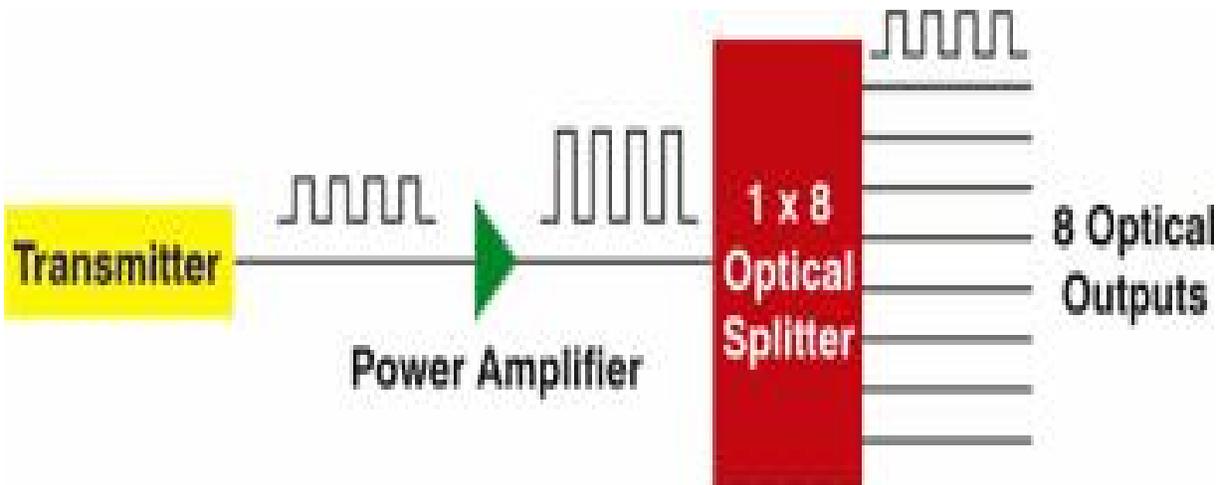


Figura 3.21: Compensación de pérdidas en redes ópticas<sup>u</sup>.

### 3.3.3.5 EDFA's de banda ancha

En sistemas de comunicaciones ópticas transportando 100 o más longitudes de onda ópticas requieren de un incremento en el ancho de banda del amplificador óptico a cerca de 80nm. Normalmente empleando un amplificador óptico híbrido, consistente en dos amplificadores ópticos separados, permite el separar la amplificación, uno para la banda de 40nm. inferior y el segundo para la banda de 40nm. superior. La figura 6 ejemplifica el espectro de ganancia óptica de un amplificador óptico híbrido. Las líneas sólidas ilustran la respuesta de

<sup>u</sup> Figura tomada de <http://www.fiber-optics.info>

dos secciones individuales de amplificación. La línea punteada, la cual ha sido incrementada en 1dB. Para claridad, muestra la respuesta del amplificador híbrido combinado.<sup>[21]</sup>

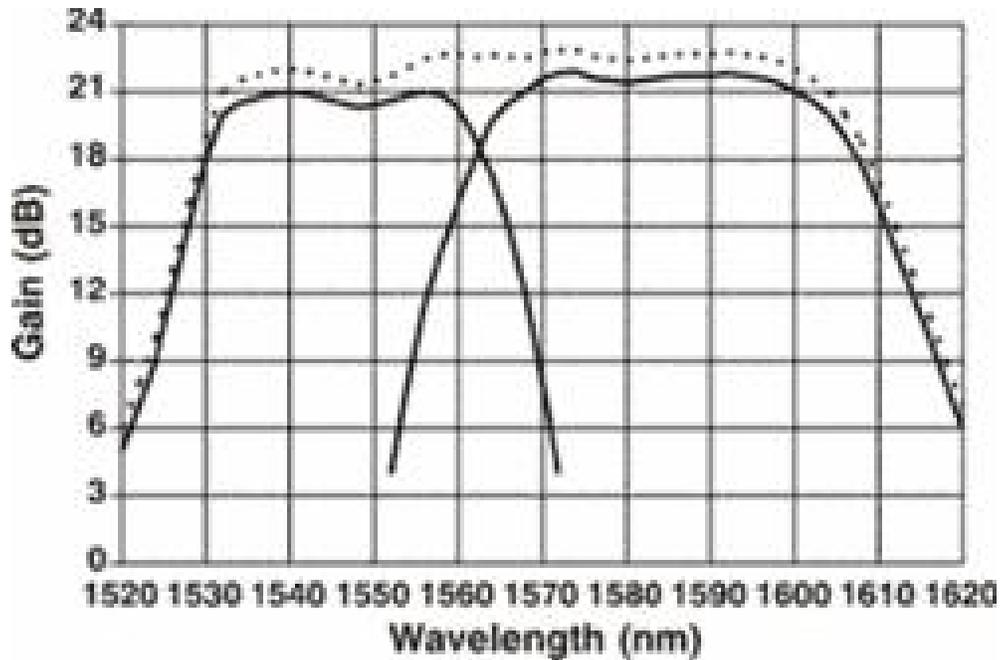


Figura 3.22: Espectro de ganancia óptica de un amplificador óptico híbrido<sup>v</sup>.

### 3.3.4 Amplificadores de fibra dopada para otros rangos de longitud de onda

Amplificadores de fibra dopada con Tulio han sido usados en la banda S (1450-1490nm.) y amplificadores dopados con Praseodimio en la región de 1300nm. De cualquier forma estas regiones no han tenido un uso comercial significativo y es por eso que estos amplificadores no han sido sujetos a tanto desarrollo como los EDFA's.

### 3.3.5 Amplificador óptico Raman

A diferencia de los EDFA's y los SOA's el efecto de amplificación es logrado por una interacción no lineal entre la señal y un láser de bombeo dentro de una fibra óptica. Un amplificador distribuido Raman es uno en el cual la fibra de transmisión es utilizada como el medio de ganancia al multiplexar una longitud de onda de bombeo con la longitud de onda de la

<sup>v</sup> Figura tomada de <http://www.fiber-optics.info>

señal, mientras que un amplificador Raman anudado utiliza una longitud corta y dedicada de fibra para proveer amplificación. En el caso del amplificador Raman anudado una fibra con alta no linealidad con un núcleo pequeño es utilizada para incrementar la interacción entre la señal y las longitudes de onda de bombeo y por esto reducir el largo de la fibra requerida.

La luz de bombeo puede ser acoplada dentro de la fibra de transmisión en la misma dirección que la de la señal (bombeo codireccional), bombeo en la dirección opuesta (contradireccional) o ambos. El bombeo contradireccional es más común ya que la transferencia de ruido del bombeo a la señal es reducida.

La potencia de bombeo requerida por la amplificación Raman es mucho mayor que el requerido por el EDFA, dentro de un exceso de 500mW. Siendo requeridos para lograr niveles utilizables de ganancia en un amplificador distribuido. Amplificadores anudados, donde la luz de bombeo puede ser contenida con seguridad para evitar implicaciones de seguridad de altas potencias ópticas, pueden usar sobre 1W de potencia óptica.

La principal ventaja de la amplificación Raman es su habilidad de proveer amplificación distribuida dentro de la fibra de transmisión, y de esta forma incrementándose la longitud de los tramos entre los sitios de amplificación y regeneración. El ancho de banda de amplificación de los amplificadores Raman está definida por las longitudes de onda de bombeo utilizadas y es por esto que la amplificación puede ser provista sobre regiones amplias, y diferentes, que pueden ser posibles con otros tipos de amplificadores los cuales se confían de dopantes y diseño del dispositivo para definir la ventana de amplificación.<sup>[22]</sup>

Como ya se mencionó los amplificadores ópticos Raman se diferencian de los EDFA's y de los láser convencionales en que estos utilizan la dispersión estimulada Raman (Stimulated Raman Scattering o SRS por sus siglas) para crear una ganancia óptica. Inicialmente la SRS fue considerada muy perjudicial para la alta cantidad de canales en los sistemas DWDM. La figura 3.23 muestra un espectro transmitido típico de un sistema DWDM de seis canales en la ventana de los 1550nm. Note que las seis longitudes de onda tienen aproximadamente la misma amplitud.

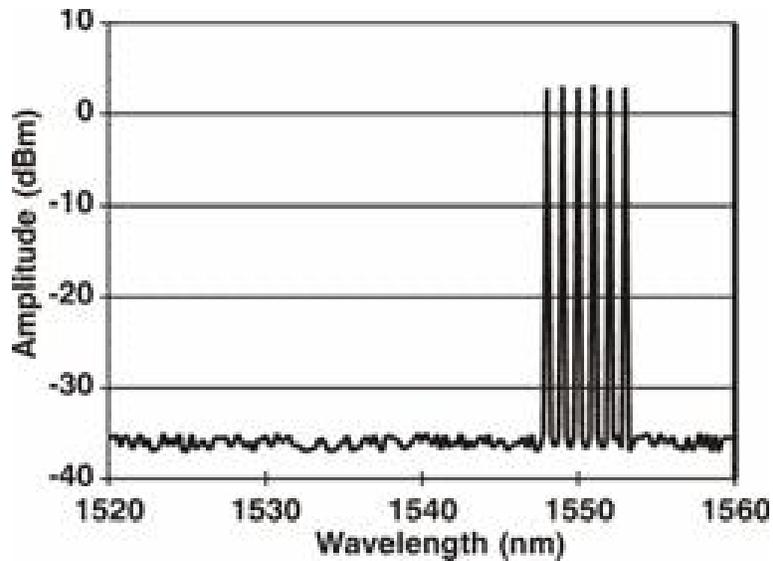


Figura 3.23: Espectro transmitido de DWDM con seis longitudes de onda<sup>w</sup>.

Al aplicar la SRS a las longitudes de onda, es obvio que el ruido piso se ha incrementado, haciendo a las amplitudes de las seis longitudes de onda diferentes. Las longitudes de onda inferiores tienen una amplitud menor que las longitudes de onda superiores. La SRS efectivamente tomó energía de la longitud de onda inferior y proporcionó esa energía a la longitud de onda superior.

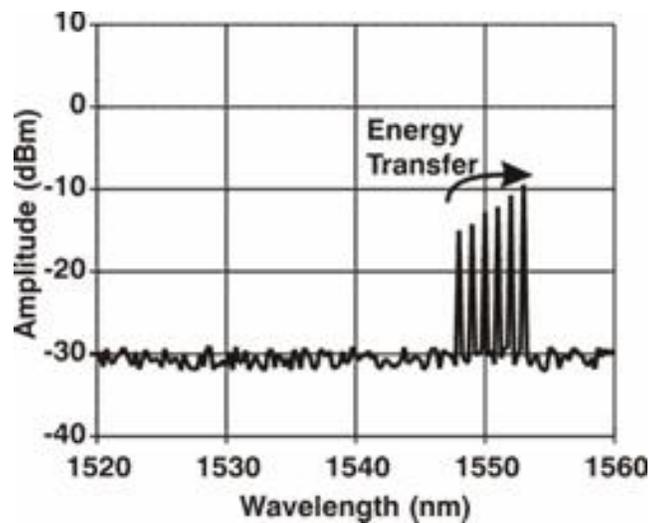


Figura 3.24. Espectro recibido después de aplicar la SRS en una fibra larga<sup>w</sup>.

<sup>w</sup> Figura tomada de <http://www.fiber-optics.info>

Un amplificador óptico Raman es un poco más que un láser de bombeo de alta potencia, y un acoplador WDM o direccional. La amplificación óptica ocurre en la misma fibra de transmisión, distribuida a lo largo de la ruta de transmisión. Las señales ópticas son amplificadas hasta en 10dB. en la red de fibra óptica. Los amplificadores ópticos Raman tienen un amplio ancho de banda de ganancia (hasta 10nm.). Estos amplificadores pueden usar cualquier fibra óptica de transmisión. Consecuentemente, estos reducen el tiempo efectivo perdido para mejorar el desempeño respecto a ruido al amplificar la señal óptica en tránsito. Se pueden combinar con los EDFA's para expandir la ganancia óptica de un ancho de banda aplanado.

La figura 3.25 muestra la topología de un amplificador óptico Raman típico. El láser de bombeo y el circulador comprenden los 2 elementos claves del amplificador óptico Raman. El láser de bombeo, en este caso, tiene una longitud de onda de 1535nm. El circulador provee promedios apropiados de la inyección de luz de regreso dentro de la ruta de transmisión con la mínima pérdida óptica.

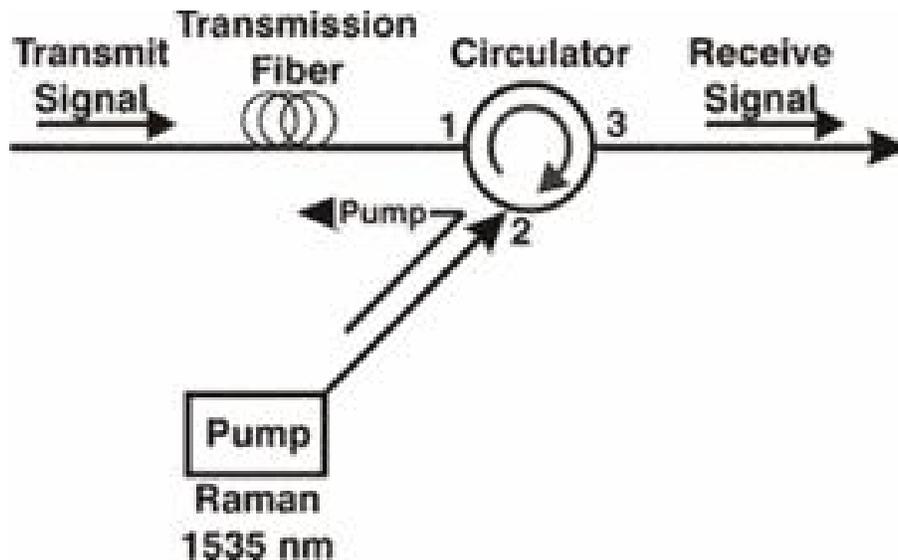


Figura 3.25: Configuración típica de un amplificador Raman<sup>x</sup>.

La figura 3.26 ilustra el espectro óptico de un amplificador óptico Raman de bombeo directo. El láser de bombeo es inyectado en la terminación de transmisión en vez de en la

<sup>x</sup> Figura tomada de <http://www.fiber-optics.info>

terminación de recepción como se muestra en la figura 9. El láser de bombeo tiene una longitud de onda de 1535nm. La amplitud es mucho mayor que las señales de datos.

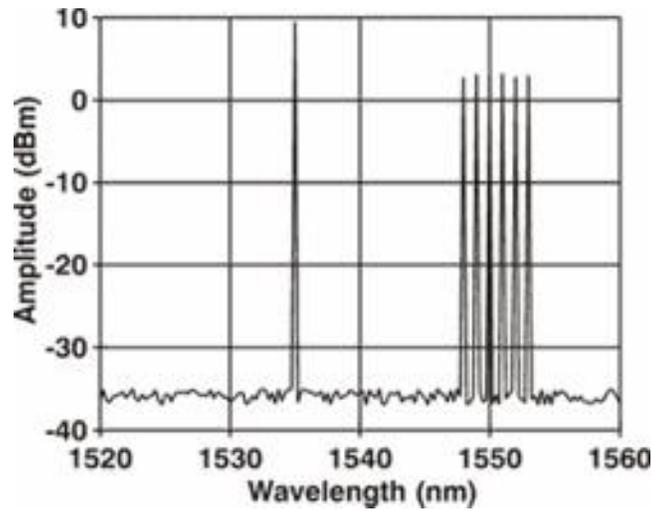


Figura 3.26. Ejemplo de un espectro recibido de un amplificador Raman<sup>y</sup>.

Tal como se mencionó, aplicando la SRS se hace que la amplitud de las señales sea mucho más fuerte. La energía del láser de bombeo de 1535nm. es redistribuida a las seis señales de datos.<sup>[21]</sup>

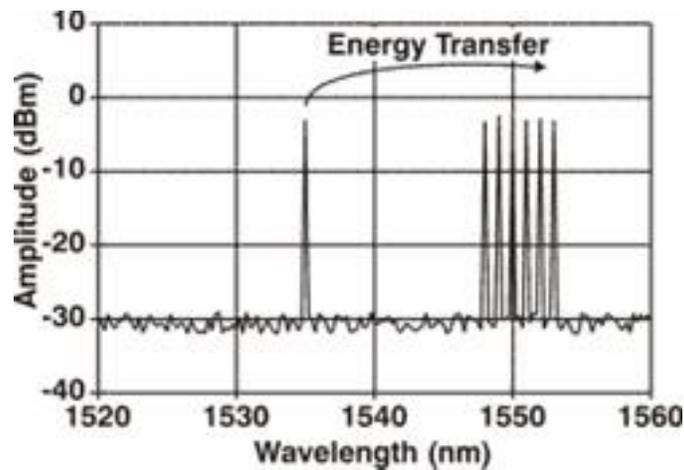


Figura 3.27. Ejemplo de un espectro recibido de un amplificador Raman<sup>y</sup>.

<sup>y</sup> Figura tomada de <http://www.fiber-optics.info>

## CAPÍTULO 4

### EMPALMES Y CONECTORES DE FIBRA ÓPTICA

#### Generalidades

En las instalaciones de sistemas de fibra óptica es necesario utilizar elementos de interconexión a modo de empalmes y conectores. A la hora de realizar estos empalmes y conexiones se debe procurar que las pérdidas sean lo más reducidas posibles. Se recurre al empalme cuando se quiere unir tramos de cable de fibra óptica en enlaces donde la distancia a cubrir es grande, utilizándose también para reparar cables ópticos ya instalados. Actualmente existen tres formas de realizar un empalme de fibras:

- ✓ Mediante un conector: Es totalmente desmontable, por lo que nos permite la conexión y desconexión repetitiva sin degradación de la transmisión. La única desventaja que esto tiene, es que la atenuación es mayor.
- ✓ Mediante fusión mecánica: une las fibras preparadas en un tubo ajustado de forma temporal.
- ✓ Mediante fusión térmica: Es un sistema permanente, el cual consiste en calentar hasta el punto de fusión las puntas preparadas de las dos fibras, las cuales se empalman con una máquina. Lo negativo de éste método es el coste que conlleva dicha máquina.<sup>[4]</sup>

Desde el año 1970 en que se fabricaron las primeras fibras ópticas con una atenuación de 20 dB/km. los sistemas de comunicaciones ópticas se han convertido en una realidad gracias a las continuas mejoras tecnológicas que han permitido alcanzar atenuaciones de 0,2 dB/km. Ahora bien, para aprovechar las bajas pérdidas de transmisión de las fibras ópticas resulta crucial el diseño óptimo de las tecnologías de conexionado de las mismas (empalmes y conectores).<sup>[10]</sup>

Debido a que una bobina de cable de fibra óptica no llega a superar los 2Km de longitud, mientras que la distancia entre dos repetidoras o centrales puede ser de 30 o 40Km, deben realizarse empalmes entre los tramos, entre cada final y los conectores.<sup>[23]</sup>

Los requisitos fundamentales que deben cumplir los distintos métodos de conexionado de fibras se pueden resumir en: reducida degradación de las propiedades de transmisión de la fibra (bajas pérdidas de conexión y/o reflexiones), alta fiabilidad de la conexión, manejo sencillo incluso para su realización en campo por parte de operarios e instaladores y, finalmente, bajo costo. El intenso trabajo de investigación llevado a cabo hasta el momento ha permitido satisfacer todos estos requisitos.<sup>[10]</sup>

#### **4.1 Empalmes**

En los empalmes de fibras ópticas, aseguramos una alta y estable calidad de transmisión en servicio, con un mínimo de mantenimiento, y sometidos a diferentes condiciones ambientales. La pérdida en los empalmes puede ser significativa, siendo especialmente muy sensible al ángulo de corte de los extremos de las fibras a empalmar y a la falta de acuerdo con el diámetro modal. Los empalmes se efectúan en un ambiente limpio, sin polvos en suspensión, bien iluminado, evitando en lo posible la exposición solar directa. La ejecución de los mismos debe ser realizada en el interior de un vehículo acondicionado especialmente para tal fin, así mismo se deja una cantidad suficiente de fibra en un arreglo holgado dentro de las cajas de empalmes, para rehacer eventualmente los mismos si las características finales no responden a las de aceptación. En los casos en que se utilicen sustancias químicas como agentes removedores (alcohol isopropílico, terpeno, dicloro metano) se efectúa una especial limpieza posterior, para evitar acciones residuales que podrían causar la degradación de la calidad del empalme.

Los empalmes se protegen convenientemente de acciones mecánicas y ambientales con los dispositivos adecuados como lo son las mangas termocontráctiles. Asimismo se asegura que los radios mínimos de curvatura, en el arreglo de las fibras en las bandejas, se mantenga entre 60 y 75 mm. Para el empalme de una fibra se tienen en cuenta dos parámetros: la pérdida por

empalme permitida y el número de intentos para realizar la unión con éxito. La atenuación por empalme ideal se encuentra entre 0,1 dB y 0.2 dB.<sup>[24]</sup>

#### **4.1.1 Principales causas de pérdidas en empalmes**

##### **4.1.1.1 Pérdidas intrínsecas**

Dependen de la composición del vidrio, impurezas, etc., y no las podemos eliminar. Las ondas de luz en el vacío no sufren ninguna perturbación. Pero si se propagan por un medio no vacío, interactúan con la materia produciéndose un fenómeno de dispersión debida a dos factores:

*Dispersión por absorción:* la luz es absorbida por el material transformándose en calor.

*Dispersión por difusión:* la energía se dispersa en todas las direcciones. Esto significa que parte de la luz se irá perdiendo en el trayecto, y por lo tanto resultará estar atenuada al final de un tramo de fibra.

##### **4.1.1.2 Pérdidas extrínsecas**

Son debidas al mal cableado y al empalme de la fibra.

*Pérdidas por curvaturas.* Se producen cuando le damos a la fibra una curvatura excesivamente pequeña (radio menor a 4 o 5cm) la cual hace que los haces de luz logren escapar del núcleo, por superar el ángulo máximo de incidencia admitido para la reflexión total interna. También se dan cuando, al aumentar la temperatura y debido a la diferencia entre los coeficientes de dilatación térmica entre fibras y buffer, las fibras se curvan dentro del tubo.

*Pérdidas por inserción.* Es la atenuación que agrega a un enlace la presencia de un conector o un empalme.

*Pérdidas de retorno o reflectancia.* Es la pérdida debida a la energía reflejada, se mide como la diferencia entre el nivel de señal reflejada y la señal incidente, es un valor negativo y debe ser menor a -30 dB (típico -40dB). En ocasiones se indica obviando el signo menos. Un ejemplo de estas pérdidas se da en la siguiente tabla:<sup>[23]</sup>

Insertion Loss	< .2 dB tip < .3 dB max
Return loss PC	< -30 dB
Return loss Super PC	< -40 dB
Return loss Ultra PC	< -50 dB

Tabla 4.1: Pérdidas por inserción en los distintos tipos de conectores<sup>a</sup>.

#### 4.1.2 Corte de la fibra

La calidad obtenida en el extremo de la fibra tras el corte afecta a las pérdidas del empalme posterior, resultando difícil obtener superficies pulidas mediante la técnica de empalme por fusión directa. Por este motivo, se han propuesto diversas técnicas de corte de fibras que no utilizan máquina de pulir. En cuatro de estas técnicas, a la fibra se le hace una muesca y posteriormente se dobla para realizar el corte. Entre las distintas posibilidades para producir dicha muesca se encuentran: un filo de cuchilla, una descarga eléctrica, un alambre caliente o un láser de CO<sub>2</sub>. Incluso existe otra posibilidad que consiste en realizar una muesca y tirar posteriormente de la fibra sin doblarla. De entre todos los métodos, el más ampliamente utilizado es el basado en la muesca con cuchilla o elemento similar y posterior doblez de la fibra..

#### 4.1.3 Tipos de empalmes

##### 4.1.3.1 Empalmes mecánicos y adhesivos

Tanto los métodos mecánicos como la utilización de adhesivos para realizar el empalme de fibras no se basan en la generación de calor. Por lo tanto, ambos métodos presentan varios

<sup>a</sup> Tabla tomada de <http://www.yio.com.ar>

aspectos comunes en lo relativo al posicionamiento de las fibras. La técnica básica utiliza ranuras en V realizadas en distintos materiales, tanto duros como blandos (figura 4.1). En el caso de materiales blandos es posible realizar empalmes entre fibras de diferente diámetro, ya que el material se deforma para hacer coincidir los centros de ambos núcleos. El método usual de alineamiento que se utiliza es el fijo (alineamiento pasivo). Dado que ninguno de los dos métodos utiliza fusión, el posicionamiento de las fibras depende de la precisión del sustrato y de su evolución con el tiempo. La clave se basa en un sustrato preciso de baja pérdida y con fiabilidad a largo plazo. Existen multitud de materiales propuestos, tales como silicio, metales, plásticos y acero. Cuando el coeficiente de dilatación térmica del sustrato es similar al de las fibras de sílice, resulta fácil eliminar la variación de las pérdidas con la temperatura y asegurar una fiabilidad a largo plazo.

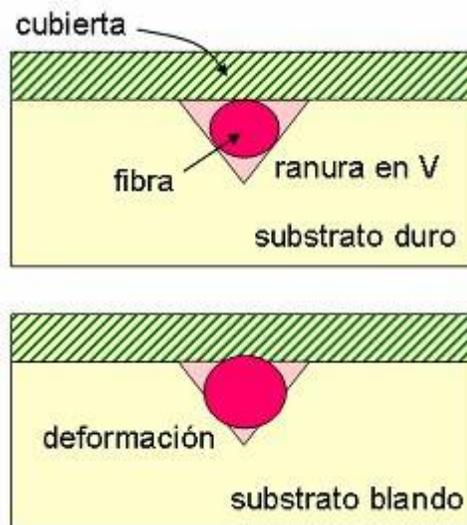


Figura 4.1: Alineamiento de fibras mediante ranuras en V: sustratos duro y blando<sup>b</sup>.

Generalmente suelen emplearse materiales de adaptación entre las fibras en ambos métodos (mecánicos y adhesivos) para reducir las pérdidas del empalme y las reflexiones. Aunque las pérdidas del empalme no son sensibles al índice de refracción, la reflexión sí que resulta muy sensible. Por lo tanto, se necesita una adaptación de índices muy precisa para suprimir las reflexiones. Cuando se requiere muy baja reflexión, también debe tenerse en cuenta la variación con la temperatura del índice de refracción del material de adaptación. Algunos

<sup>b</sup> Figura tomada de <http://www.radioptica.com>

ejemplos de materiales de adaptación serían el gel y resina de Silicio, adhesivos fotosensibles o resinas de epoxy. En el método de empalme basado en adhesivo se prefiere que éste sirva simultáneamente como material de unión y de adaptación.

Una unión mecánica utiliza una fuerza mecánica para mantener el alineamiento de las fibras, por lo que existe la posibilidad de volver a conectarse. No obstante, resulta generalmente bastante difícil en comparación con un conector óptico. Por otra parte, una unión adhesiva utiliza un material adhesivo para cumplir la función de mantener alineadas las fibras. En este sentido es similar a un empalme por fusión, dado que tiene la característica de ser permanente. Así pues, un empalme mecánico es similar a un conector óptico, mientras que un empalme adhesivo es similar a un empalme por fusión. En las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran algunos ejemplos de empalmes mecánicos y adhesivos realizados con diversos materiales.

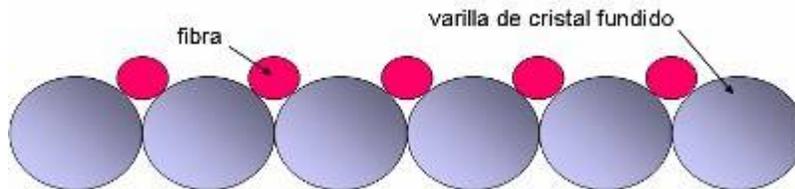


Figura 4.2: Empalme de múltiples fibras utilizando varillas de cristal y adhesivos<sup>c</sup>.

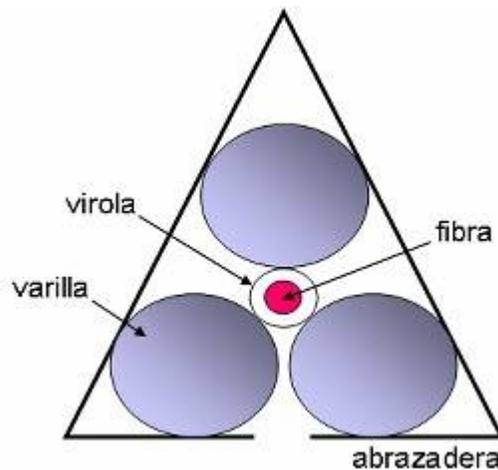


Figura 4.3: Empalme mecánico mediante abrazadera y varillas<sup>c</sup>.

<sup>c</sup> Figura tomada de <http://www.radioptica.com>

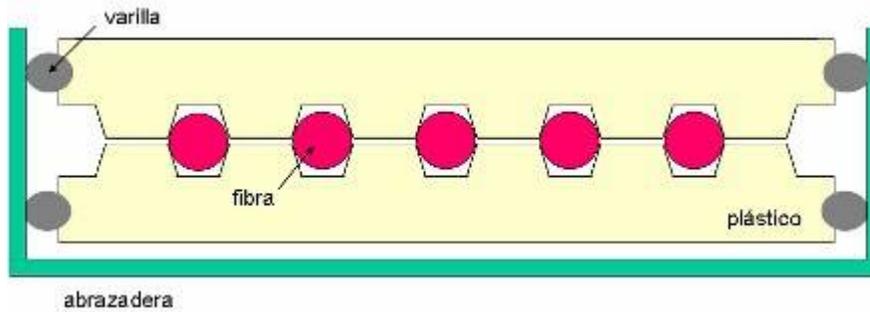


Figura 4.4: Empalme mecánico mediante abrazadera y ranuras en plástico<sup>d</sup>.

#### 4.1.3.2 Empalmes por fusión

*Empalme de fibras por fusión directa.* Existen diversos métodos de empalme de fibras ópticas por fusión directa, todos ellos clasificados en base al tipo de fuente de calor utilizada: una descarga eléctrica, un láser gaseoso o una llama. El primero de ellos es el más ampliamente utilizado en el caso de fibras de sílice. En especial, se han desarrollado varias técnicas para realizar empalmes por medio de descarga eléctrica, tales como el método de prefusión, el método de descarga de alta frecuencia con un elevado voltaje de trigger (HHT), y el método de calentamiento uniforme para realizar empalmes de múltiples fibras.

Los métodos de empalme por fusión directa utilizan una fuente de calor para fundir y unir las fibras ópticas. A diferencia de otros métodos que utilizan materiales de adaptación o adhesivos, en este caso no existe ningún otro material más que la propia fibra en la región del empalme. Por lo tanto, este método posee inherentemente bajas pérdidas por reflexión y alta fiabilidad. El procedimiento de empalme de fibras por fusión utilizando descarga eléctrica se muestra en la figura 4.5.

En primer lugar, se quitan las cubiertas de las fibras y se cortan. Ambas fibras se sitúan con una cierta separación entre ellas en una máquina empalmadora de fibras y se pulsa un botón para comenzar el proceso. Hasta este punto el trabajo se realiza manualmente por parte de un operario. En el momento de pulsar el botón de la máquina, ésta comienza a mover las fibras para reducir la separación entre las mismas. Durante el movimiento de las fibras, se genera una

<sup>d</sup> Figura tomada de <http://www.radioptica.com>

descarga eléctrica que se mantiene durante un período de tiempo predeterminado. Este proceso tiene lugar de forma automática en la máquina empalmadora. Por último, la región donde se ha producido el empalme se protege para facilitar el manejo de la fibra. Actualmente existen máquinas completamente automáticas que realizan todas las acciones: desde quitar las cubiertas hasta proteger el empalme.

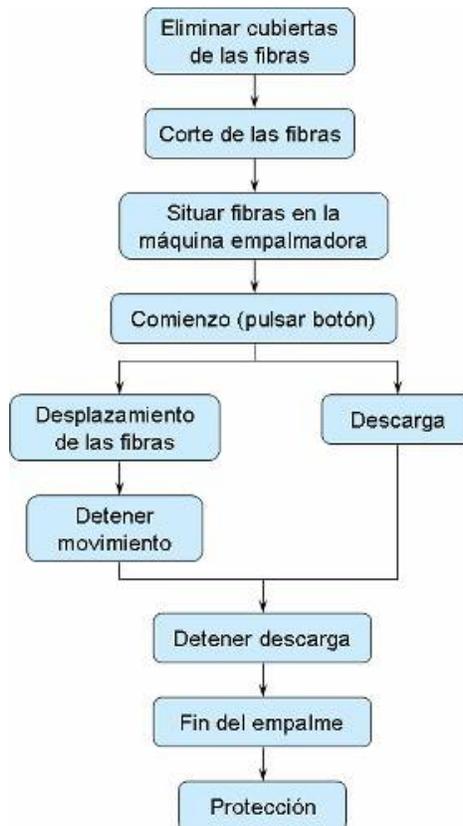


Figura 4.5: Procedimiento de empalme de fibras por fusión<sup>e</sup>.

*Método de prefusión.* Aparte de otros factores de pérdidas más comunes presentes al realizar empalmes, tales como desplazamiento lateral o inclinación, el único factor de pérdidas en el caso del método de empalme por fusión es la formación de burbujas confinadas entre ambos extremos de las fibras. Cuando se produce esto, las burbujas introducen elevadas pérdidas de unos pocos decibelios o incluso más. En los procedimientos de empalme anteriores a la existencia del método de prefusión, ambas fibras se presionaban ligeramente y posteriormente se fusionaban por medio de una descarga eléctrica. Sin embargo, cuando los extremos de las fibras no eran lisos se producían desplazamientos laterales y dobleces, además de una mayor probabilidad de formación

<sup>e</sup> Figura tomada de <http://www.radioptica.com>

de burbujas como consecuencia del confinamiento de aire entre las superficies rugosas. Precisamente para evitar todo esto se propuso el método de prefusión.

El procedimiento consiste en situar los extremos de ambas fibras con una separación de unas micras y posteriormente prefusionarlos con una descarga eléctrica, lo que produce unas superficies lisas. Entonces éstas se desplazan y presionan bajo la descarga. Tras tocarse los extremos, ambas fibras permanecen presionadas debido al movimiento. El calentamiento, por otro lado, continúa incluso una vez que ha cesado el desplazamiento. El tiempo de descarga para la prefusión es inferior a 1 segundo. Por otro lado, el tiempo global de descarga es de unos pocos segundos y para fibras monomodo resulta relativamente pequeño en comparación con el necesario para fibras multimodo. Con este método se obtienen bajas pérdidas en la región del empalme incluso para superficies no perfectas. Dado que es difícil obtener superficies perfectamente pulidas fuera del laboratorio, este método resulta beneficioso en la construcción de una máquina empalmadora para estos fines.

*Método HHT.* En la práctica existen dos tipos de descargas eléctricas que se clasifican en descarga de corriente continua (DC) y descarga de corriente alterna (AC). En general, una descarga AC se prefiere sobre una descarga DC. En el caso de una descarga DC solamente se gasta un electrodo, mientras que en la descarga AC se gastan simultáneamente y de forma simétrica los dos electrodos. El método HHT pertenece precisamente al grupo de descargas AC, y como se verá a continuación una descarga de alta frecuencia posee propiedades beneficiosas.

En el circuito de alimentación utilizado en el método HHT, un voltaje DC de entrada de 12 V se convierte a una señal pulsante de frecuencia 20-40 kHz mediante conmutación empleando dispositivos semiconductores. Estas frecuencias de trabajo son bastante comunes en el caso de circuitos de alimentación de potencia y existen gran cantidad de componentes semiconductores disponibles. El generador de disparo situado a la salida de un transformador y compuesto de diodos y condensadores se encarga de activar los electrodos de descarga. Finalmente, existe un circuito de realimentación para el control de la conmutación.

#### **4.1.4 Técnicas de alineamiento de fibras**

Tanto los métodos de prefusión como de descarga estable son importantes para conseguir bajas pérdidas en los empalmes. Sin embargo, también resulta crucial un buen alineamiento previo de las fibras. Las distintas técnicas de alineamiento pueden clasificarse en fijas y móviles.

##### **4.1.4.1 Técnica fija**

En la técnica fija las fibras no se desplazan lateralmente, sino que éstas se sitúan en posiciones predeterminadas. Éste método se conoce también como alineamiento pasivo y es ampliamente utilizado en las máquinas empalmadoras debido a su simplicidad. Cuando se utilizan fibras con una excentricidad de núcleo pequeña, este método es válido no sólo para fibras multimodo sino también para fibras monomodo. Dado que las tecnologías de fabricación de fibras han mejorado en la actualidad, es posible conseguir empalmes de varias fibras monomodo de forma simultánea con valores de pérdidas inferiores a 0,05 dB utilizando máquinas que emplean esta técnica.

##### **4.1.4.2 Técnica móvil**

En las técnicas móviles las fibras se desplazan lateralmente hasta obtener posiciones precisas previamente a la descarga. Este método se conoce también con el nombre de alineamiento activo. Hasta la fecha se han propuesto múltiples técnicas para realizar el alineamiento, especialmente durante las primeras fases de desarrollo de los empalmes de fibras monomodo, las cuales presentaban una elevada excentricidad en el núcleo en comparación con las fibras actuales.

*Técnicas de monitorización de la potencia óptica.* Se basa en la medida de la potencia óptica transmitida para realizar el alineamiento. Existen tres posibilidades dependiendo de los puntos del sistema que se utilizan para realizar la medida. Tanto la inyección como la detección de potencia se realizan en la mayoría de los casos por medio de la curvatura de la fibra.

*Métodos Visuales.* Son otras de las técnicas no fijas de alineamiento de fibras. En una de las técnicas se utiliza un microscopio para observar en una dirección o en dos direcciones perpendiculares los diámetros exteriores de las dos fibras. Para observar las dos direcciones se coloca un espejo cerca de las fibras. La imagen aumentada puede verse directamente o indirectamente, en este último caso a través de un monitor de TV y una cámara. Dado que para el alineamiento se utiliza como referencia el diámetro exterior de las fibras, esta técnica es poco eficiente en el caso de fibras monomodo con excentricidad en el núcleo. Para ello debería utilizarse algún método de monitorización directa del núcleo, como por ejemplo: el uso de la fluorescencia de un núcleo de sílice dopado con Germanio y excitado con luz ultravioleta, el uso de un microscopio de contraste por interferencia diferencial, el uso de un divisor de haz y luces inyectadas en ambas direcciones o el uso de un microscopio ordinario.

*Técnica de sensado de luz.* También pertenece al conjunto de técnicas móviles. En esta técnica se detectan las posiciones de las fibras en dos direcciones perpendiculares por medio de dos sensores de luz por cada fibra, por lo que son necesarios cuatro sensores en total.

En las técnicas móviles resulta imprescindible la presencia de mecanismos muy precisos para realizar los movimientos finos que se precisan durante el alineamiento. Algunos mecanismos propuestos consisten en una plataforma móvil de precisión controlada por un motor, un dispositivo piezoeléctrico o un dispositivo de deformación elástica. Las características de linealidad en el movimiento, desplazamiento máximo y tamaño dependen de la técnica de alineamiento y del diseño de la máquina empalmadora.

#### 4.1.5 Protección del empalme

Generalmente la cubierta de las fibras se elimina previamente a la realización del empalme. Durante el proceso consistente en eliminar las cubiertas, cortar las fibras y situarlas en la máquina empalmadora, e incluso en el proceso de calentamiento, se producen grietas en las fibras que debilitan su resistencia. La resistencia de las fibras tras realizar un empalme se reduce en un 10% aproximadamente, por lo que se hace necesaria la posterior protección de la zona tratada.

A la hora de seleccionar un método de protección se deben considerar factores tales como: fiabilidad (variación de las pérdidas de empalme y rotura), facilidad de manejo y coste. Cuando el método de protección o su diseño no es bueno, las pérdidas del empalme sufren gran variación con la temperatura. Si por el contrario se realiza de forma adecuada, las pérdidas varían tan sólo 0,02 dB para rangos de temperatura desde -30 °C hasta +60 °C. De entre los distintos métodos de protección utilizados destacan: una ranura con forma de V (V-groove) de plástico con cubierta, un par de láminas de cristal cerámico, un tubo que se contrae con el calor junto con una varilla de acero o un molde de plástico. Finalmente, para la sujeción se utilizan como adhesivos una reacción química, la fundición del material o resinas fotosensibles. Un ejemplo de protección se muestra en la figura 4.6, las mangas termocontráctiles son las más comúnmente utilizadas en los empalmes por fusión.<sup>[10]</sup>



Figura 4.6: Mangas termocontráctiles<sup>f</sup>.

<sup>f</sup> Figura tomada de <http://www.radioptica.com>

#### 4.1.5.1 Cajas de empalme

Los empalmes exteriores se protegen dentro de una caja de empalme, la cual posee en un extremo unos tubos cerrados que se cortarán en su extremo por donde deba pasar un cable, para luego sellarse con termocontraíbles. La caja posee una tapa o domo que se cierra sobre la base con una abrazadera sobre un o-ring. Sobre el domo se encuentra la válvula de presurización. En la base se encuentran las borneras para sujetar los elementos de tracción de los cables y la puesta a tierra que también asoma al exterior de la caja. También están las bandejas donde se sitúan la reserva de FO desnuda y los empalmes. Del otro lado de las bandejas hay espacio para situar la reserva (ganancia) de buffers aunque puede existir una bandeja para tal fin.



Figura 4.7: Caja de empalmes<sup>g</sup>.

#### 4.1.5.2 Distribuidores para centrales

En cada extremo de un enlace de FO se encuentran los distribuidores en donde se empalma cada fibra a un cable de una fibra conectorizado, denominado PIGTAIL. Estos están numerados y se conectan a uno de los extremos de un acoplador fijado al gabinete, a donde luego se conectarán los jumpers de los equipos de transmisión o de los medidores. Poseen tapas atornilladas para tapar los conectores y además unos cassettes o bandejas donde residen los empalmes y la reserva. Tienen además borneras de sujeción para los elementos de tracción del

<sup>g</sup> Figura tomada de <http://www.yio.com.ar>

cable o boquillas cónicas para sujetarlo. Van atornillados en rieles arriba y abajo en el "vertical", o en un rack.<sup>[23]</sup>

#### 4.1.6 Máquinas de empalme de fibras

Existen disponibles comercialmente multitud de máquinas de fácil manejo para realizar automáticamente el empalme de diversos tipos de fibras ópticas: monomodo, multimodo, fibras de dispersión desplazada, fibras mantenedoras de polarización, etc. La mayoría emplean los métodos de prefusión y HHT para realizar la unión. Para su funcionamiento disponen de una pequeña batería interna de 12 V o de conexión a la red. En la figura 4.8 se muestra un ejemplo de una de estas máquinas y en la tabla 4.2 se resumen sus principales características.<sup>[10]</sup>



Figura 4.8: Máquina empalmadora RSU 12 de Ericsson<sup>h</sup>.

Tipos de Fibra	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Monomodo, Multimodo y DSF</li> <li>● Una sola fibra 125/250 <math>\mu\text{m}</math> o una cinta de fibras (hasta 12) 125/900 <math>\mu\text{m}</math></li> </ul>
Pérdidas típicas de empalme	0.005 dB para cinta de 12 SMF's
Posicionamiento de fibras	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ranuras en V fijas para alineamiento radial</li> <li>● Motores de alta precisión para alineamiento axial</li> </ul>

<sup>h</sup> Figura tomada de <http://www.radioptica.com>

Alimentación	100-200 VAC, 50-60 Hz, batería adicional o conexión a la del coche (12 VDC)
Entorno de operación	0-45°C, humedad máxima 98% RH no condensada
Monitor	6.5" TFT
Tamaño	223x346x165 mm.
Peso	5.3 kg.

Tabla 4.2: Características de la máquina empalmadora RSU 12 de Ericsson<sup>1</sup>.

#### 4.1.7 Realización de un Empalme

##### 4.1.7.1 Preparación de las puntas de la fibra

Para comenzar con la preparación se corta el cable dejando la longitud apropiada de acuerdo al tipo de empalme a realizar. Desde el extremo del cable se mide una longitud de 1.5m, se efectúa un corte en forma circular y transversal al cable en todo el espesor de la cubierta externa. Las cintas de ligadura y envoltura del núcleo se cortan, y una vez eliminado el compuesto de relleno se procede a secar los tubos. Finalmente se procede a identificar las ataduras que contienen las fibras.

##### 4.1.7.2 Preparación de caja de empalmes

Comprende las operaciones de apertura de la caja, remoción de bandejas, selección de bocas de entrada y salida para los cables, remoción de obturadores de bocas, etc. Se procede con la fijación de los cables, según se trate de un cable cortado o una sangría para un empalme de derivación. En el caso de cable cortado, se suplementa la cubierta del cable en el extremo, para lograr su adaptación al tamaño de la brida de sujeción, si el diámetro fuera menor al de la brida, y se adaptará también a la altura de la boca de obturación. Se sujeta el cable con la brida y se anclan las fibras y los elementos de refuerzo. En caso de existir más cables se repetirán las

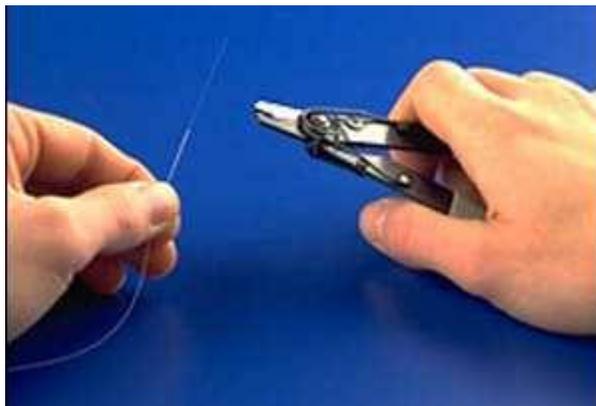
<sup>1</sup> Figura tomada de <http://radioptica.com>

operaciones detalladas. Sí se hiciera un empalme con sangría, se retirarían tres metros de cubierta externa e interna evitando dañar los tubos, usando el pelador de cubierta. Se cortarán del mismo modo las fibras a 30cm. y se trenzarán. Los dispositivos que servirán de fijación a los tubos de fibras sin cortar, los acondicionamos luego en el interior.

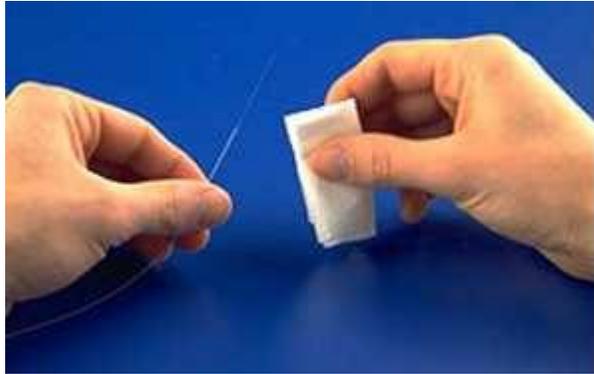
#### 4.1.7.3 Ejecución y cierre de empalmes por sistema de fusión

Antes de proceder al empalme de las fibras, distribuimos uniformemente los tubos en las bandejas. Se eliminan hasta unos 2cm. hasta el punto de fijación en la bandeja, removiendo por lo menos 20cm. y dejando las fibras al descubierto con su primera protección. Se realiza la limpieza de las fibras con alcohol. Una vez fijados los tubos ejecutamos los empalmes por fusión. Las fibras se cortan utilizando un "cleaver", que asegura una buena calidad de corte. Se colocan las fibras dentro de la máquina de empalmar para lograr la alineación correcta, tomando como referencia el núcleo de la fibra. El equipo mencionado permite esta precisa alineación, utilizando ópticas de aumento. El empalme es asistido a su vez por una cámara controlada por computadora y un procesado de imagen, de esta manera se asegura la calidad final del mismo. Una vez unida, se coloca una manga termocontráctil o tubito de soporte, en las partes desnudas de la fibra empalmada. El equipo se encarga también de contraer esta manga, a través de un horno dispuesto en el frente del mismo. También realiza un test de tracción. El empalme es sometido a 200gr. de tracción para comprobar su robustez. Este procedimiento se puede ver ilustrado paso a paso en la figura 4.9:

Con una pinza especial (125 $\mu$ ) se pela unos 5cm. de coating (color)

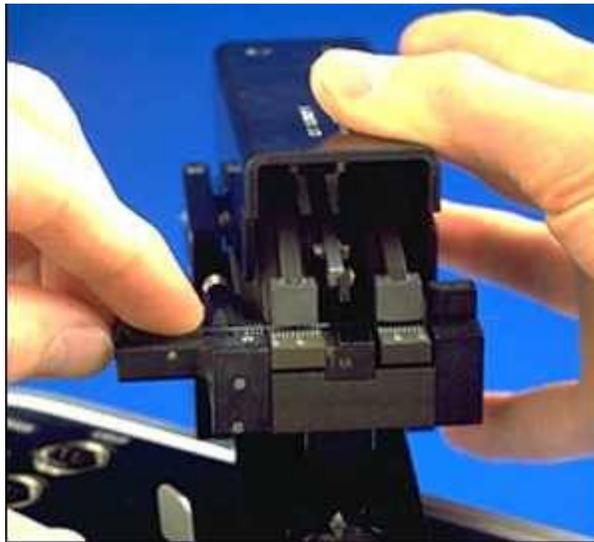


Se limpia la fibra con un papel suave humedecido con alcohol isopropílico.



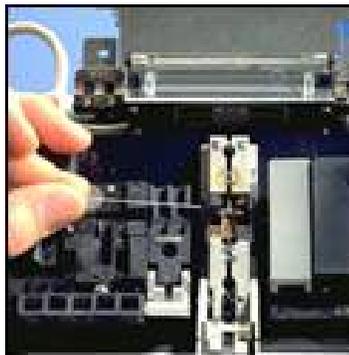
Se corta la fibra a unos 8 a 16mm con un cutter o cleaver, con hoja de diamante, apoyando la fibra dentro del canal, haciendo coincidir el fin de la cubierta con la división correspondiente a la medida.

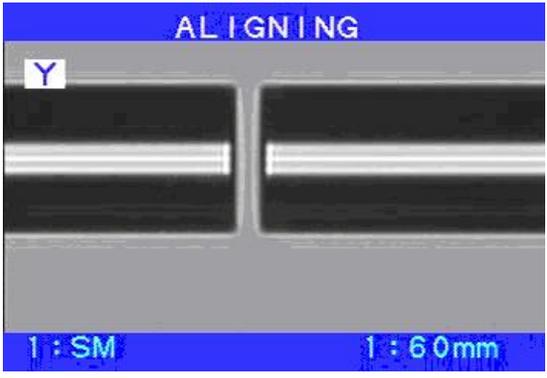
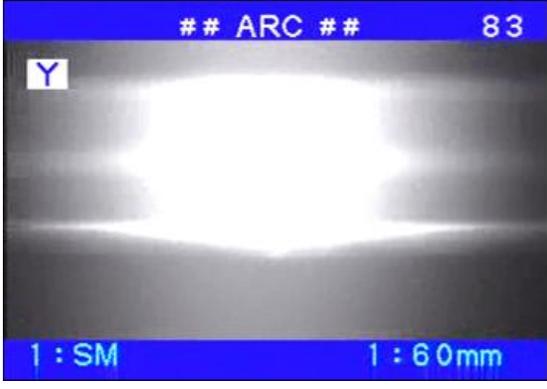
Una vez cortada, la fibra no se vuelve a limpiar ni tocar.



Cuidando que la fibra no contacte con nada, se introduce en la zapata de la empalmadora, sobre las marcas indicadas.

Repetir el procedimiento con la otra fibra.



<p>En el display se verán las dos puntas, pudiéndose observar si el ángulo es perfectamente recto, sino fuera así la máquina no nos permitiría empalmar.</p>	
<p>Presionando el botón de empalme, estando la empalmadora ajustada en automático, la misma procederá a alinear en los ejes x e y, y a acercar las puntas a la distancia adecuada.</p>	
<p>Una vez cumplido esto, a través de un arco eléctrico dado entre dos electrodos, aplicará una corriente de prefusión durante el tiempo de prefusión, y luego una corriente de fusión durante el tiempo de fusión.</p>	
<p>Luego hará una estimación (muy aproximada) del valor de atenuación resultante.</p>	

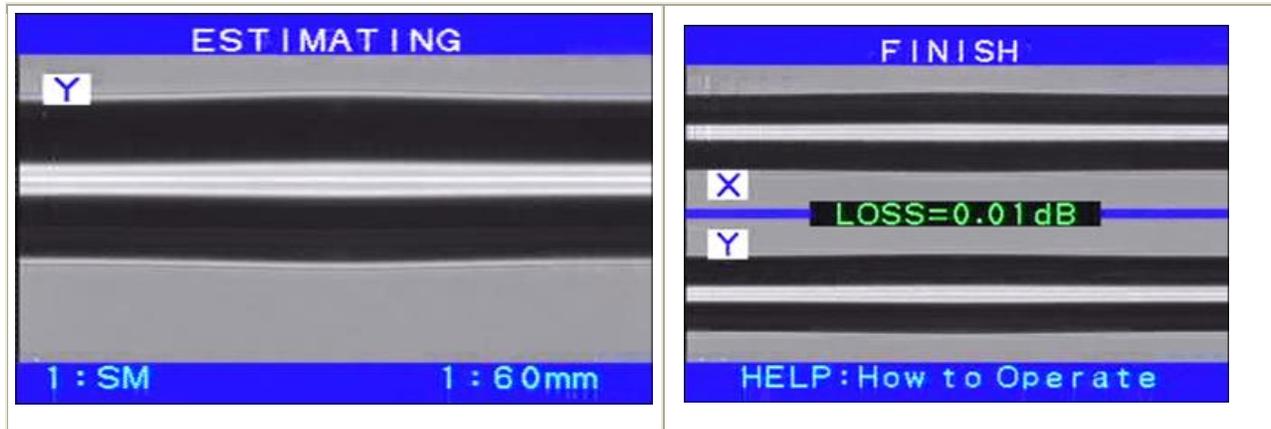


Figura 4.9: Procedimiento ilustrado de la realización de un empalme<sup>j</sup>.

#### 4.1.7.4 Acondicionamiento y cierre de las cajas de empalmes

Se disponen las fibras respetando un orden según la codificación y comenzando desde el punto más alejado de la bandeja. Se enrolla la fibra en los discos de la bandeja en su totalidad. Una vez que se halla completado la tarea de ordenamiento para cada uno de los empalmes se procede al cierre de la caja.

Se coloca un elemento higroscópico antes de cerrar (Silica Gel). Se asegura un cerrado estanco antes de proceder al ajuste de los tornillos de fijación. Hay que verificar que se encuentren selladas también las bocas de cables no utilizados.<sup>[24]</sup>

#### 4.1.7.5 Sellado de cables en ductos y en cajas de empalme

El ducto por donde sale el cable debe sellarse para evitar que a través de él pueda ingresar agua a la cámara o viceversa. Esto se logra con un termocontraíble según el siguiente procedimiento:

Con cintas abrasivas se lijan el extremo del ducto y el cable en la zona donde se situará el termocontraíble, para mejorar la adherencia y se debe hacer en forma transversal porque de lo contrario se formarían canaletas longitudinales por donde podría circular agua.

<sup>j</sup> Figura tomada de <http://www.yio.com.ar>

Sobre el cable, y entrando 1cm aprox. en la zona del termocontraíble (según marca azul) se coloca el papel de aluminio autoadhesivo provisto con la caja, que servirá de pantalla térmica para no quemar el cable. Este papel se alisa con un elemento romo, como el mango de un destornillador, para quitarle los pliegues que podrían formar también canales de entrada del agua.

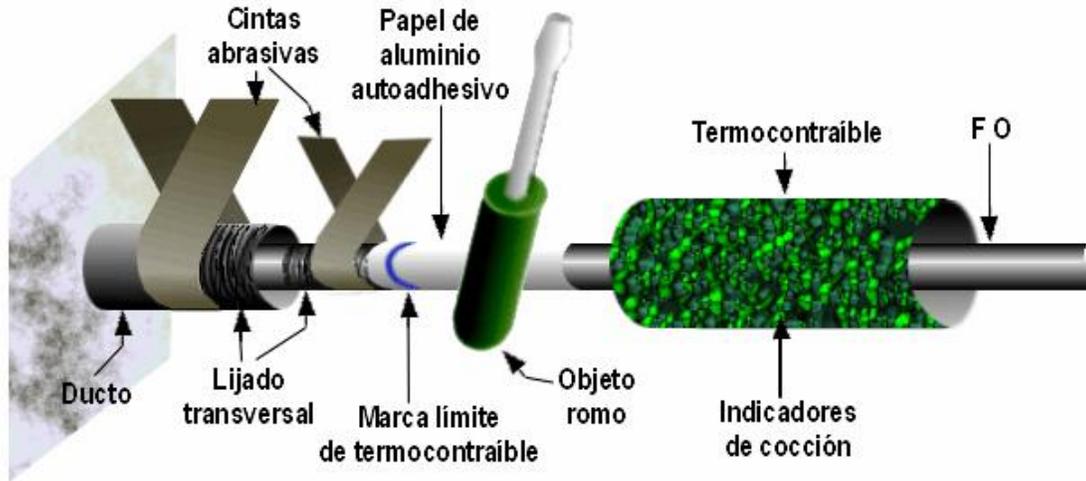


Figura 4.10: Ilustración de las zonas de lijado para el sellado<sup>k</sup>.

Luego se desplaza el termocontraíble sobre el ducto y con una pistola de aire caliente se le cierra, moviendo la pistola permanentemente para no sobrecalentar el termo, el ducto o la fibra. Se comienza desde el centro hacia un extremo hasta que cierre y llegue a asomar el pegamento, y luego hacia el otro extremo, expulsando de esta manera el aire hacia fuera.

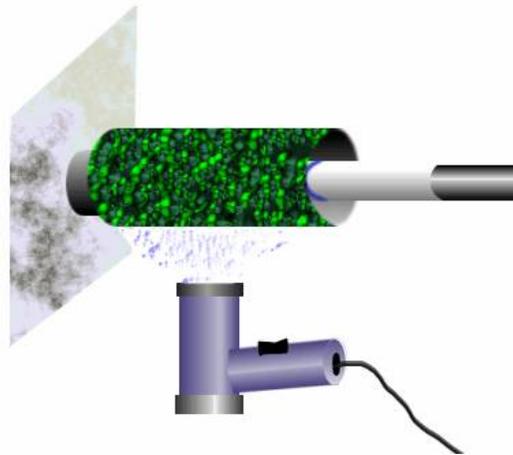


Figura 4.11: Colocación del termocontraíble<sup>l</sup>.

<sup>k</sup> Figura tomada de <http://www.yio.com.ar>

El termo posee unos pigmentos verdes que al oscurecerse indicarán que ya se ha alcanzado la temperatura adecuada y máxima para cerrarlo y para derretir el pegamento. No debe seguir calentándose una zona oscurecida.

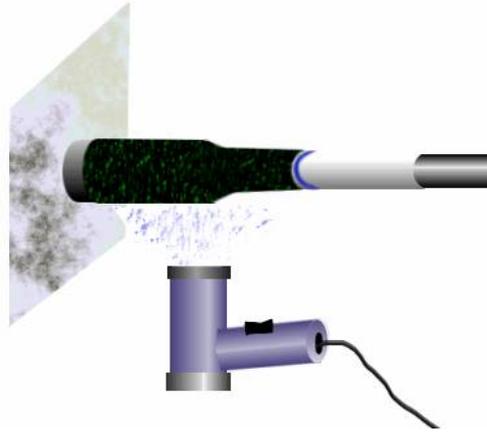


Figura 4.12: Representación del cambio de coloración de los pigmentos verdes que indican el correcto vulcanizado del termocontraíble<sup>1</sup>.

Para el ingreso del cable a la caja de empalme debe realizarse lo mismo, y en el caso haber dos cables en una misma entrada se utilizará un clip con pegamento para formar un 8 en el termo como se ve en la siguiente figura:<sup>[23]</sup>

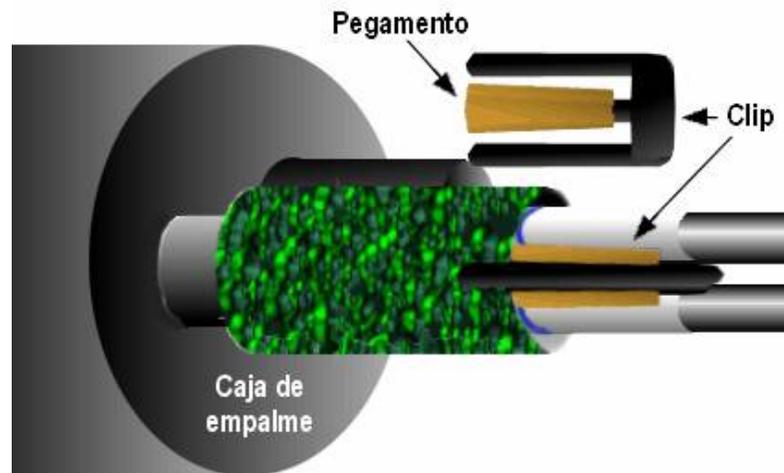


Figura 4.13: Sellado de la entrada a la caja de empalme<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Figura tomada de <http://www.yio.com.ar>

## 4.2 Conectores

En esta sección nos enfocaremos al empalme de fibras mediante un conector, así que para unir la fibra óptica con el transmisor y el receptor se utilizan conectores, que son, por definición, dispositivos desmontables utilizados cuando se necesitan conectar y desconectar fácilmente las fibras.

Los conectores para fibra óptica han sido tradicionalmente la mayor preocupación al usar sistemas basados en fibra óptica. Mientras que los conectores fueron una vez poco manejables y difíciles de usar, los fabricantes de conectores los han estandarizado y simplificado grandemente. Esta amigabilidad creciente con el usuario, ha contribuido al incremento de su uso en sistemas de fibra óptica, también ha tomado énfasis en su cuidado y manejo apropiado.<sup>[21]</sup>

En el mercado existen dos tipos de conectores: los metálicos y los de plástico, que a su vez se pueden dividir en conectores para fibras múltiples y para fibras únicas. Los conectores metálicos sirven para fibras de alta calidad, utilizadas en los sistemas de transmisión de un tráfico de información elevado, debiendo presentar muy bajas pérdidas. Los conectores de plástico requieren las mismas características de calidad, utilizándose en conectores de cubierta de plástico. Se usan con fibras de diámetro más elevado, con lo cual son más sencillos mecánicamente y, en consecuencia, más económicos.<sup>[4]</sup>

### 4.2.1 Partes de los conectores para fibra óptica

La interconexión fibra a fibra puede consistir en un empalme, una conexión permanente, o un conector, el cual difiere del empalme por su habilidad para ser desconectado y reconectado. Los tipos de conectores para fibra óptica son tan variados como las aplicaciones para las que fueron desarrollados. Los diferentes tipos de conectores tienen diferentes características, ventajas y desventajas, así como diferentes parámetros de desempeño, pero todos tienen los mismos cuatro componentes básicos.

*Férula:* La fibra es montada en un cilindro largo y fino, la férula, la cual actúa como un mecanismo de alineación de la fibra. La férula es perforada por el centro a un diámetro que es ligeramente más grande que el diámetro del revestimiento de la fibra. El extremo de la fibra está localizado al final de la férula. Las férulas están hechas típicamente de metal o cerámica, pero también pueden ser fabricadas de plástico.

*El cuerpo del conector:* También llamado cubierta del conector, este tiene como función sostener la férula. Está construido usualmente de metal o plástico e incluye una o más piezas montadas que sostienen la fibra en su lugar. Los detalles de estos montajes del cuerpo del conector varían de conector a conector, pero un relleno y/o prensado es comúnmente usado para unir los miembros rígidos y los forros del cable al cuerpo del conector. La férula se extiende más allá del cuerpo del conector para deslizarse dentro del dispositivo de acoplamiento.

*El cable:* El cable es unido al cuerpo del conector. Actúa como el punto de entrada para la fibra. Típicamente, una funda liberadora de tensión es añadida sobre la unión entre el cable y el cuerpo del conector, proporcionando firmeza adicional a la unión.

*El dispositivo de acoplamiento:* Muchos conectores para fibra óptica no usan configuraciones macho-hembra comunes a los conectores electrónicos. En cambio, un dispositivo de acoplamiento tal como una manga de alineamiento es usada para acoplar los conectores.<sup>[21]</sup>

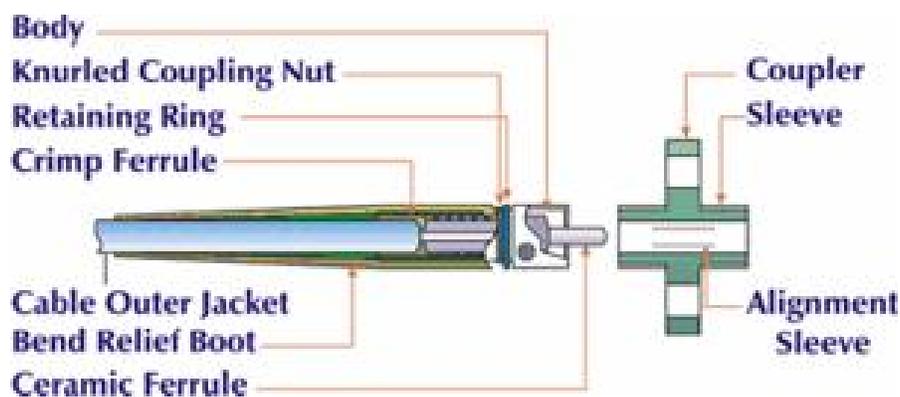


Figura 4.14: Partes de un conector óptico<sup>m</sup>.

<sup>m</sup> Figura tomada de <http://www.fiber-optics.info>

### 4.2.2 Parámetros de los conectores

Entre los parámetros que especifican a un conector tenemos:

- ✓ Pérdidas de inserción, **PI**
- ✓ Pérdidas de Retorno, **PR**: debido a la reflexión en el punto de empalme
- ✓ Estabilidad a la temperatura (-20 +70°C)
- ✓ Número de conexiones (mayor de 500): especifica el número de acoples que es capaz de realizar el conector manteniendo sus características según las especificaciones.
- ✓ Protección contra humedad y polvo
- ✓ Resistencia a altas tensiones
- ✓ Manejabilidad en obra
- ✓ Costo

*Pérdidas de inserción:* Es una medida de la atenuación de un dispositivo determinando la salida de un sistema antes y después de que el dispositivo es insertado en el sistema. Por ejemplo, un conector causa pérdida de inserción por la interconexión (comparado con un cable continuo sin interconexión). Un parámetro medioambiental importante a considerar es la temperatura de operación.<sup>[25]</sup>

Las pérdidas de inserción vienen dadas por:

$$P_i = 10 \log \frac{P_e}{P_s} (dB) \quad (4.1)$$

Donde:

$P_e$ : Potencia luminosa de entrada

$P_s$ : Potencia luminosa de salida

*Pérdidas de retorno o de reflexión:* Es la potencia reflejada desde la interfaz entre dos partes de un conector. Se expresa en dB, con rangos entre -15 y -60 dB. Este tipo de pérdidas se calculan con la siguiente ecuación:<sup>[26]</sup>

$$P_{ref} = 10 \log \frac{P_r}{P_e} (dB) \quad (4.2)$$

Donde:

$P_e$ : Potencia luminosa de entrada

$P_r$ : Potencia luminosa de reflejada

#### 4.2.3 Fuentes de pérdidas en los conectores

Los problemas que se encuentran con los empalmes también son aplicables a los conectores de fibra. Las terminales de las fibras deben quedar lo más cerca posible, sin que lleguen a dañarse, además el montaje de los conectores en la fibra requiere especial cuidado y precisión.

La fuente potencial de mayor atenuación que es la causada por los problemas de alineamiento entre las fibras, tanto longitudinal, como axial o angular. Pero no sólo los problemas geométricos nos van a afectar sino también desviaciones en parámetros ópticos como:

- ✓ Diferentes diámetros en el núcleo o la envoltura
- ✓ Distintas aperturas numéricas
- ✓ Distintos perfiles de índices de refracción
- ✓ Problemas en la fibra (no circularidad del núcleo, excentricidad del núcleo frente a la envoltura, etc.)

Por supuesto los mejores resultados al unir dos fibras los conseguiremos si éstas son idénticas y están bien hechas, si suponemos que esto es cierto y cada vez podemos asegurarlo

mejor (con fibras de las mismas características y el mismo fabricante) podríamos reducir la atenuación resultante a los problemas geométricos.

Las pérdidas de potencia óptica resultantes de los tres tipos de error de alineamiento dependen del tipo de fibra y en particular del diámetro del núcleo y de la distribución de potencia entre los modos permitidos. En la figura 4.15 pueden verse gráficamente los errores de alineamiento e igualmente puede apreciarse la atenuación que se tiene dependiendo de la fuente de pérdida.

Parece claro que relativamente pequeños errores en el alineamiento pueden causar atenuaciones significativas y esto será especialmente cierto cuando los núcleos de las fibras se vayan reduciendo. También por ello fibras de núcleos grandes  $>150\mu\text{m}$  van a resultar poco afectadas y por ello las fibras de plástico son tan simples de conectar. También podemos deducir que va a haber grandes diferencias entre la utilización de fibras monomodo y multimodo precisamente por las diferencias entre los tamaños de los núcleos.<sup>[8]</sup>

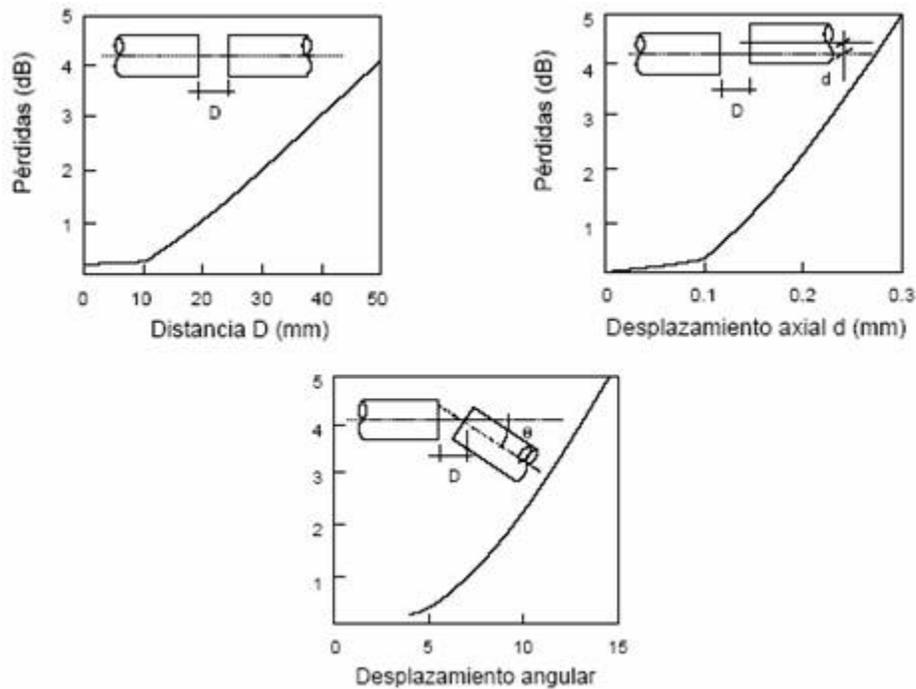


Figura 4.15: Fuentes de pérdidas en los conectores<sup>n</sup>.

<sup>n</sup> Figura tomada de <http://www.ate.uniovi>

#### 4.2.4 Tipos de pulido

El pulido influye decisivamente en las pérdidas por inserción y en las pérdidas de retorno. Tenemos tres tipos de pulido que son:

- ✓ Pulido plano
- ✓ Pulido PC, SPC y UPC
- ✓ Pulido APC

Donde el pulido PC y el APC se utilizan fundamentalmente para aplicaciones monomodo (figura 4.16).<sup>[27]</sup>

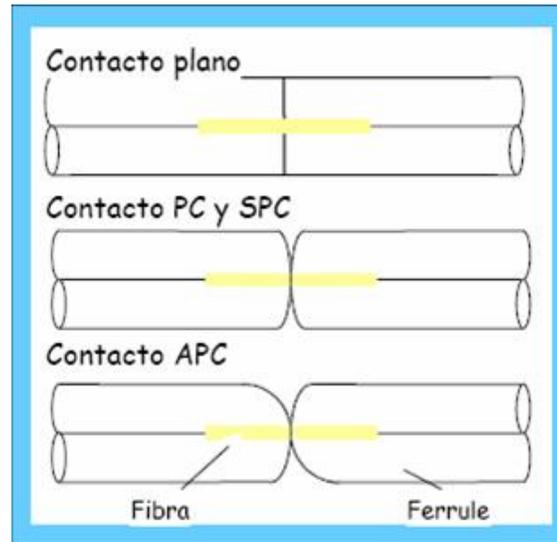


Figura 4.16: Tipos de pulido para conectores ópticos<sup>o</sup>.

##### 4.2.4.1 Conectores PC

Los conectores PC son aquellos que tienen contacto físico entre sus superficies.

*Plano de contacto:* Es el plano a través del cual se unen dos conectores. Las superficies en realidad son levemente convexas, y si todo está en regla el primer punto de apoyo entre conectores debe ser el núcleo de ambas fibras. La presión de contacto es de algunos kilos

<sup>o</sup> Figura tomada de <http://www.ate.uniovi>

(aproximadamente 10), por lo cual existe una pequeña deformación que hace que no solo exista un punto de contacto sino una superficie con radio superior al del núcleo de la fibra.

*Pérdida de retorno:* La pérdida de retorno en estos conectores llega en el mejor de los casos a - 50 dB. Estas reflexiones empeoran mucho si se forma un espacio de aire entre las superficies de contacto; la pérdida de retorno (reflexión) de la transición vidrio aire es de - 14 dB. Esto quiere decir que si un transmisor tiene una potencia de 17 dBm, y le conectamos un patchcord (conector-F.O.-conector) con un extremo libre, la potencia que regresará al transmisor será de 3 dBm la cual con el tiempo lo puede degradar. Con esto queremos dejar en claro que para optimizar un enlace óptico es muy importante la limpieza de los conectores para garantizar un correcto plano de contacto.

*Atenuación:* La atenuación de un conector PC, ronda los 0,2 a 0,5 dB, y también depende de la buena limpieza de los mismos.

#### **4.2.4.1 Conectores APC**

La sigla APC significa Angle – Physical Contact, osea, en ángulo con contacto físico.

*Plano de contacto:* El ángulo de contacto es de 8° con superficie levemente convexa.

*Pérdida de retorno:* La pérdida de retorno de estos conectores es mejor que - 60 dB.

Debemos aclarar que en los láseres más potentes, la potencia de salida ronda los 17 dBm, y potencias reflejadas elevadas pueden degradarlo con el tiempo al transmisor óptico.

*Atenuación:* La atenuación puede superar en algunas décimas al conector plano, aunque debido a la dispersión existente en conectores monoblock, hace que tengamos que hablar de valores promedio. Los conectores monoblock son aquellos en los que la férula está formada por un cilindro cerámico y la F.O. en el centro. Otro tipo de conectores llamados de férula compuesta, traen entre la F.O. y el cilindro cerámico un tercer cilindro metálico, que se utiliza para realizar un mejor centrado de la F.O.<sup>[28]</sup>

## 4.2.5 Clasificación de los conectores ópticos

### 4.2.5.1 Conector de férula o casquillo

En estos conectores la fibra óptica se coloca dentro de una férula (también llamada “casquillo”) protectora de precisión. En la unión de los conectores se deben alinear las férulas y cuidar que los extremos del conector estén pulidos. Las férulas pueden ser de forma cilíndrica o cónica. Un dispositivo de acoplamiento llamado “adaptador” es el que consigue el alineamiento de las dos fibras contenidas dentro de sus férulas. Se debe mantener la concentricidad entre la fibra y la férula, ya que de ello dependen las pérdidas en el conector.

Existe una gran variedad de estos conectores siendo los más representativos los siguientes:

- ✓ Conector de férula cilíndrica (FC) o casquillo
- ✓ Conector tipo SMA (SUBMINIATURA A)
- ✓ Conector tipo D4

*Conector de férula cilíndrica:* La fibra es depositada en una férula que en su interior contiene una capilaridad concéntrica, encargada del centrado y la fijación de la fibra. Al montar la fibra al conector, la fibra es preparada con resina epóxica en la cavidad de la férula para lograr su fijación adecuada. La férula es de cerámica por lo general cubierta de acero. Este tipo de conector (figura 4.17) de Fibra Óptica se usa para Monomodo o Multimodo con uso habitual en telefonía y CATV en formato Monomodo y Monomodo Angular.<sup>[29]</sup>



Figura 4.17: Conectores FC y adaptadores<sup>p</sup>.

*Conectores SMA:* El SMA (Subminiature Assembly) como se ve en la figura 4.18 es un viejo conector, surge a mediados de los 70. Tiene altas pérdidas, aproximadamente 0.9 dB. Hay en el mercado dos tipos de conectores SMA, el SMA 905 y el SMA 906. EL SNIA 905 tiene una férula recta. El SMA 906 tiene una férula en escalón. También se puede encontrar una versión de SINIA 905 con un collar en la férula que se puede quitar, necesario para convertirlo en un SMA 906. Actualmente está en desuso.

<sup>p</sup> Tomada de <http://www.ate.uniovi.es>



Figura 4.18: Conector óptico SMA<sup>q</sup>.

*Conector D4 (NEC):* Precursor del FC es de tipo roscado y tiene una férula de 2 mm. Su uso en telecomunicaciones va disminuyendo, pasó a férulas de 2.5mm . Este tipo de conector (figura 4.19) se usa principalmente para fibras monomodo.

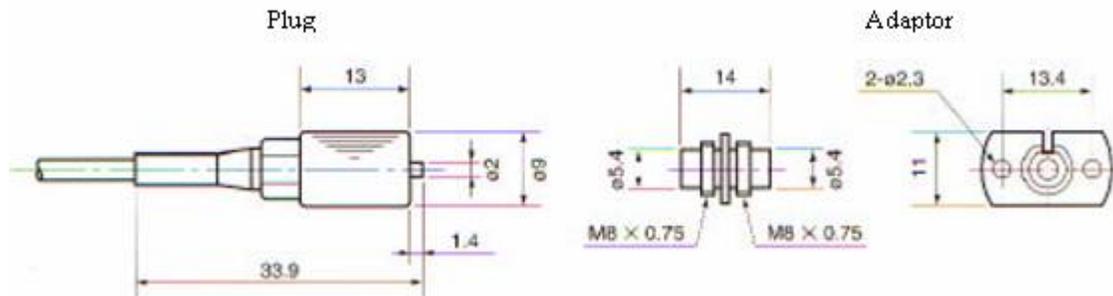
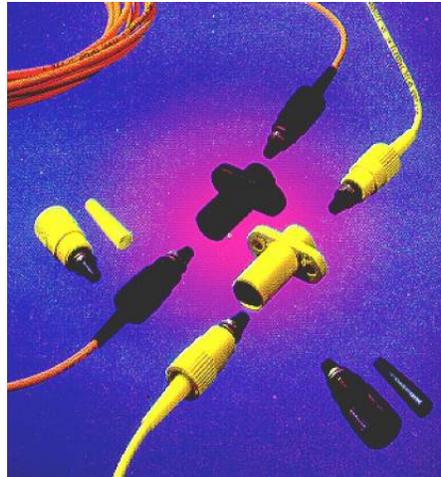


Figura 4.19: Conector D4<sup>q</sup>.

#### 4.2.5.2 Bicónico

Es un conector al viejo estilo como se ve en la figura 4.20. Se utilizó para fibras multimodo, aunque ahora es anticuado. Tiene una repetitividad pobre, es susceptible a las vibraciones y tiene altas pérdidas (sobre 1 dB).<sup>[30]</sup>

<sup>q</sup> Figura tomada de <http://www.ate.uniovi.es>



*Figura 4.20: Conector Bicónico<sup>†</sup>.*

#### 4.2.5.3 Conectores SC

Otro tipo de conector es el SC (Subscriber Conector), el cual también puede ser PC o APC como se aprecia en la figura 4.21. Estos son conectores con encastre del tipo bayoneta. Tiene bajas pérdidas (por debajo de 0,5 dB) y es bastante común en instalaciones monomodo. Tienen la posibilidad de conexiones dobles y múltiples, y tiende al pulido APC

Es más utilizado en Europa y EEUU, cuenta con un indicador de final de la instalación mediante un `click'. Posee un comportamiento óptico muy estable, se puede conectar y reconectar muchas veces.

---

<sup>†</sup> Figura tomada de <http://www.ate.uniovi.es>

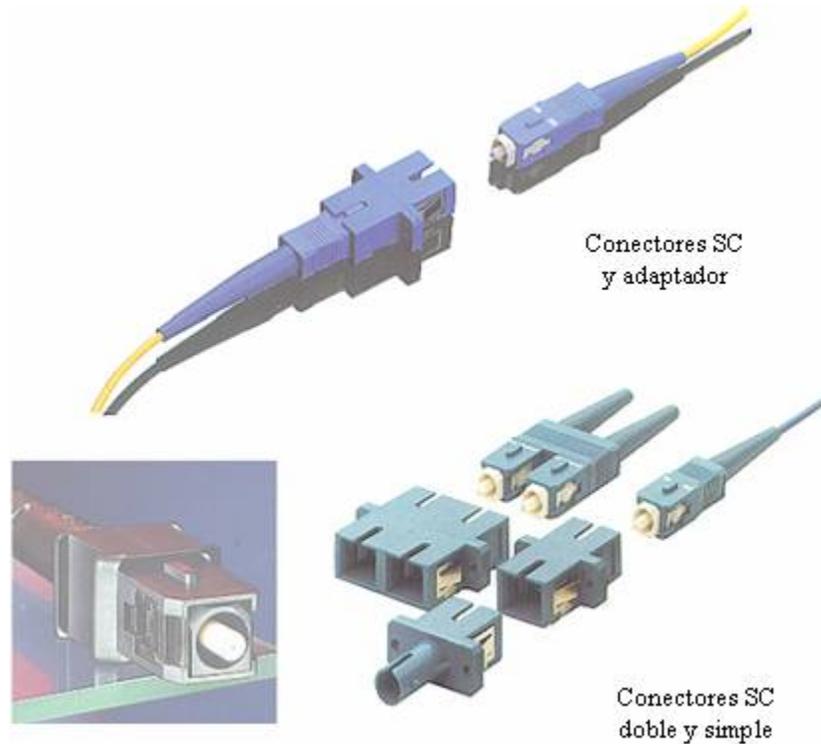


Figura 4.21: Conectores SC y adaptador<sup>s</sup>.

#### 4.2.5.4 Conectores LSH

Actualmente está apareciendo una nueva línea de conectores que se denomina LSH o Euro 2000 con férula PC o APC. Este conector (figura 4.22) no mejora las características de atenuación o pérdida de retorno, pero si la facilidad de operación.



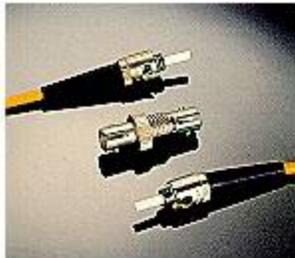
Figura 4.22: Conector LSH<sup>t</sup>. Tomada de [www.yio.com.ar](http://www.yio.com.ar)

<sup>s</sup> Figura tomada de <http://www.ate.uniovi.es>

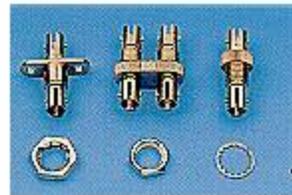
<sup>t</sup> Figura tomada de <http://www.yio.com.ar>

#### 4.2.5.5 Conector ST

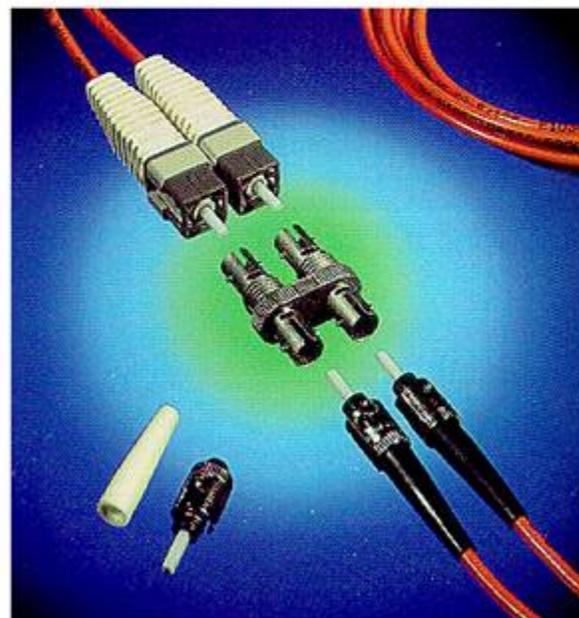
Un buen conector, popular para conexiones de fibra monomodo y multimodo, con unas pérdidas en promedio que rondan los 0.5 dB. Tiene una conexión con cierre en giro que no pierde en ambientes con vibraciones. Es un conector estándar para la mayoría del equipamiento RAL de fibras ópticas y es el más utilizado en aplicaciones multimodo (figura 4.23).<sup>[30]</sup>



Aspecto del conector y adaptador



Adaptadores ST



Conectores ST y ST push-pull

Figura 4.23: Conectores ST<sup>u</sup>.

<sup>u</sup> Figura tomada de <http://www.ate.uniovi.es>

#### 4.2.6 Instalación de conectores ópticos para fibra

El método para unir conectores ópticos a la fibra óptica varía de conector a conector; así que los siguientes pasos se dan como una referencia para la interconexión básica.

1.- Corte el cable una pulgada más largo que la longitud acabada requerida.

2.- De manera cuidadosa quite el forro externo de la fibra sin cortar los forros de la fibra. Corte los miembros rígidos expuestos, y remueva el revestimiento de la fibra. El revestimiento de la fibra puede ser removido de dos maneras: empapando la fibra por dos minutos en diluyente de pintura y posteriormente limpiando la fibra desnuda con una tela suave libre de pelusas, o desnudando cuidadosamente la fibra con un pelador de revestimiento de fibra. Debe asegurarse de utilizar peladores hechos específicamente para fibra en lugar de usarse peladores para alambre de metal, ya que puede dañar la fibra.

3.- Limpie completamente la fibra desnuda con alcohol isopropílico vertido en una tela suave, libre de pelusas. NUNCA limpie la fibra con un tejido seco. Nota: Sólo use alcohol isopropílico 99% puro de calidad industrial. El alcohol isopropílico disponible comercialmente es para uso medicinal y está diluido con agua y un aceite mineral más ligero. Debe ser usado exclusivamente el alcohol isopropílico de calidad industrial.

4.- El conector puede ser conectado aplicando resina epóxica o por presión (“ponchado”). Si se usa resina epóxica, se debe llenar el conector con bastante resina de manera que permita que una pequeña capa de resina se forme en la punta del conector. Después inserte la fibra desnuda y limpia en el conector. Vulcanice la resina según las instrucciones proporcionadas por el fabricante.

5.- Fije los miembros rígidos del cable al cuerpo del conector. Esto previene la tensión directa en la fibra. Deslice la parte final del conector a su posición final (donde es aplicable).

6.- Prepare la cara de la fibra para lograr una buena terminación óptica cortando y puliendo el final de la fibra. Antes de que la conexión sea hecha, el final de cada fibra debe tener

una terminación lisa (uniforme) que esté libre de defectos tales como irregularidades, bordes y fracturas. Estos defectos, así como otras impurezas y suciedad cambian los patrones de propagación geométrica de la luz y causan dispersión.

#### 4.2.6.1 Corte o ¿División?

El corte involucra cortar limpiamente el final de la fibra con el final de la férula. El corte, también llamado el método de marcado y fractura de la preparación de la cara final de la fibra, requiere de cierta habilidad para lograr resultados óptimos. Hecho apropiadamente, el corte produce un acabado perpendicular como espejo. Un corte incorrecto resultará en bordes e irregularidades tal como se ven en la figura 4.24. Mientras que la división puede ser manual, con una cuchilla, disponible de fabricantes tal como Fujikora, permitiendo un acabado más consistente y reduce la dificultad total.

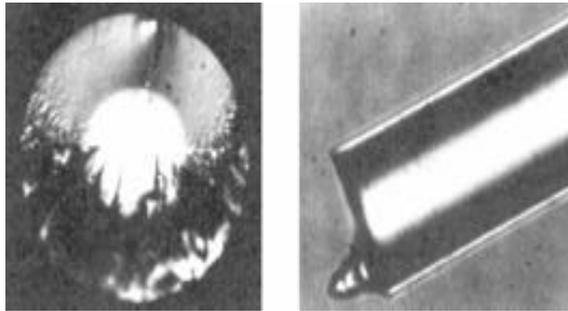


Figura 4.24: Defectos en la cara final de la fibra: hackle (izquierda), lip (derecha)<sup>v</sup>.

Los pasos listados abajo esbozan una manera para producir una división buena y coherente tal como se muestra en la figura 4.25.

- 1.- Ponga la cuchilla de la herramienta de división en la punta de la férula.
- 2.- Suavemente marque la fibra por la región del revestimiento en una dirección. Si el marcado no se hace ligeramente, la fibra puede romperse, haciendo necesario reacabar la fibra.

<sup>v</sup> Figura tomada de [www.fiber-optics.info](http://www.fiber-optics.info)

- 3.- Retire el exceso de la fibra cortada lejos de la férula.
- 4.- Cuidadosamente forre el trozo de la fibra con un pedazo de papel de oxido de aluminio de 12 micras.
- 5.- Haga el pulido final. (Ver figura 4.26)

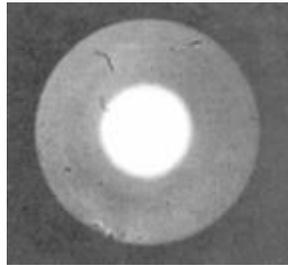


Figura 4.25: Fibra multimodo bien cortada<sup>w</sup>.

#### 4.2.6.2 Pulido

Después de que un corte limpio ha sido logrado, la cara final de la fibra se sujeta a un cepillo de pulido, y la fibra es frotada y pulida. El acabado apropiado es logrado al frotar el final de la fibra conectorizada contra un papel de pulido en un patrón en forma de 8, aproximadamente dieciséis veces.

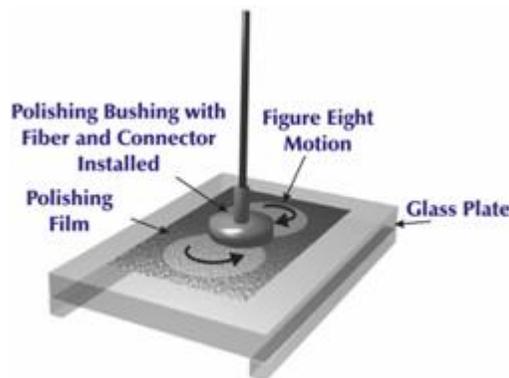


Figura 4.26: Técnica de pulido<sup>w</sup>.

Para aumentar la facilidad y repetitividad de la instalación del conector, algunas compañías ofrecen kits de conectores. Algunos kits son específicos para el tipo de conector que va a ser instalado mientras que otros proporcionan al usuario información y herramienta general para

<sup>w</sup> Figura tomada de [www.fiber-optics.info](http://www.fiber-optics.info)

conectar diferentes tipos de conectores. Algunos conectores requieren el uso de una manga de alineación, también llamada manga de interconexión. Esta manga sirve para incrementar la repetitividad de conexión a conexión.

#### **4.2.6.3 Cuidado y manejo de los conectores para fibra óptica**

Varias causas pueden dañar los conectores para fibra óptica. El final de un conector sin protección puede experimentar daños por impacto, partículas de polvo en el aire o exceso de humedad. La incrementada potencia de salida óptica de los láseres modernos también tiene el potencial para dañar un conector, un factor a menudo pasado por alto en las discusiones sobre el manejo y cuidado de las fibras ópticas y conectores. Muchos diseñadores tienden a pensar que los niveles de potencia en las fibras ópticas son relativamente insignificantes. Sin embargo, unos pocos miliwatts a 850nm dañarán permanentemente la retina. En estos días, los amplificadores ópticos pueden generar potencias ópticas de 1 W de más en una fibra monomodo. Esto llega a ser bastante importante cuando uno considera que la potencia óptica se confina en el núcleo óptico de sólo a unos pocos micrones de diámetro.

*Efectos sobre los conectores para fibra óptica:* Uno nunca debe limpiar un conector óptico unido a una fibra cuando esté transportando luz en se momento. Niveles de potencia óptica tan pequeños como +15dBm, o 32mW, pueden causar una ignición explosiva del material de limpieza cuando éste se toque con el final del conector óptico, destruyendo el conector. Los materiales típicos de limpieza, tal como tejidos saturados de alcohol, harán combustión casi instantáneamente al ser expuestos a niveles de potencia óptica de +15 dBm o más. Las micro explosiones en la punta del conector pueden originar huecos en el final del conector, así como grietas en su superficie, destruyendo su capacidad para transportar luz con pérdidas bajas. La figura 4.27 muestra un conector óptico que ha sido severamente dañado por altos niveles de potencia óptica.

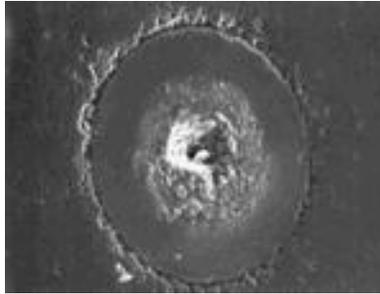


Figura 4.27: Conector dañado por una alta potencia óptica<sup>x</sup>.

*Limpieza:* Otro punto importante para recordar en el manejo de los conectores para fibra óptica es que **la cara final de la fibra y la férula deben estar absolutamente limpias antes de insertarse en el transmisor o receptor**. Polvo, pelusa, aceite u otras partículas externas oscurecen la cara final, comprometiendo la integridad de la señal óptica siendo enviada sobre la fibra. Desde el punto de vista de la señal óptica, las conexiones sucias son como ventanas sucias. Así que, menos luz consigue atravesar una ventana sucia que una que está limpia.

Es difícil concebir el tamaño del núcleo de un conector óptico para fibra. Las fibras monomodo tienen núcleos de sólo 8-9 $\mu\text{m}$  de diámetro. Como punto de referencia, un cabello humano típico es de 50-57 $\mu\text{m}$  de diámetro, aproximadamente 6-9 veces más grande! Las partículas de polvo pueden ser 20 $\mu\text{m}$  o más grandes de diámetro. Las partículas de polvo más pequeñas que 1 $\mu\text{m}$  pueden estar suspendidas casi indefinidamente en el aire. Una partícula de polvo de 1 $\mu\text{m}$  que aterrice en el núcleo de una fibra monomodo puede causar hasta 1dB de pérdida. Las partículas más grandes (9 $\mu\text{m}$  o más grandes) pueden oscurecer completamente el núcleo de una fibra monomodo. Los conectores ópticos para fibra necesitan ser limpiados cada vez que son acoplados o desacoplados, es esencial que los usuarios de fibra óptica desarrollen la disciplina necesaria para limpiar siempre los conectores antes de que sean acoplados.

También es importante tapar el conector óptico cuando éste no se está usando. El final del conector sin protección se daña más frecuentemente por impacto, por ejemplo un golpe en el piso. Muchos productores de conectores proporcionan alguna clase de casquillo o funda de protección. Los mejores protectores cubren por completo el final del conector, son generalmente

---

<sup>x</sup> Figura tomada de [www.fiber-optics.info](http://www.fiber-optics.info)

simples tubos de plástico con una terminación cerrada que encaja fácilmente sobre la férula solamente. Estas fundas protegerán el final de la férula pulida del conector de daños por impacto que pueden agrietar o astillar la superficie pulida. Muchos de los tubos de plástico adecuados herméticamente, contienen contaminación como jalea (más probablemente soltada del molde) que se adhiere a los lados de la férula. Una explosión de aire para desempolvar o una rápida mojada en alcohol no removerá estos residuos. Este residuo como jalea puede combinarse con la mugre común, para formar una suciedad pegajosa que causa que la férula del conector se adhiera en el adaptador de acoplamiento. A menudo, la férula atorada se romperá tan pronto como se remueva.

*Técnica de limpieza:*

Para limpiar los conectores se hace requieren elementos básicos como son: un paño libre de pelusa o tejidos desprendibles, alcohol isopropílico, y aire comprimido. El procedimiento a común para llevar acabo esta labor es el siguiente:

1. Doble el tejido dos veces para que tenga cuatro capas.
2. Sature el tejido con alcohol
3. Primero limpie los lados de la férula del conector. Coloque la férula del conector en el tejido, y ejerza presión a los lados de la férula. Rote la férula varias veces para remover toda la contaminación de los lados de la férula.
4. Ahora cambie a una parte limpia del tejido. Asegúrese que aún está saturada de alcohol y que tiene los mismos dobleces (4 capas). Ponga el tejido contra el final de la férula del conector. Ponga su uña contra el tejido para que esté encima directamente de la férula. Ahora raspe el final del conector hasta que rechine. Sonará como un vaso de cristal que ha sido frotado cuando está mojado.

5. Use el microscopio para verificar la calidad de la limpieza. Si no está completamente limpio, repita los pasos con un tejido limpio. Repita hasta que tenga una técnica de limpieza que rinda buenos resultados.
6. Acople el conector inmediatamente. No permita que el conector quede expuesto y recoja polvo antes de acoplarlo.
7. El aire se puede usar para remover pelusa o polvo del puerto de un transmisor o receptor a ser acoplado con el conector. Nunca introduzca cualquier líquido en los puertos.

*Manipulación:* La utilización de conectores va relacionada con algunas recomendaciones:

1. Nunca toque la cara final de la fibra del conector
2. Los conectores mientras no están en uso deben ser cubiertos sobre la férula por una cubierta plástica. Es importante notar que dentro de las cubiertas para férula un residuo pegajoso está presente. Este residuo permanecerá en el final de la férula después de que la cubierta es removida.
3. El uso de un gel que iguale el índice, una sustancia gelatinosa que tiene un índice de refracción semejante a aquel de la fibra óptica, es un punto de disputa entre los fabricantes de conectores. La glicerina, disponible en cualquier tienda de medicamentos, es un gel igualador de índice efectivo de bajo costo. Usando glicerina reducirá la pérdida del conector y la backreflection, dramáticamente. Sin embargo, el gel igualador del índice puede recoger polvo o abrasivos que pueden dañar las caras finales de la fibra. También puede gotear con el tiempo, causando el incremento backreflections.<sup>[21]</sup>

## CAPÍTULO 5

# SISTEMAS DE TRANSMISIÓN

### 5.1 Asynchronous Transfer Mode (ATM)

El ATM es una tecnología que tiene su historia en el desarrollo de la banda ancha ISDN (Broadband ISDN o B-ISDN), en los 70's y 80's. Técnicamente, puede ser visto como una evolución de la conmutación de paquetes. Como la conmutación de paquetes para datos (Por ejemplo, X.25, frame relay, transmisión control protocol [TCP]/Internet protocol [IP]), ATM integra las funciones de conmutación y multiplexación, es muy conveniente para tráfico intermitente (en contraste a la conmutación de circuitos), y permite comunicaciones entre dispositivos que operan a diferentes velocidades. A diferencia de la conmutación de paquetes, ATM está diseñado para el trabajo en red de multimedia de alto desempeño. La tecnología ATM ha sido implementada en un rango muy amplio de dispositivos de red:

- Tarjetas de interfase para PC, estaciones de trabajo y servidor de red.
- Hubs de Ethernet conmutada y grupos de trabajo token-ring.
- Switches ATM de campus y grupos de trabajo.
- Multiplexores ATM

ATM es una capacidad que puede ser ofrecida como un servicio de usuario final por los proveedores de servicio (como una base para servicios tarifarios) o como una infraestructura de red para éstos y otros servicios. El bloque constitutivo de servicio mas básico es el circuito virtual ATM, el cual tiene una conexión de fin a fin que tiene puntos finales y rutas definidas pero que no tiene ancho de banda dedicado a él. El ancho de banda es colocado por demanda por la red así como por usuarios que tienen tráfico para transmitir. ATM también define varias clases de servicio para alcanzar un amplio rango de necesidades de aplicación.

ATM es también un conjunto de interfaces internacionales y estándares de señalización definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) y el Sector de Estándares de Telecomunicaciones. El foro ATM ha jugado el rol de pivote en el mercado ATM desde su formulación en 1991. El foro ATM es una organización internacional voluntaria compuesta por fabricantes, proveedores de servicios, organizaciones de investigación, y usuarios. Su propósito es el acelerar el uso de productos y servicios ATM a través de la rápida convergencia de especificaciones de interoperabilidad, promoción de cooperación de la industria y otras actividades.

### **5.1.1 Tecnología ATM**

En las redes ATM, toda la información es formateada dentro de celdas de longitud fija consistentes de 48 bytes (8 bits por byte) de carga y 5 bytes de celda de cabecera. El tamaño de celda fija asegura que información crítica respecto al tiempo como voz o video no sea afectada adversamente por paquetes o tramas de larga longitud de datos. La cabecera es organizada para la conmutación eficiente en implementaciones de hardware de alta velocidad y lleva información del tipo de carga, identificadores de circuito virtual y chequeo de error de cabecera.

ATM está orientado a conexión. Organizando diferentes corrientes de tráfico en llamadas separadas permite al usuario el especificar las fuentes requeridas y permite a la red colocar las fuentes basadas en esas necesidades. Multiplexado múltiples corrientes de tráfico en cada instalación física (entre el usuario final y la red o entre switches de red) -combinado con la habilidad de enviar corrientes a muchas destinaciones diferentes- habilita los ahorros de costos a través de la reducción en el número de interfaces e instalaciones requeridas para construir una red.

Los estándares ATM definieron dos tipos de conexiones: virtual path connections (VCP's), los cuales contienen virtual channel connections (VCC's). Una conexión de canal virtual (VCC o circuito virtual) es la unidad básica, la cual acarrea una corriente sencilla de celdas, en orden, de usuario a usuario. Una colección de circuitos virtuales puede ser empacada junta en una conexión de ruta virtual (VCP). Una ruta de conexión virtual puede ser creada de fin

a fin en una red ATM. En este caso, la red ATM no enruta celdas correspondientes a un circuito virtual particular. Todas las celdas pertenecientes a una ruta virtual particular son enrutadas en la misma forma a través de la red ATM, esto da como resultado la recuperación más rápida en el caso de fallas mayores.

Una red ATM también usa las rutas virtuales internamente para el propósito de empaquetar circuitos virtuales juntos entre switches. Dos switches ATM pueden tener muchas conexiones de canales virtuales diferentes entre ellos, pertenecientes a diferentes usuarios. Estos pueden ser empaquetados por los dos switches ATM en una conexión de ruta virtual.

Los circuitos virtuales pueden ser configurados estáticamente como circuitos virtuales permanentes (PVC's) o dinámicamente controlados por señalización como circuitos virtuales conmutados (SVC's). Ellos pueden ser también punto a punto o punto a multipunto, y de esta manera proveen un conjunto rico de capacidades de servicio. Los SVC's son el modo preferido de operación porque pueden ser dinámicamente establecidos, y de esta manera minimizando la complejidad de reconfiguración.

## **5.2 Introducción a SONET**

La red síncrona óptica (SONET) es un estándar para el transporte óptico de telecomunicaciones. Fue formulado por la ECSA para la ANSI, la cual establece estándares para la industria de telecomunicaciones en los Estados Unidos y otras industrias. Del estándar SONET/Jerarquía Digital Síncrona (SDH) se espera que provea la infraestructura de transporte para las telecomunicaciones mundiales por al menos las próximas dos o tres décadas.

La incrementada flexibilidad de configuración y disponibilidad de ancho de banda de SONET provee ventajas significantes sobre el viejo sistema de telecomunicaciones.

Estas ventajas incluyen lo siguiente:

- Reducción en los requerimientos de equipo y un incremento en la fiabilidad de la red.
- Provisión de bytes de cabecera y carga “los bytes de cabecera permiten el manejo de los bytes de la carga en una base individual y facilita la seccionalización centralizada de fallas”.
- Definición de un formato de multiplexado síncrono para el transporte de señales digitales de nivel más bajo (tal como una DS-1, DS-3) y una estructura síncrona que simplifica grandemente la interfaz con switches digitales, switches digitales de conexión cruzada y multiplexores add/drop.
- Disponibilidad de un conjunto de estándares genéricos para permitir productos de diferentes fabricantes ser conectados.
- Definición de una arquitectura flexible capaz de acomodar aplicaciones futuras, con una variedad de velocidades de transmisión.

En pocas palabras, SONET define niveles de portadores ópticos (OC) y señales de transportes síncronas (STS's) equivalentes eléctricamente para la jerarquía de transmisión basada en fibra óptica.

### **5.2.1 Sincronización de señales digitales**

Para entender los conceptos y detalles de SONET correctamente, es importante entender claramente el significado de síncrono, asíncrono y plesiócrono.

En un conjunto de señales síncronas, las transiciones digitales en las señales ocurren a exactamente la misma velocidad. Puede, sin embargo, haber una diferencia de fase entre las transiciones de las señales, y esto puede ocurrir dentro de límites específicos. Estas diferencias de fase pueden ser ocasionadas por retrasos en los tiempos de propagación o perturbaciones introducidas dentro de la red de transmisión. En una red síncrona, todos los relojes son ajustados a un reloj primario de referencia (PRC). La exactitud del PRC es muy buena y se deriva de un estándar atómico de Cesio.

Si dos señales digitales son plesiócronas, sus transiciones ocurren a casi la misma velocidad, con alguna variación siendo forzada dentro de límites muy apretados. Por ejemplo, si dos redes deben interconectarse, sus relojes pueden ser derivados de dos PRCs distintos. A pesar de esto, estos relojes son extremadamente exactos, hay una diferencia entre un reloj y otro. Esto es conocido como una diferencia plesiócrona.

En el caso de señales asíncronas, las transiciones de las señales no necesariamente ocurren a la misma velocidad nominal. Asíncrono, en éste caso, significa que la diferencia entre dos relojes es mucho mas grande que una diferencia plesiócrona. Por ejemplo, si dos relojes son derivados de osciladores de cuarzo libres, ellos pueden ser descritos como asíncronos.

### **5.2.2 Señal básica SONET**

SONET define una tecnología para transportar muchas señales de diferentes capacidades a través de una jerarquía óptica síncrona flexible. Esto es conseguido con un esquema de multiplexado de intercalado de bytes. El intercalado de bytes simplifica el multiplexado y ofrece manejo de la red de extremo a extremo.

El primer paso del proceso de multiplexado en SONET envuelve la generación del nivel mas bajo o la señal base. En SONET, la señal básica es conocida como señal síncrona de transporte – nivel 1, o simplemente STS – 1, la cual opera a 51.84Mbps. Señales de nivel más alto son múltiplos enteros de la STS – 1, creando la familia de señales STS – N en la Tabla 5.1. Una señal STS – N está compuesta por las señales de intercalado de bytes STS – 1. Esta tabla también incluye el homólogo óptico para cada señal STS – N, designado al nivel de portadora óptica N (OC – N). Velocidades de línea síncronas y asíncronas y las relaciones entre cada una son mostradas en las Tablas 5.1 Y 5.2.

Señal	Bit Rate (Mbps)	Capacidad
STS – 1, OC – 1	51.840	28 DS – 1s o 1 DS – 3
STS – 3, OC – 3	155.520	84 DS – 1s o 3 DS – 3s
STS – 12, OC – 12	622.080	336 DS – 1s o 12 DS – 3s
STS – 48, OC – 48	2488.320	1344 DS – 1s o 48 DS – 3s
STS – 192, OC – 192	9953.280	5376 DS – 1s o 192 DS – 3s
Nota: STS = señal síncrona de transporte. OC = portadora óptica		

Tabla 5.1: Jerarquía SONET<sup>a</sup>.

Señal	Bit Rate (Mbps)	Canales
DS – 0	0.640	1 DS – 0
DS – 1	1.544	24 DS – 0s
DS – 2	6.312	96 DS – 0s
DS – 3	44.736	28 DS – 1s

Tabla 5.2: Jerarquía No síncrona<sup>a</sup>.

### 5.2.3 Síncrono VS Asíncrono

Tradicionalmente, los sistemas de transmisión han sido asíncronos, con cada terminal en la red corriendo con su propio reloj. En la transmisión digital, el cronometrado es una de las consideraciones más importantes. El cronometrado quiere decir usar una serie de pulsos repetitivos para conservar la velocidad de bits constante y para indicar donde los unos y los ceros se localizan en una corriente de datos.

A causa de que estos relojes son totalmente libres en su corrimiento y no sincronizados, grandes variaciones ocurren en la velocidad del reloj y debido a esto la velocidad de bit de la señal. Por ejemplo, una señal DS – 3 especificada a 44.736Mbps + 20 partes por millón (ppm) puede producir una variación de hasta 1789 bps entre una señal entrante DS – 3 y otra.

<sup>a</sup> Tabla tomada de <http://www.ice.org>

El multiplexado asíncrono usa etapas múltiples. Señales tales como DS -1s asíncronas son multiplexadas y bits extras son añadidos (relleno con bits) para informar de las variaciones de cada corriente individual y combinados con otros bits (bits de trama) para formar una corriente DS - 2. El relleno con bits es utilizado otra vez para multiplexar a DS - 3. Las DS - 3s son multiplexadas a niveles más altos de la misma manera. A la velocidad asíncrona más alta, no puede ser accesada sin demultiplexar.

En un sistema síncrono como SONET, la frecuencia promedio de todos los relojes en el sistema será la misma (síncronos) o cercanamente la misma (plesiócronicos). Cada reloj puede ser ajustado con una fuente de referencia altamente estable. Es por esto que, la STS - 1 permanece a velocidad nominal de 51.84Mbps, permitiendo a muchas señales síncronas STS - 1 ser apiladas juntas cuando son multiplexadas sin nada de relleno con bits. Y por esto las STS - 1 son fácilmente accesadas a una velocidad STS - N más alta.

Señales tributarias virtuales (VT) síncronas de baja velocidad, son también simples de intercalar y transportar a altas velocidades. A bajas velocidades, las DS - 1s son transportadas por señales VT - 1.5 síncronas a una velocidad constante de 1.728Mbps. El multiplexado de un solo paso hasta STS - 1 no requiere del relleno de bits, y las VTs son fácilmente accesadas.

Los punteros acomodan las diferencias en las frecuencias y desvíos de fase de la fuente de referencia y previenen diferencias de frecuencia durante fallas de sincronización.

### **5.2.3.1 Jerarquía síncrona**

Los switches digitales y sistemas digitales de conexión cruzada son comúnmente empleados en la red jerárquica síncrona digital. La red es organizada con una relación maestro - esclavo con relojes de los niveles más altos alimentando señales de tiempo a los relojes de los nodos de más bajo nivel. Todos los nodos pueden ser ajustados a una fuente de referencia primaria, un reloj atómico de Estrato 1 con extremadamente alta estabilidad y precisión. Relojes menos estables son adecuados para soportar a los nodos más bajos.

### **5.2.3.2 Sincronizando SONET**

El reloj interno de una terminal SONET puede derivar su señal de cronometraje de una fuente de construcción integrada de cronometraje (BITS o building integrated timing supply) usada por los sistemas de conmutación y otros equipos. Y así, esta terminal servirá como maestro a otros nodos SONET, proveyendo cronometraje a su señal OC - n de salida. Otros nodos SONET operarán en modo de esclavo llamado circuito de cronometraje con sus relojes internos cronometrados por la señal OC - N de llegada. Los estándares actuales especifican que una red SONET debe de poder derivar su cronometraje de un reloj de Estrato 3 o más alto.

### **5.2.4 Formato de estructura de trama**

SONET usa una velocidad de transmisión básica de STS - 1 que es equivalente a 51.84Mbps. Señales de nivel mas alto son múltiplos enteros de la velocidad base. Por ejemplo, STS - 3 es 3 veces la velocidad de STS -1 ( $3 \times 51.84 = 155.52\text{Mbps}$ ). Una velocidad STS - 12 sería  $12 \times 51.84 = 622.08\text{Mbps}$ .

#### **5.2.4.1 Bloque constitutivo STS - 1**

El formato de trama de la señal STS - 1 es mostrado en la figura 5.1. En general, la trama puede ser dividida en dos áreas principales: cabecera de transporte y el contenedor síncrono de carga (SPE).

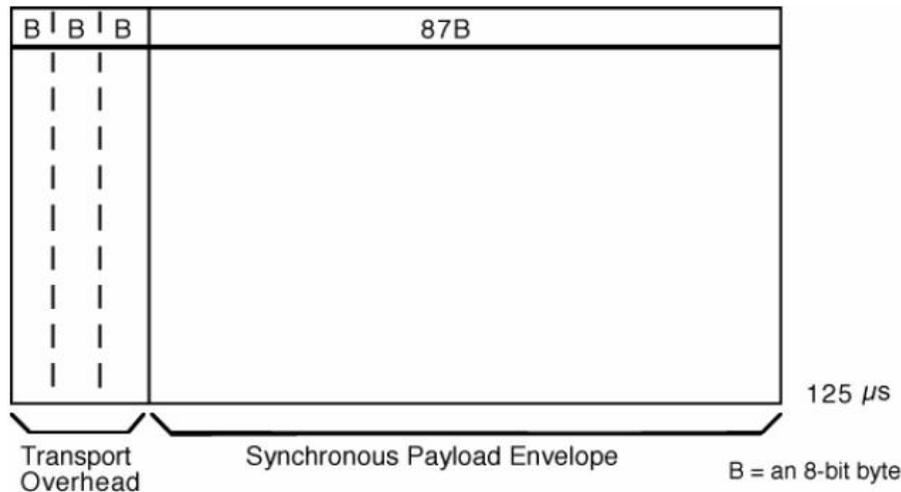


Figura 5.1: Formato de trama de la señal STS – 1<sup>b</sup>.

El contenedor síncrono de carga puede ser también dividido en dos partes: la cabecera de ruta de la STS (POH) y la carga. La carga es la productora tráfico siendo transportada y encaminada sobre la red SONET.

Una vez que la carga es multiplexada en el contenedor síncrono de carga, ésta puede ser transportada y conmutada a través de SONET sin tener que ser examinada y posiblemente demultiplexada en puntos intermedios. Por esto, SONET es conocida por ser independiente de servicio o transparente.

La cabecera de transporte está compuesta de la sección de cabecera y la cabecera de línea. La POH de la STS – 1 es parte del contenedor síncrono de carga.

La carga de la STS – 1 tiene la capacidad de transportar lo siguiente:

- 28 DS – 1s.
- 1 DS – 3.
- 21 señales de 2.048Mbps.
- Combinaciones de cada una.

<sup>b</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

### 5.2.4.2 Estructura de trama STS – 1

La STS – 1 es una secuencia específica de 810 bytes (6480 bits), la cual incluye varios bytes de cabecera y una capacidad de contenedor para transportar carga. Puede ser descrita como una estructura de 90 columnas y 9 filas. Con una longitud de trama de 125 $\mu$ s (8000 tramas por segundo), la STS – 1 tiene una velocidad de bits de 51.840Mbps. El orden de transmisión de bytes es fila por fila de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha (el bit mas significativo primero).

Como se mostró en la figura 5.1, las primeras tres columnas de la trama STS – 1 son para la cabecera de transporte. Las tres columnas contienen 9 bytes. De estos, 9 bytes son cabecera para la capa de sección (por ejemplo, cada cabecera de sección), y 18 bytes son cabecera para la capa de línea (por ejemplo, cabecera de línea). Las 87 columnas restantes constituyen la capacidad del contenedor de la STS – 1 (carga y POH).

Como se dijo anteriormente, la señal básica de SONET es la STS – 1. El formato de trama de la STS está compuesta de 9 filas de 90 columnas de 8bit – bytes, u 810bytes. El orden de transmisión de bytes es fila por fila, izquierda a derecha. A una velocidad de 8000 tramas por segundo, que trabajan a una velocidad de 51.840Mbps, tal como la siguiente ecuación lo demuestra:

$$(9) \times (90\text{bytes/frame}) \times (8\text{bits/byte}) \times (8000\text{frames/s}) = 51840000\text{bps} = 51.840\text{Mbps}$$

Esto es conocida como la velocidad de la señal STS – 1, la velocidad eléctrica usada primordialmente para transporte dentro de una pieza específica de hardware. El equivalente óptico de la STS – 1 es conocido como OC – 1, y es usada para transmisión a través de la fibra.

La trama STS – 1 se compone de cabecera, más un contenedor síncrono de carga SPE (vea la figura 5.2). Las primeras tres columnas completan la cabecera de transporte, y las ultimas 87 comunas completan los SPE, éstos pueden tener alguna alineación dentro de la trama, y esta alineación es indicada por los bytes de puntero H1 y H2 en la cabecera de línea.

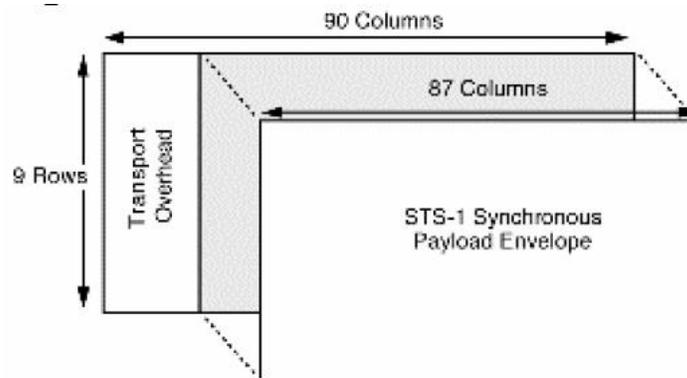


Figura 5.2: Estructura de la trama STS – 1<sup>c</sup>.

#### 5.2.4.3 Capacidad del contenedor STS -1 y contenedor síncrono de carga (SPE)

El STS – 1 SPE ocupa la capacidad del contenedor STS -1. El STS – 1 SPE consiste de 783 bytes, y pueden ser descritos como una estructura de 87 columnas por 9 filas. La columna 1 contiene 9 bytes, designados como la POH de la STS. Dos columnas (30 y 59) no son usadas para carga pero son asignadas como las columnas de relleno fijas. Los 756 bytes en las 84 columnas restantes son designados como capacidad de carga de la STS – 1.

#### 5.2.4.4 STS – 1 SPE en el interior de tramas STS -1

El STS – 1 SPE puede comenzar donde sea en el contenedor de carga de la STS – 1 (vea la figura 5.3). Típicamente, este comienza en una trama STS – 1 y termina en la siguiente. El puntero de carga de la STS contenido en la cabecera de transporte designa la locación del byte donde el STS – 1 SPE empieza.

El STS POH es asociado con cada carga y es usado para comunicar información variada desde el punto donde una carga es mapeada dentro del STS – 1 SPE a donde ésta es entregada.

<sup>c</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

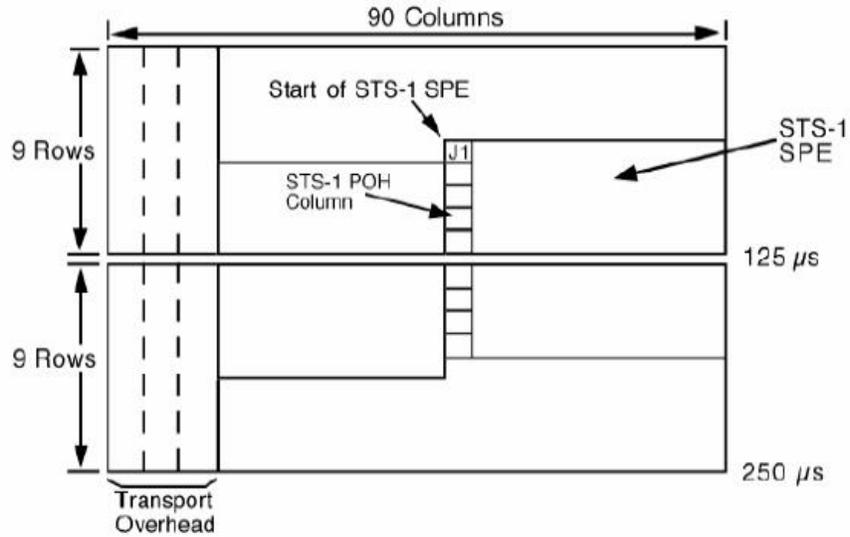


Figura 5.3: STS – 1 SPE en el interior de tramas STS -1<sup>d</sup>.

### 5.2.4.5 Estructura de trama STS – N

Una STS –N es una secuencia específica de N X 810 bytes. La STS – N es formada por intercalado de bytes de módulos STS – 1 (vea la figura 5.4). La cabecera de Transporte de módulos individuales STS – 1 es alineado a la trama antes del intercalado, pero los STS SPEs asociados no son requeridos para ser alineados porque cada STS – 1 tiene un puntero de carga para indicar la ubicación del SPE (o para indicar concatenación).

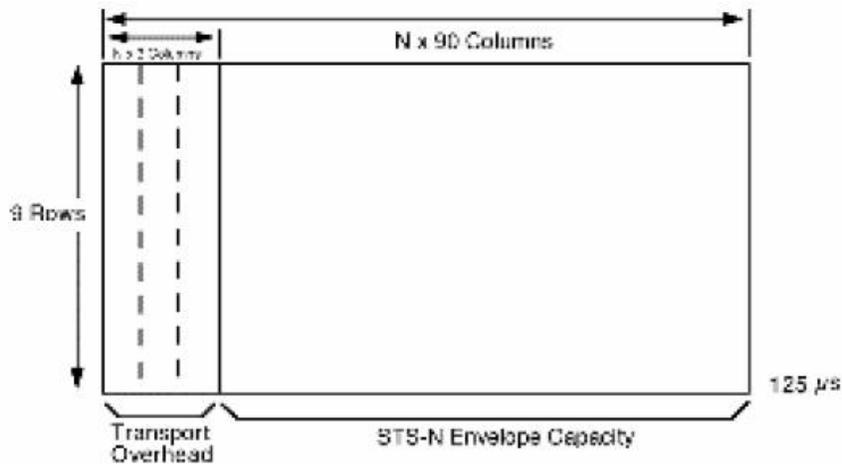


Figura 5.4: Estructura de Trama STS – N. Tomada de [www.ice.org](http://www.ice.org)

<sup>d</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

### 5.2.5 Multiplexado SONET

Los principios de multiplexado de SONET son los siguientes:

- Mapeo: Usado cuando las tributarias son adaptadas dentro de VTs al añadirles bits de justificación e información POH.
- Alineación: Toma lugar cuando un puntero es incluido en la ruta de la STS o VT POH, para permitir al primer byte de la VT ser localizado.
- Multiplexado: Usado cuando múltiples señales de bajo orden de la capa de ruta con adaptadas dentro de una señal de ruta de orden más alto, o cuando las señales de ruta de alto orden son adaptadas dentro de la cabecera de línea.
- Relleno (Stuffing): SONET tiene la habilidad de manejar varias velocidades de tributaria de entrada de señales asíncronas; como las señales tributarias son multiplexadas y alineadas, algo de capacidad de reserva ha sido designada dentro de la trama SONET para proveer suficiente espacio para todas estas distintas velocidades de tributarias; por tanto, en ciertos puntos en la jerarquía de multiplexado, este espacio es llenado con bits de relleno fijo (fixed stuffing bits) que no portan información pero son necesarios para llenar la trama particular.

Uno de los beneficios de SONET es que ésta puede llevar cargas grandes (encima de 50Mbps). De cualquier forma, las señales existentes de jerarquía digital pueden ser acomodadas también, y de esta forma protegiendo la inversión en equipo actual. Para lograr esta capacidad, los STS SPE pueden ser subdivididos en componentes más pequeños o estructuras, conocidas como VTs, para el propósito de transportar y conmutar cargas más pequeñas que la velocidad STS – 1. Todos los servicios por debajo de la velocidad DS – 3 son transportados en la estructura VT.

La figura 5.5 ilustra la estructura básica de multiplexado SONET. Algunos tipos de servicio, desde voz hasta datos de alta velocidad y video, pueden ser aceptados por varios tipos de adaptadores de servicio. Un adaptador de servicio mapea la señal dentro del contenedor de

carga de la STS – 1 o VT. Nuevos servicios y señales pueden ser transportados por adición de nuevos adaptadores de servicio en el borde de la red SONET.

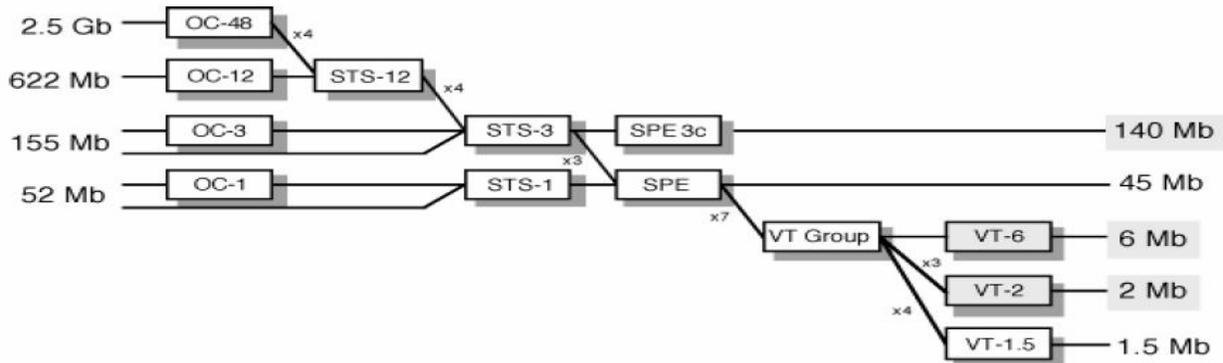


Figura 5.5: Estructura básica de Multiplexado SONET<sup>e</sup>.

A excepción de señales concatenadas, todas las entradas son eventualmente convertidas a un formato base de una señal síncrona STS – 1 (51.84Mbps o más alta). Entradas de velocidades más bajas tal como DS – 1s son primero multiplexadas por bit o byte dentro de VTs. Muchas STS – 1s síncronas son después multiplexadas juntas ya sea en un proceso de una sola etapa o dos para formar una señal STS – N ( $N \geq 1$ ).

El multiplexado de STS es realizado en el multiplexor síncrono de intercalado de bytes. Básicamente, los bytes son intercalados juntos en un formato de tal forma que las señales de baja velocidad son visibles. No ocurre un procesamiento adicional de la señal a excepción de una conversión directa de eléctrico a óptico para formar una señal OC – N.

## 5.2.6 Elementos de red SONET

### 5.2.6.1 Multiplexor terminal

El elemento terminal de red (PTE), un multiplexor terminal terminador de ruta de nivel de entrada, actúa como un concentrador de DS – 1s así como también de otras señales tributarias. Su implementación más simple involucraría dos multiplexores terminales conectados por fibra con o

<sup>e</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

sin un regenerador en el enlace. Esta implementación representa el enlace mas simple SONET (una sección, línea, una ruta de enlace todo en uno; vea la figura 5.6).

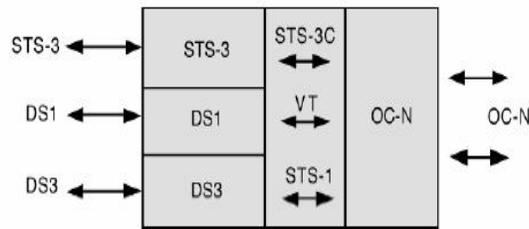


Figura 5.6: Multiplexor Terminal<sup>f</sup>.

### 5.2.6.2 Regenerador

Un regenerador es necesario cuando, debido a la larga distancia entre multiplexores, el nivel de la señal en la fibra se hace muy bajo. El regenerador se cronometra al mismo a parte de la señal recibida y reemplaza los bytes de la sección de cabecera antes de retransmitir la señal. La cabecera de línea, carga y POH no son modificados (vea la Figura 5.7).

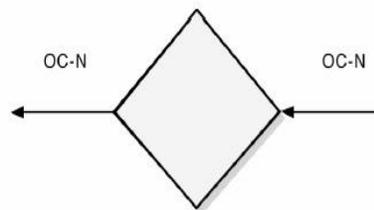


Figura 5.7: Regenerador<sup>f</sup>.

### 5.2.6.3 Multiplexor Add/drop (ADM)

Aunque los elementos de red (NEs) son compatibles en el nivel OC – N, pueden variar en características de fabricante a fabricante. SONET no restringe a los fabricantes a proveer un solo tipo de productos, ni les pide el proveer todos los tipos. Por ejemplo, un fabricante puede ofrecer un multiplexor add/drop con acceso en DS – 1 solamente, mientras que otro puede ofrecer acceso simultáneo en velocidades DS – 1 y DS – 3 (vea la figura 5.8).

<sup>f</sup> Figura tomada de <http://ice.org>

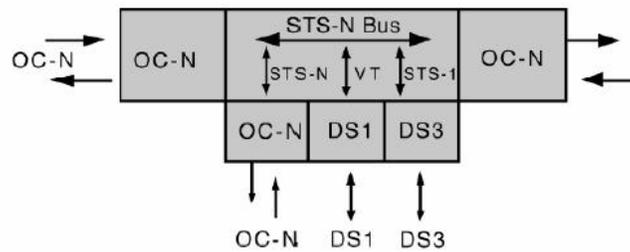


Figura 5.8: Multiplexor Add/Drop<sup>g</sup>.

Un multiplexor/demultiplexor de etapa sencilla puede multiplexar varias entradas dentro de una señal OC – N. En un sitio add/drop, sólo aquellas señales que necesitan ser accedidas son extraídas o insertadas. El tráfico restante continúa a través de elemento de red sin requerir unidades especiales de paso u otro procesamiento de la señal.

En aplicaciones rurales, un ADM puede ser desplegado en un sitio terminal o alguna locación intermedia para consolidar tráfico de lugares ampliamente separados. Una gran cantidad de ADMs pueden ser también configurados como un anillo de respaldo.

SONET posibilita el drop and repeat (también conocido como drop and continue), una capacidad clave para telefonía y aplicaciones de cable TV. Con el drop and repeat, una señal que termina en un nodo, es duplicada (repeated), y es entonces enviada al siguiente y subsecuentes nodos.

En aplicaciones de anillo de respaldo, el drop and repeat provee un ruteo alternativo para el tráfico pasando a través de anillos interconectados en una configuración de nodos pegados. Si la conexión no puede ser hecha a través de uno de los nodos, la señal es repetida y pasada por una ruta alterna al nodo de destino.

En aplicaciones de distribución multinodo, un canal de transporte puede transportar el tráfico eficientemente entre múltiples nodos de distribución. Cuando se transporta video, por ejemplo, cada canal programante es entregado (dropped) en el nodo y repetido para entrega a el

<sup>g</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

siguiente y subsecuentes nodos. No todo el ancho de banda (canales programa) necesita ser terminado en todos los nodos. Los canales no terminantes en un nodo pueden ser pasados a través sin una intervención física a otros nodos. El multiplexor add/drop provee interfaces entre las diferentes señales de red y señales SONET.

Un multiplexado de etapa sencilla puede multiplexar/demultiplexar una o más señales tributarias ( $DS - 1$ ) en/desde una señal  $STS - N$ . Puede ser usado en sitios terminales, sitios intermedios (add/drop), o configuraciones de hub. En un sitio add/drop, puede extraer señales de velocidad más baja para ser transportadas en diferentes instalaciones, o puede añadir señales de velocidad más baja dentro de la señal de velocidad más alta  $STS - N$ . El resto del tráfico simplemente continúa su trayecto.

#### **5.2.6.4 Conexión cruzada digital de wideband (Wideband Digital Cross – Connects)**

Una conexión cruzada SONET acepta varias velocidades de portadora óptica, accesa a señales  $STS - 1$ , y conmuta en este nivel. Es idealmente usada en un hub SONET. Una diferencia notable entre una conexión cruzada y un multiplexor add/drop es que una conexión cruzada puede ser usada para interconectar un número mucho mayor de  $STS - 1$ s. La conexión cruzada de broadband (broadband cross – connect) puede ser usada para preparado (consolidando o segregando) de  $STS - 1$ s o para manejo de tráfico broadband. Por ejemplo, puede ser usada para separar tráfico de ancho de banda alto del tráfico de ancho de banda bajo y enviarlo por separado al switch de ancho de banda alto (por ejemplo, video) y al switch de ancho de banda bajo (voz). Es el equivalente síncrono de una conexión cruzada digital  $DS - 3$  y soporta arquitecturas de red de hub.

Este tipo es similar a la conexión cruzada de broadband excepto porque la conmutación es hecha a niveles de VT (similar a niveles  $DS - 1/DS - 2$ ). Es similar a una conexión cruzada  $DS - 3/1$  porque esta acepta  $DS - 1$ s,  $DS - 3$ s y está equipada con interfaces ópticas para aceptar señales de portadoras ópticas. Es útil para aplicaciones de preparado  $DS - 1$  en locaciones de hub. Una ventaja mayor de las conexiones digitales wideband es que menos demultiplexado y multiplexado es necesario porque solo las tributarias requeridas son accesadas y conmutadas.

La conexión cruzada de wideband (W – DCS) es una conexión cruzada digital que termina señales SONET y DS – 3. y tiene la funcionalidad básica de conexiones cruzadas a niveles de VT y DS -1. Es el equivalente SONET a la conexión cruzada digital DS – 3/DS – 1 y acepta señales ópticas OC – N así como también STS – 1s, DS – 1s y DS – 3s.

En los conectores cruzados digitales de wideband, la conmutación es hecha en el nivel de VT.

A causa de que SONET es síncrono, las tributarias de velocidad baja son visibles y accesibles dentro de la señal STS – 1. Así pues, las tributarias requeridas pueden ser accedidas y conmutadas sin demultiplexarlas, lo cual no es posible con los conectores cruzados digitales existentes.

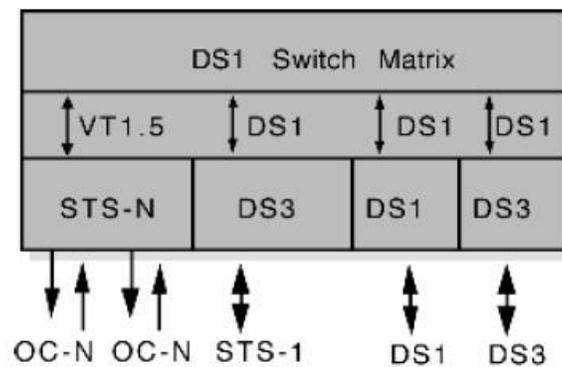


Figura 5.9: Wideband Digital Cross – Connects<sup>h</sup>.

### 5.2.6.5 Conexión cruzada digital de broadband (Broadband Digital Cross – connect)

La conexión cruzada digital de Broadband comunica varias señales SONET y DS – 3s. Ésta accesa a las señales STS – 1, y conmuta en este nivel. Es el equivalente síncrono de una conexión digital de DS – 3. Excepto porque la conexión cruzada digital de broadband acepta señales ópticas y permite a la cabecera ser mantenida (los sistemas asíncronos previenen que la cabecera sea pasada de una señal óptica a una señal).

<sup>h</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

La conexión cruzada digital de broadband puede hacer conexiones cruzadas de dos vías en los niveles DS – 3, STS – 1, Y STS – Nc. Es de mejor uso como un hub SONET, donde esta puede ser usada para preparar STS – 1s, para propósitos de restauración de broadband, o para rutear tráfico (vea la figura 5.10)

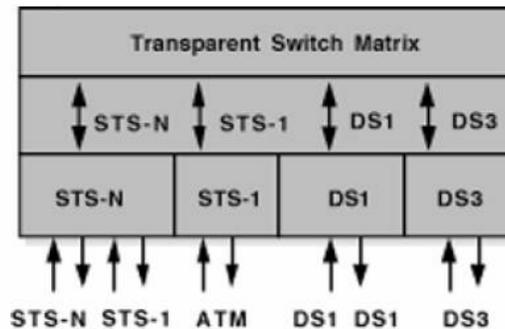


Figura 5.10: Conexión Cruzada Digital de Broadband<sup>1</sup>.

### 5.2.6.6 Digital loop carrier

El digital loop carrier (DLC) puede ser considerado como un concentrador de servicios de baja velocidad antes de que éstos sean traídos a la oficina local central (CO) para distribución. Si esta concentración no fuera hecha, el número de suscriptores (o líneas) que una CO puede atender sería limitado por el número de líneas atendidas por la CO. El DLC por si mismo es actualmente un sistema de multiplexores y switches diseñados para realizar la concentración desde las terminales remotas hasta la oficina de marcado de la comunidad y, desde ahí, hasta la CO.

Mientras que un multiplexor SONET puede ser desplegado por las premisas del consumidor, un DLC es dirigido a servicio en la CO o a un ambiente de salto controlado (CEV) que pertenece a la portadora. El documento Bellcore TR – TSY – 000303 describe un DLC integrado genérico (IDLC), el cual consiste en terminales digitales remotas inteligentes (IDTs), las cuales son conectadas por una línea digital. Los IDLCs son diseñados para integrar mas eficientemente sistemas DLC con los switches digitales existentes (vea la figura 5.11)

<sup>1</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

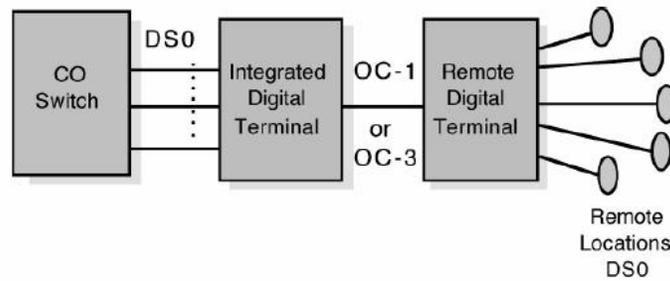


Figura 5.11: Digital Loop Carrier<sup>j</sup>.

## 5.2.7 Configuraciones de red SONET

### 5.2.7.1 Punto a punto

El multiplexor SONET, un multiplexor terminal terminador de ruta a nivel de entrada, actúan como un concentrador de DS – 1s así como también otras tributarias. Su despliegue más simple involucra dos multiplexores terminales conectados por fibra con o sin un regenerador en el enlace. Esta implementación representa la configuración SONET más simple.

En esta configuración (vea la figura 5.12), la ruta SONET y la ruta de servicio (links DS – 1 ó DS – 3 de fin a fin) son idénticas, y esta isla síncrona puede existir dentro de un mundo de red asíncrona. En el futuro, conexiones de ruta de servicio de punto a punto se extenderán a lo largo de la red entera y siempre se originarán y terminarán en un multiplexor.

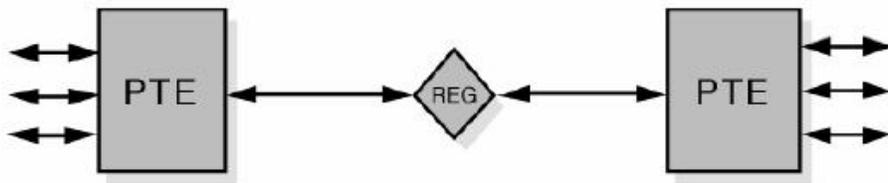


Figura 5.12: Configuración Punto a Punto<sup>j</sup>.

<sup>j</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

### 5.2.7.2 Punto a multipunto

Una arquitectura punto a multipunto (add/drop lineal) incluye circuitos de adición y extracción a lo largo del camino. El ADM SONET (add/drop multiplexer) es un elemento único de red específicamente diseñado para esta tarea. Éste evita a la actual arquitectura de red lo engorroso de demultiplexar, conexión cruzada, adición y extracción de canales y después remultiplexar. El ADM es típicamente colocado a lo largo de link SONET para facilitar la adición y extracción de canales tributarios en puntos intermedios en la red (vea la figura 5.13).

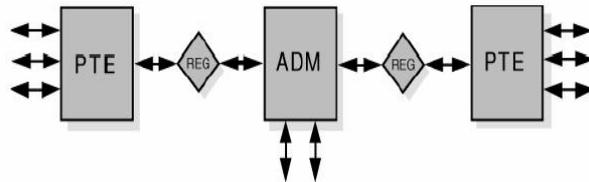


Figura 5.13: Configuración punto a multipunto<sup>k</sup>.

### 5.2.7.3 Hub network

La arquitectura de Hub Network acomoda el crecimiento inesperado y cambios más fácilmente que las redes punto a punto simples. Un Hub (figura 5.14) concentra el tráfico en el sitio central y permite el fácil reaprovisionamiento de circuitos.

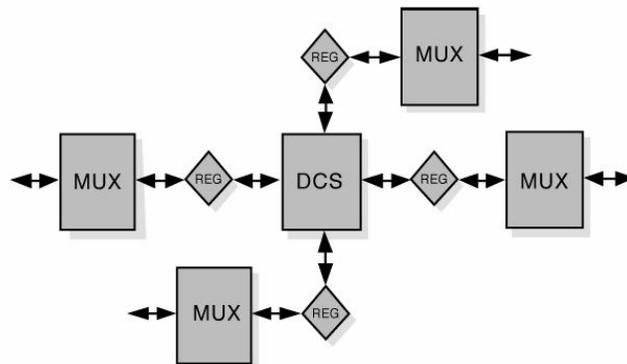


Figura 5.14: Configuración de Hub Network<sup>k</sup>.

<sup>k</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

Lo siguiente son dos posibles implementaciones de este tipo de red:

1. Usando dos o más ADMs, un switch de conexión cruzada de wideband, lo cual permite la conexión cruzada de servicios tributarios en el nivel de tributaria.
2. usando un switch de conexión cruzada de broadband, el cual permite la conexión cruzada del nivel SONET y el nivel de tributaria.

#### 5.2.7.4 Arquitectura de anillo

El bloque constitutivo SONET para una arquitectura de anillo es el ADM. Múltiples ADMs pueden ser puestos en una configuración de anillo ya sea para tráfico bidireccional o unidireccional (vea la figura 5.15). La principal ventaja de la topología de anillo es su respaldo; si un cable de fibra es cortado, los multiplexores tienen la inteligencia para enviar los servicios afectados en una vía de ruta alternada a través del anillo sin interrupción.

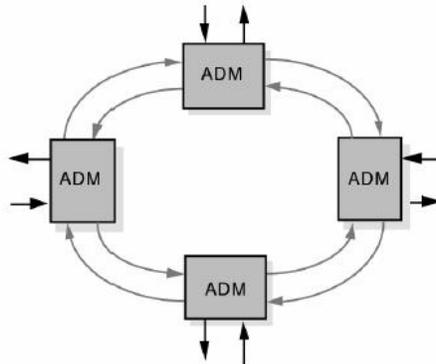


Figura 5.15: Arquitectura de anillo<sup>1</sup>.

La demanda por servicios de respaldo, ruteo diversificado de instalaciones de fibra, flexibilidad para el reacomodado de servicios a nodos atendientes alternados, así como también restauración automática dentro de segundos, ha hecho a los anillos una topología popular SONET<sup>[31]</sup>.

<sup>1</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

### **5.3 Introducción a PDH (Jerarquía Digital Plesiócrona) y SDH (Jerarquía Digital Síncrona)**

Las mejoras que se han venido en el área de la tecnología del transporte han tenido un crecimiento notable. Esto se debe a los requerimientos de mayores capacidades gracias a que hay un aumento en el número de usuarios finales. El crecimiento de los usuarios finales beneficia a las compañías prestadoras de servicios y el usuario final se ve también beneficiado por mejores costos de los servicios.

Las compañías telefónicas poco a poco requirieron incrementar su tráfico interno (transporte). En un principio se usó una tecnología llamada PDH, alrededor de los 80's. Empezando con los enlaces de 2Mbps, y finalizando al principio de los 90's con enlaces de 140Mbps.

La Jerarquía Digital Síncrona (SDH) surge por la necesidad de evolucionar hacia un sistema de transmisión de más alta velocidad, más confiable y más fácil de administrar que su antecesor: la Jerarquía Digital plesiócrona (PDH), por lo que para comenzar a analizar las características de SDH, analizaremos las de PDH primero.

#### **5.3.1 Características de PDH**

- Es un sistema plesiócrono, esto es, las señales tributarias entrantes pueden traer velocidades diferentes, pueden venir fuera de fase, por lo que se tendrán que agregar bits de justificación para sincronizarlas a todas y de esta manera comenzar la multiplexación TDM, también se tienen que agregar bits de sincronía en cada nivel de multiplexación para indicar el inicio de cada trama.
- En PDH no se tienen las facilidades de insertar o segregar canales. Si se desea hacer esto, por ejemplo el sacar una señal de 2Mbps de un flujo de 140Mbps se tendría que instalar todos los multiplexores para bajar la señal de cuarto al primer orden y viceversa.

- La PDH fue diseñada básicamente para enlaces punto a punto y no está suficientemente adecuada para funcionar en la red.
- Falta de capacidad para el monitoreo en la carga útil.
- Pocas facilidades de administración y supervisión de la red.
- Por su forma de multiplexaje no proporciona un sistema de conexión cruzada económica.
- A nivel del medio de transmisión, no hay compatibilidad entre sistemas de diferentes fabricantes.
- La PDH está orientada a servicios de voz.
- En PDH se realizará una multiplexación por división de tiempo (TDM) y generar flujos superiores a los 2Mbps (PCM de primer orden) a partir de canales digitales de 64Kbps, tanto en estándar Europeo (32 canales) como en estándar Americano (24 canales) y sus correspondientes niveles jerárquicos.

### **5.3.2 Características de SDH**

- El SDH es síncrono, esto es, todos los elementos de la red utilizan como referencia solamente un reloj. Existen 2 relojes atómicos de Cesio que se encuentran instalados; uno en Celaya y otro en México los cuales proporcionan los pulsos de referencia de alta precisión para todos los sistemas digitales del país.
- Es compatible con sistemas PDH (estándar Americano o Europeo) y capaz de transportarlos de manera transparente.
- Está normalizado en cuanto al medio de transmisión que permite mezclar cualquier tipo de equipo que cumpla con dicha norma.
- Está preparado para transportar señales PDH y señales ATM.
- Realiza una multiplexación más visible, ya que una señal SDH está compuesta de señales de más bajo nivel, es decir, velocidades más bajas enclavadas en otras de más alto orden como en los actuales sistemas PDH, las cuales sin embargo, pueden ser fácilmente identificables de los sistemas de más alto nivel por su configuración de encabezados. Esto hace posible el agregar y el extraer (add/drop) estas señales de bajo orden de una manera más fácil y rápida sin tener que pasar por todos los niveles de demultiplexación del flujo de alto orden.

- Tiene canales de voz y datos para administrar la red dentro de la señal SDH y permite un control centralizado de todos los elementos de la red SDH para operación y el mantenimiento.

### 5.3.3 Velocidades de SDH

En SDH también se cuenta con sistemas de alto orden de multiplexación denominados STM (Synchronous Transport Module) que son tramas síncronas estandarizadas. En estas tramas se incrustarán conjuntos de estructuras de datos jerárquicos identificados mediante encabezados específicos para cada orden.

Serán transmitidos sobre enlaces ópticos esencialmente. Sus órdenes de multiplexación son como siguen:

Señal	Bit Rate (Mbps)
STM – 1	155.520
STM – 4	622.080
STM – 16	2488.320
STM – 64	9953.280

Tabla 5.3: Ordenes de Multiplexación<sup>m</sup>.

El SDH se deriva y es contra parte del estándar Americano SONET que es una jerarquía estandarizada de transmisión óptica propuesta por BellCore y normalizada por ANSI.

<sup>m</sup> Tabla tomada de <http://www.ice.org>

### 5.3.4 Descripción general

*Contenedor (C – n)*: Es la estructura que forma la carga útil de información. Es la caja negra o “recipiente” en el cual se colocan las señales de información de entrada. Cada una de ellas tendrá sus reglas de mapeo o adaptación de las distintas velocidades de los flujos de entrada, mediante un proceso de “Justificación” para compensar las variaciones de frecuencia en dichas señales.

El dígito “n” define el orden PDH de la señal de entrada, el orden 1 se divide en dos: el 11 para estándar Americano (1544Kbps) y el 12 para el estándar Europeo (2049Kbps).

*Contenedor Virtual (VC – n)*: Estructura de información usada para establecer conexiones entre los distintos niveles del trayecto. En el VC se agregan las facilidades (encabezado o Path Over Head = POH) para la supervisión y el mantenimiento de las trayectorias de punta a punta del contenedor o grupo de Unidades Tributarias (TU).

*Unidad Tributaria (TU – n)*: Aquí se agregan los apuntadores a los contenedores virtuales, que permiten al sistema SDH el compensar las diferencias de fase o frecuencia dentro de la red y también localizar el inicio del contenedor virtual.

*Grupo de Unidades Tributarias (TUG – n)*: Agrupa a varias TU’s que se multiplexan juntas para generar flujos de alto orden SDH.

*Unidad Administrativa (AU – n)*: Su función es agregar apuntadores a los contenedores virtuales, en forma similar que con las unidades tributarias. Estructura que adapta información entre la trayectoria de alto orden y la sección multiplexora.

*Grupo de Unidades Administrativas (AUG – n)*: Agrupa a varias AU’s que van juntas para formar un sistema SDH de primer orden. En la multiplexación, de acuerdo con la estructura de ETSI, el AUG es idéntico a la única AU que se define.

*Módulo de Transporte Síncrono (STM – n):* Aquí se agregan las facilidades para la supervisión y el mantenimiento (sección de encabezado SOH) de las secciones del multiplexor y de regeneradores a un número de grupos de AU's. El dígito “n” define el orden del STM y en la estructura de multiplexación, “n” también es el número de AUG's o STM – 1 que son transportadas en el módulo.

### **5.3.5 Multiplexación SDH**

Existen dos métodos de multiplexación para formar un STM – n(1,4,16,64). Uno es multiplexar “n” STM – 1's, multiplexando byte a byte. El otro es multiplexar AU – 4's y luego agregar un SOH especial para formar STM – n.

El primer método es el más usado y la forma de hacerlo se denomina entrelazado (intercalado) de bytes. Estos métodos los aplican algunos proveedores y con ello definen sus líneas de productos para cada nivel jerárquico.

### **5.3.6 Encabezados de trayecto**

En el sistema SDH se tienen agregados a la señal transportada que reciben el nombre de encabezados. Cada sección y trayectoria en un enlace de sistema SDH lleva un encabezado que es utilizado para sus funciones de administración y de supervisión. Estos se encuentran en cada:

- Sección de Regeneradores.
- Sección de Multiplexación.
  - + Trayectoria de alto orden de Punta a Punta (HLP: High Level Path).
  - + Trayectoria de bajo orden de Punta a Punta (LLP: Low Level Path).

Estos encabezados están contenidos en la trama del STM – 1, que es una trama de 9 filas por 270 columnas y se denominan:

- Encabezado de Sección de Regeneradores (RSOH) de 3 filas por 9 bytes.
- Encabezado de Sección de Multiplex (MSOH) de 5 filas por 9 bytes.

### 5.3.7 Estructura de trama STM – 1

En la figura 5.16 se observa la estructura de la trama de una señal SDH de nivel 1. Los 9 primeros bytes en cada fila llevan información que el sistema utiliza para sí mismo. Sin embargo, parte de esa capacidad SDH la utiliza para encabezados adicionales. La secuencia de transmisión es una fila a la vez comenzando desde arriba y de izquierda a derecha y cada byte se transmite comenzando con su bit más significativo (MSB).

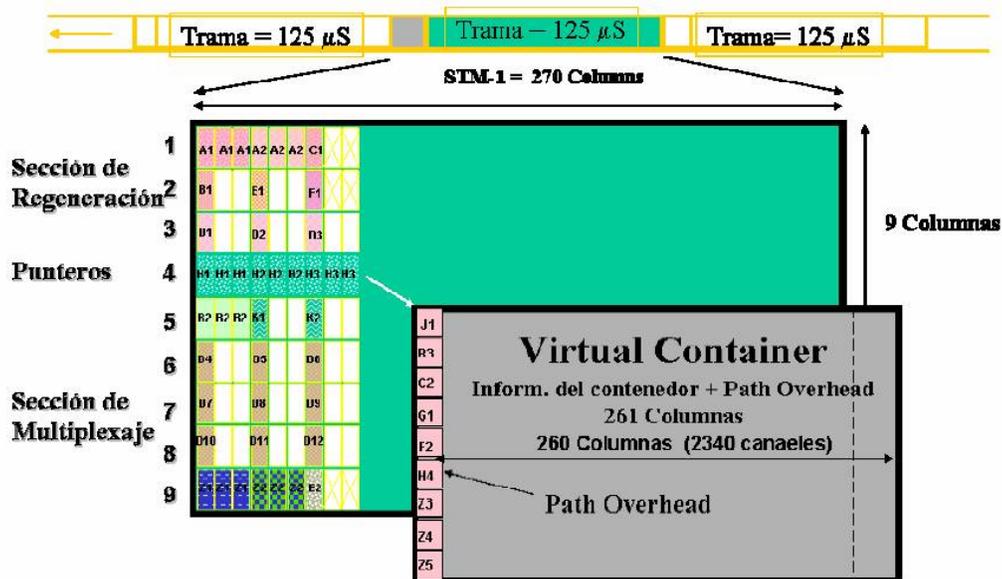


Figura 5.16 Estructura de Trama de una señal SDH de nivel 1<sup>n</sup>.

### 5.3.8 Módulo de transporte síncrono de orden 1 (STM – 1)

Este se compone de las siguientes secciones:

- Sección de Encabezados SOH la cual se divide en dos partes:

<sup>n</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

1. El encabezado de la sección de regeneradores RSOH (9col. X 3 filas = 27bytes)
  2. El encabezado de la sección de múltiplex MSOH (9 col. X 5 filas = 45bytes).
- La sección de apuntadores de 9 X 1 = 9bytes en fila 4.
  - Sección de encabezados de trayecto POH la cual está en la columna 10 y es de 9bytes.
  - Sección de carga útil (contenedor) la cual es de 260col. X 9 filas = 2340bytes.

Esto es que el total de bytes que conforman a un módulo de transporte síncrono (STM – 1) es de 20 col. X 9 filas = 2340bytes y que si los multiplicamos por 8 bit y después por 8000Hz. obtenemos la velocidad de transmisión del STM – 1:  
 $2340\text{bytes} \times 8\text{bit} \times 8000\text{muestras/s} = 155.520\text{Mbps}$ .

### 5.3.9 Mapeo

La jerarquía digital síncrona SDH puede transportar varios tipos de señales como son las señales PDH de 2, 34, 140Mbps. Para cada tipo de señal, SDH realiza un tipo especial de mapeo, es decir, un tipo especial de acomodo. Imaginemos, para transportar estas señales, necesitamos acomodarlas muy bien en unos casilleros. Para llegar “bien” no deben quedar flojas, para lo cual en muchos casos necesitaremos agregar “bits de relleno” además de otros bits para tener un buen “embalaje” de esas señales, agregando bits de sincronía para contrarrestar las desviaciones en fase y en frecuencia y canales de comunicación.

El mapeo, es un procedimiento que se lleva a cabo en los puntos de acceso a la red síncrona, mediante el cual las tributarias (ya sean señales PDH, celdas ATM, etc.) son adaptadas dentro de los contenedores virtuales.

El mapeo especifica como se van a llenar las diferentes estructuras SDH con las señales que se transportarán. Esto es manejado por medio de la justificación, en forma muy similar al mecanismo de la justificación empleada en PDH.

### 5.3.10 Apuntadores

Los apuntadores AU y TU proporcionan un método que permite la localización dinámica y flexible de VC's dentro de las tramas AU y TU. Los valores de los apuntadores describen la posición inicial de los VC's flotantes dentro de la carga de información de la trama AU o TU y que son recalculados en cada nodo. El uso de apuntadores evita la necesidad de tener buffers para AU o TU con lo que el retraso (Delay) de la red SDH es minimizado.

Los apuntadores facilitan la operación PDH de los VC's dentro de la red SDH ya que pueden suceder desviaciones de fase o frecuencia entre dos puntos de conexión. Otra función de los apuntadores es la de indicar el inicio de la información y término de la misma entre un contenedor y otro de cada trama STM – 1.

Los apuntadores se definen en dos niveles:

- *TU – n*: Identifica el comienzo del VC – n relativo al VC – 4 para cada uno de los “n” VC's.
- *AU – n*: Identifica el comienzo del VC – 4 en relación con la trama STM – 1.

Cuando las diferencias de fase o frecuencia se presentan éstas deben ser compensadas con un incremento o decremento de información o relleno en la carga útil transportada para lo cual se requiere justificar la validez de éste proceso haciendo uso de los últimos 3bytes (H3) del apuntador a lo cual se conoce como proceso de “Justificación”.

### 5.3.11 Encabezados de VC – 4

Los encabezados forman parte importante en las labores de supervisión y mantenimiento de los sistemas y dependiendo del nivel en que se ubiquen nos proporcionarán la calidad de transmisión del enlace y de la red en función de señales de mantenimiento o alarmas que indican si hay problemas en la transmisión.

Por su nivel los ubicamos en:

- Nivel de Sección de Regeneradores (RSOH y MSOH).
- Nivel de Trayecto de Alto Orden (POH de VC – 4).
- Nivel de Trayecto de Bajo Orden (V5 de VC – 3, VC – 12).

Los encabezados también son importantes en la gestión de redes SDH, esto es porque utilizan la información y la analizan para determinar las características y parámetros de las señales de cada nivel y la calidad operativas de las redes.

Uno de los encabezados más importantes es el de la trayectoria de Alto Orden (POH) que relaciona a la carga útil del contenedor C – 4 y está compuesto de 9bytes y cumplen con una función de administración y de supervisión. Este encabezado está contenido en la trama del STM – 1, que es una trama de 9 filas por 279 columnas y se denominan:

- Encabezado de Sección de Regeneradores (RSOH) de 3 filas por 9 bytes para trayectoria de alto orden de punta a punta (HLP: High Level Path).
- Encabezado de Sección de Múltiplex (MSOH) de 5 filas por 9 bytes para trayectoria de bajo orden de punta a punta (LLP: Low Level Path).

### 5.3.12 Formación de una trama STM – 1 a partir de 2Mbps

Para la formación de un STM – 1 a partir de una señal de 2Mbps se deben realizar los siguientes 6 pasos:

1°. Adaptar la señal de PDH entre 2.046 Y 2.050Mbps dentro de un contenedor (C – 12) el cual incrementa su velocidad a 2.224Mbps y efectuar el alineamiento.

2°. Se debe agregar un encabezado (V5 POH) de bajo orden para formar un nuevo contenedor llamado virtual ó (VC – 12) que incrementa de nuevo la velocidad a 2.240Mbps.

3°. Se debe indicar el inicio de cada VC – 12 y para lo cual se agrega un apuntador (PTR) que lo convierten ahora en unidad tributaria (TU – 12) aumentando ahora su velocidad a 2.304Mbps.

4°. Este paso es en realidad de tres partes ya que se agrupan 3 TU – 12 en uno solo llamado grupo de unidades tributarias de 2°. Nivel ó (TUG – 2) con una velocidad de 6.192Mbps. En este paso se agrupan también 7 TUG – 2 para formar un grupo de unidad tributaria de 3er. Nivel ó TUG – 3 con una velocidad de 49.536Mbps.

En este paso se conjuntan 3 (TUG – 3) para formar un contenedor que será de 4° nivel llamado VC – 4 que es el contenedor básico de un STM – 1 Y cuya velocidad será 150.336Mbps.

5°. Solo se agrega un apuntador (PTR) el cual tiene la función de alinear la carga del VC – 4 e indicar el inicio y terminación de la carga útil de información. Una vez juntos VC – 4 + PTR lo convierten en unidad administrativa ó (AU – 4) y tiene una velocidad de 150.912Mbps.

6°. En este paso se deben agrupar los diferentes AU – 4 que existan, pero como solo tenemos un AU – 4 este se convierte inmediatamente en grupo de unidad administrativa ó AUG con la misma velocidad del AU – 4.

Finalmente se agrega la sección de encabezado (SOH) que es de dos partes (RSOH y MSOH) y que al unirlo con el AUG lo convierten en STM – 1 a una velocidad de 155.520Mbps.

Estos pasos se pueden ver ilustrados en la Figura 5.17

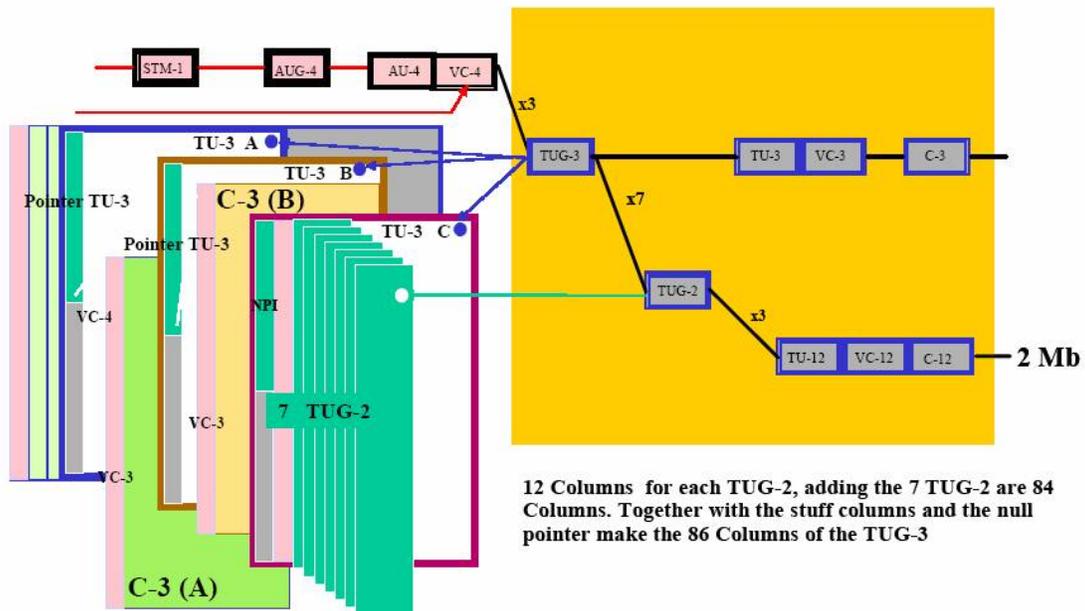


Figura 5.17 Mapeo de una señal SONET a 2Mbps. Tomada de [www.ice.org](http://www.ice.org)

### 5.3.13 Elementos de las redes de transporte SDH

Para jerarquía digital síncrona podemos distinguir 4 elementos de red que son:

- Multiplexores síncronos (MUX).
- Enrutador Digital o Cross Connect (SDXC).
- Multiplexor para Agregar/Extracción (ADM).
- Regeneradores Síncronos (REG).

A continuación se da una breve descripción de cada uno de ellos:

*Multiplexor Síncrono (MUX):* Conocidos como MUX. Los multiplexores realizan la función de interfase de las señales PDH con las señales SDH y multiplexa las señales SDH de orden más bajo con las señales SDH de orden más alto. Un MUX forma parte de un SDXC y de un ADM, en general el MUX es el núcleo de la SDH, y dependiendo de cómo lo conectemos y equipemos, obtendremos distintas configuraciones.

*Enrutador Digital (SDXC):* Conocido como Synchronous Digital Cross Connect o Enrutador Digital Síncrono, es un dispositivo que permite el conmutar las líneas de transmisión con diferentes velocidades. También un SDXC es capaz de agregar o extraer señales de orden más bajo. Son conmutadores semipermanentes.

*Multiplexor para agregar/extracción ADM:* Conocido como ADM o Add/Drop Multiplexer, el ADM permite agregar y extraer señales de bajo orden de flujos de más alto orden, por ejemplo una señal de 2Mbps de un flujo SDH de 155Mbps.

*Regenerador Síncrono (REG):* Un regenerador Síncrono se encarga de regenerar señales ópticas de línea entrantes. Además también supervisa la calidad de transmisión de la línea.

Todos los elementos de la red (NE) mencionados se pueden acceder por medio de una red de administración de telecomunicaciones (TMN) para la operación y mantenimiento de la red entera de una manera centralizada y totalmente digital.<sup>[32]</sup>

#### **5.4 Introducción a WDM (Wavelength Division Multiplexing)**

La aparentemente ilimitada capacidad proporcionada por las redes ópticas SONET/SDH comenzó a saturarse a mediados de los 90. Cuando se instalaron las primeras fibras, el tráfico transportado por estas redes era fundamentalmente de voz. Una ruta de fibra típica podía estar formada por 16 fibras, y rara vez se instalaban 32. Sin embargo, la explosión de Internet y de las aplicaciones multimedia ha provocado un crecimiento del tráfico a un ritmo imparable, de tal forma que la demanda de ancho de banda está ya cerca de la capacidad máxima de algunas redes. Para solucionar estos problemas se tienen dos posibles soluciones: instalar más fibra, o bien desplegar WDM en combinación con TDM (ver Figura 5.18).

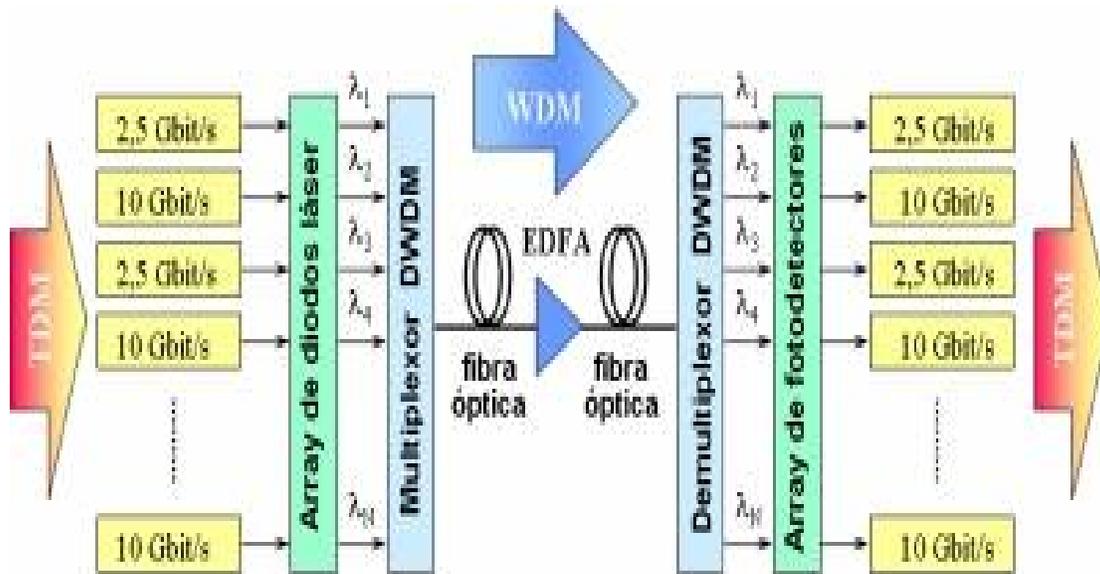


Figura 5.18: Red TDM/WDM<sup>o</sup>.

La instalación de nuevas fibras es una solución adecuada para los nuevos proveedores de servicio o para aquellos que desean hacer crecer su infraestructura de red de forma sustancial. Sin embargo, resulta un proceso muy lento y costoso para la mayoría de los proveedores de servicio. En cambio, WDM se ha demostrado como una forma inmediata y asequible de aumentar el ancho de banda de la infraestructura de fibra instalada sin necesidad de realizar fuertes inversiones en nuevas rutas de fibra. Como paso inicial, puede desplegarse WDM sobre tramos individuales de una red SONET/SDH que se encuentran congestionados debido a grandes demandas de tráfico. Esto resulta especialmente útil cuando múltiples anillos se cruzan entre dos nodos. Dado que la red SONET/SDH continúa funcionando como si fuera la única aplicación en la fibra, se preserva la inversión realizada en el equipamiento TDM existente. Con la introducción de WDM, se pueden añadir progresivamente nuevas aplicaciones a nuevas longitudes de onda sin afectar al tráfico SONET/SDH existente. Por ejemplo, se pueden apilar varios anillos SONET/SDH sobre un anillo físico de fibra óptica, cada uno de los cuales transporta una longitud de onda distinta.

En estos enlaces punto a punto WDM, la mayoría de las funcionalidades de red, incluyendo la protección y la restauración, se realizan por parte de los sistemas TDM subyacentes que emplean el tramo WDM. Dado que los equipos terminales, tales como ADMs y DXCs, pueden manejar solamente el tráfico de una longitud de onda, estos equipos TDM terminales

<sup>o</sup> Figura tomada de <http://www.radioptica.com>

proliferan de forma geométrica en un sistema de transporte WDM. Evidentemente, los requisitos de espacio y potencia de estos equipos generan enormes costes de operación. Además, conforme aumenta el número de enlaces y canales WDM, la gestión de red es más compleja. En definitiva, cuando se despliegan más fibras y longitudes de onda, resulta necesario manejar la capacidad a nivel óptico.

Así, del mismo modo que los ADMs y DXCs SONET/SDH surgieron para manejar la capacidad en la capa eléctrica, los OADMs (optical add-drop multiplexers) y OXCs (optical cross-connects) surgen para manejar la capacidad en la capa óptica. Los OADMs permiten insertar y extraer longitudes de onda individuales, y cada nodo procesa sólo las longitudes de onda que necesita acceder. Por lo tanto, el coste de cada nodo es en cierto modo independiente de la velocidad de la red. Los OADMs se utilizan normalmente en anillos WDM y realizan, de forma similar a los ADMs, funciones de monitorización de prestaciones y de restablecimiento frente a fallos. Los anillos WDM presentan, en este caso, ligeras diferencias respecto a los esquemas comentados con anterioridad (por ejemplo, ahora se habla de canales ópticos en lugar de ranuras TDM).

Los OXCs, en cambio, ofrecen capacidades de gestión de ancho de banda mayores que en el caso de los OADMs. Así, realizan funciones tales como conmutación a nivel de longitud de onda, multiplexación y demultiplexación de canales, monitorización de longitud de onda y, opcionalmente, conversión de longitud de onda. Adicionalmente, se encargan de reconfigurar las redes para nuevos servicios, cambios en los modelos de tráfico o restablecimiento en caso de fallos.

La implantación de OADMs y OXCs para la gestión del ancho de banda crea redes ópticas reales. Estas redes se conocen habitualmente como redes ópticas con conmutación de longitud de onda. Además, cuando los nodos realizan todas las funciones directamente en el dominio óptico, estas redes también se conocen como redes completamente ópticas (all-optical networks). Construidas sobre las redes SONET/SDH existentes, las redes ópticas con conmutación de longitud de onda suelen adoptar las arquitecturas de anillos WDM basados en OADMs o mallas WDM basadas en OXCs. No obstante, se debe evitar pensar que aquello que se ha hecho para SONET/SDH resulta directamente aplicable a las redes de transporte ópticas. Todavía existen aspectos técnicos que tienen gran repercusión en el diseño de las arquitecturas de

las redes ópticas, como por ejemplo la conversión de longitud de onda, la monitorización y medida de las prestaciones ópticas o el transporte de información OAM&P (Operations, Administration, Maintenance and Provisioning).

Últimamente, los equipos de red están evolucionando del esquema de protección de SONET hacia redes en malla más eficientes y flexibles. Las redes en malla permiten un crecimiento más organizado a lo largo de las rutas con mayor tráfico. Aunque estas redes deben estar también preparadas para ofrecer protección a nivel de SONET, los mecanismos de protección pueden trasladarse a la capa óptica. El principal beneficio que se obtiene al realizar la protección a nivel de la capa óptica es el desarrollo de una plataforma común, donde pueden confluir datos de diferentes protocolos y velocidades. De este modo, se tiene múltiples niveles de protección que son compatibles y complementarios entre sí.

En una red en malla, la restauración de las rutas es crítica. Con velocidades tan altas como 40 Gbit/s y sistemas DWDM que permiten cientos de rutas a través de una sola fibra, la pérdida de datos como consecuencia del corte de un enlace o el fallo de un nodo puede ser masiva. En la figura 5.19 se ilustra una posible arquitectura de red en malla y cómo se restaura el servicio en el supuesto de un corte de línea. Cada nodo contiene un OXC que se encarga de enrutar las señales hacia los enlaces de salida. En situación normal, las señales se envían del nodo A hacia el E pasando por el F. Tras el corte de la fibra, las señales se enrutan siguiendo los nodos A-F-C-E, aunque también existe como posibilidad la ruta A-B-C-D-E. Adicionalmente, las redes en malla permiten diferentes esquemas de protección dependiendo del tipo particular de tráfico. Así, a diferencia de los anillos SONET donde se requiere una ruta de protección para cada línea activa, aquí una ruta de protección puede compartirse entre varias líneas. En la figura 5.20 se puede observar el uso de los conmutadores para proteger un enlace frente a posibles cortes de fibra (6 líneas primarias + 1 de protección).

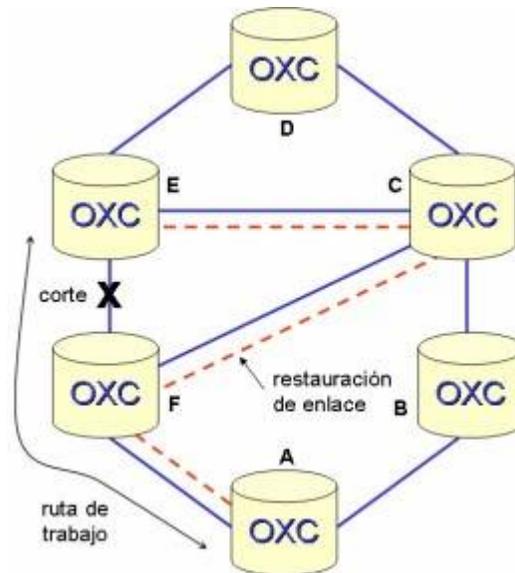


Fig. 5.19: Ejemplo de restauración del servicio en una red óptica WDM en malla<sup>p</sup>.

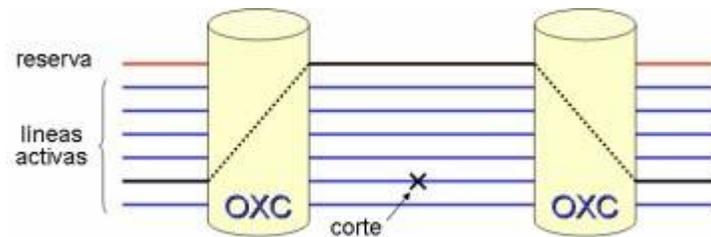


Fig. 5.20: Utilización de los conmutadores en un esquema de protección<sup>p</sup>.

## 5.5 Redes ópticas DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

La introducción de nuevos servicios de valor añadido tales como vídeo bajo demanda o aplicaciones multimedia requiere de una gran cantidad de ancho de banda para satisfacer las necesidades de los usuarios. Las soluciones que tienen los proveedores de servicio para satisfacer este aumento de la demanda de tráfico son diversas. Por una parte pueden instalar más fibra, aunque ésta es una solución cara y en algunos casos inviable. Otra solución consiste en utilizar técnicas de multiplexación por división en el tiempo (TDM) ver Figura 5.21, donde el aumento de capacidad se consigue por medio de ranuras de tiempo más pequeñas que permiten transmitir mayor cantidad de bits (datos) por segundo. Esta tecnología ha sido utilizada en las redes de transporte basadas en los estándares SDH/SONET. No obstante, el principal problema al que se

<sup>p</sup> Figura tomada de <http://www.radioptica.com>

enfrentan los proveedores de servicio es el relacionado con el salto a una capacidad mayor. Basándose en la jerarquía SDH, la capacidad inmediatamente superior a los 10Gbit/s son los 40Gbit/s, por lo que se obtiene más capacidad de la que pudiera necesitarse en un principio, con el correspondiente desembolso económico pues hay que actualizar todos los transmisores y receptores del sistema.



Figura 5.21: Multiplexación por División de Tiempo<sup>q</sup>.

Finalmente, la tercera alternativa consiste en DWDM, que permite aumentar de una forma económica la capacidad de transporte de las redes existentes. Por medio de multiplexores, DWDM combina múltiples canales ópticos sobre una misma fibra (ver Figura 5.22), de tal modo que pueden ser amplificadas y transmitidos simultáneamente. Cada uno de estos canales, a distinta longitud de onda, puede transmitir señales de diferentes velocidades y formatos: SDH/SONET, IP, ATM, etc. Es decir, DWDM puede multiplexar varias señales TDM sobre la misma fibra. Las redes DWDM futuras se espera que transporten 80 canales OC-48/STM-16 de 2,5 Gbit/s (un total de 200 Gbit/s), ó 40 canales OC-192/STM-64 de 10 Gbit/s (un total de 400 Gbit/s), la capacidad equivalente a unos 90.000 volúmenes de enciclopedia por segundo. A diferencia del sistema WDM convencional, en este caso todas las portadoras ópticas viajan por la fibra con separaciones inferiores a 1nm.



Figura 5.22: Multiplexación por División de Longitud de Onda<sup>q</sup>.

<sup>q</sup> Figura tomada de <http://www.radioptica.com>

Una de las principales ventajas de los sistemas DWDM es su modularidad, la cual permite crear una infraestructura conocida como "grow as you go", que se basa en añadir nuevos canales ópticos de forma flexible en función de las demandas de los usuarios. Así, los proveedores de servicio pueden reducir los costes iniciales significativamente, al tiempo que desarrollan progresivamente la infraestructura de red que les servirá en el futuro.

Sin embargo, la revolución de los sistemas DWDM no hubiese sido posible sin las características clave de tres tipos de tecnología:

- La capacidad que poseen los diodos láser de emitir luz a una longitud de onda estable y precisa con un ancho de línea espectral muy estrecho.
- El formidable ancho de banda de la fibra óptica (varios THz), el cual no ha sido aprovechado completamente durante tiempo.
- La transparencia de los amplificadores ópticos de fibra (EDFA) a las señales de modulación y su habilidad para amplificar de forma uniforme varios canales simultáneamente.

Los rápidos avances producidos en DWDM en los últimos años, junto con la creciente demanda de servicios de alta velocidad y gran ancho de banda, están provocando cambios sustanciales en las arquitecturas de las redes ópticas. Así, la tecnología DWDM se está expandiendo progresivamente desde el núcleo de las redes ópticas de alta velocidad hacia las redes metropolitanas y de acceso. Y todo ello provocado por el éxito alcanzado por las soluciones DWDM de largo alcance que han permitido un aumento espectacular en la capacidad de las redes ópticas de transporte.

La primera generación de redes WDM surgió para aliviar el problema del agotamiento de capacidad de las redes SDH/SONET, y tal y como se ha comentado, consistía simplemente en combinar múltiples longitudes de onda en una misma fibra. El número de canales era pequeño (del orden de 16) y la protección se realizaba en las capas 2 ó 3.

La segunda generación de redes metropolitanas DWDM dobla el número de canales e introduce protección de anillo y OADMs estáticos, permitiendo que los proveedores de servicio proporcionen servicios basados en longitud de onda. Adicionalmente, las arquitecturas de red que emplean DWDM de segunda generación soportan interfaces multiservicio protegidos, tales como Gigabit Ethernet, ESCON y SDH/SONET. Si bien estas mejoras son enormes en comparación con las redes SDH/SONET convencionales, la segunda generación de redes posee limitaciones en cuanto a capacidad, coste, escalabilidad y gestión de red.

La conmutación entre múltiples anillos metropolitanos se realiza de forma centralizada y las longitudes de onda se demultiplexan antes de ser conmutadas/enrutadas de forma individual. Esto da lugar a conmutadores con un gran número de puertos (por ejemplo, 1024 x 1024) para poder gestionar el tráfico entre anillos, resultando en costes elevados. Adicionalmente, la mayoría de OXCs existentes realizan conversiones optoelectrónicas a la entrada y a la salida del conmutador debido a la falta de estándares de interconexión de longitudes de onda en entornos donde existen equipos de múltiples fabricantes.

Finalmente, las redes ópticas de tercera generación se caracterizan por ofrecer gestión dinámica de las longitudes de onda directamente en el dominio óptico, proporcionando ventajas significativas con respecto a la segunda generación de redes. Así mismo, el número de canales es mayor y existe una monitorización de prestaciones más sofisticada que se realiza sobre cada canal óptico.

Por medio de láseres sintonizables y filtros, junto con tarjetas de interfaz de múltiples velocidades, se puede realizar la gestión dinámica de longitudes de onda en el dominio óptico de una forma rápida y eficiente. Sin embargo, la clave para ganar clientes consiste en su habilidad para proporcionar nuevos servicios o cambiar la capacidad de los existentes de forma rápida (Vea Figura 5.23 para referencia).

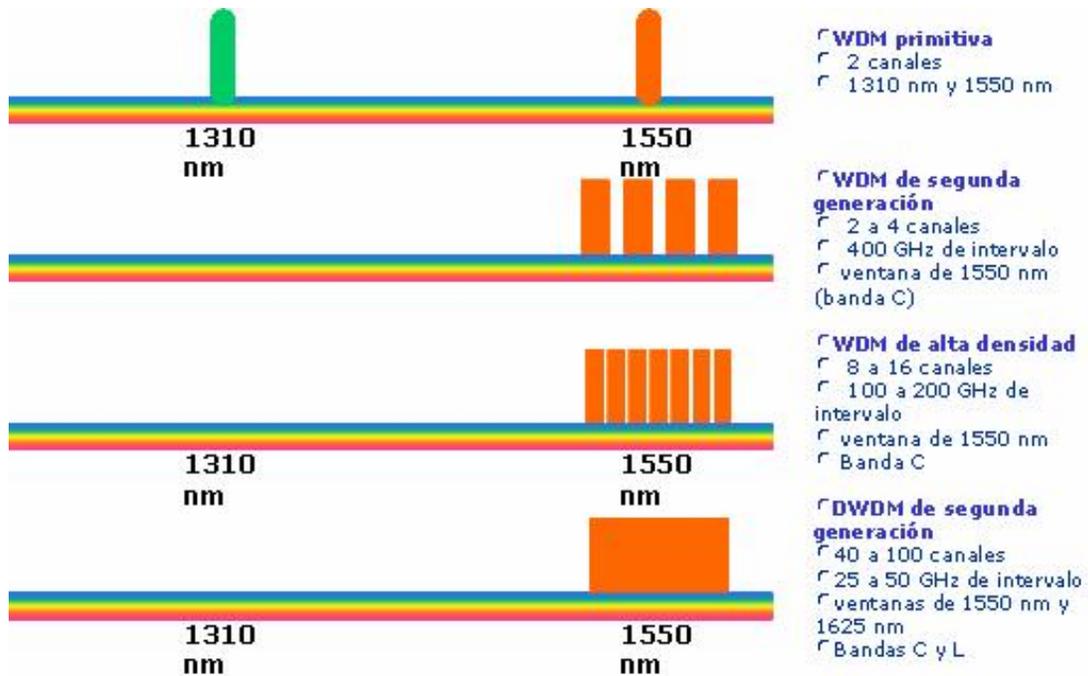


Figura 5.23: Evolución redes WDM, DWDM<sup>†</sup>.

## 5.6 Redes ópticas basadas en CWDM

Recientemente, el concepto de CWDM (coarse wavelength division multiplexing) ha comenzado a ser bien conocido en la industria de telecomunicaciones. Todo el mundo reconoce a CWDM como una alternativa de bajo coste que revolucionará el entorno metropolitano y de las redes de empresa.

El enorme traspíe sufrido por el mercado de telecomunicaciones ha provocado un cambio significativo en el enfoque de los fabricantes de dispositivos y sistemas de comunicaciones ópticas. En la actualidad los esfuerzos de los fabricantes se centran principalmente en el área de las redes metropolitanas, y más concretamente, en la búsqueda de soluciones que permitan abaratar costes. Diversos fabricantes de componentes e integradores de sistemas están desarrollando productos CWDM puesto que la industria reconoce la oportunidad de mercado para esta tecnología.

<sup>†</sup> Figura tomada de <http://www.radioptica.com>

La tecnología CWDM es especialmente atractiva debido a su bajo coste. En comparación con DWDM, los sistemas CWDM proporcionan ahorros del orden de un 35% a 65%. Por ejemplo, en la figura 5.24 se muestran los costes relativos de ambas tecnologías calculados para un sistema consistente en un anillo protegido de 16 canales, con un hub y cuatro nodos, cada uno de los cuales manejando 4 longitudes de onda. El ahorro proporcionado por CWDM (hasta un 40% en este caso) se debe a la reducción de costes de los láseres sin necesidad de control de temperatura y al menor precio de los multiplexores y demultiplexores pasivos. Básicamente, la mayor separación entre canales de los sistemas CWDM permite que las longitudes de onda de los láseres DFB puedan sufrir derivas con los cambios de temperatura, evitando de este modo la necesidad de emplear controladores de temperatura. Esto trae consigo un ahorro de espacio, simplifica el empaquetamiento del láser y reduce además el consumo de potencia (un valor medio de 0,5 W para un láser CWDM en comparación con más de 2 W para un transmisor láser DWDM conforme a la rejilla de la UIT).

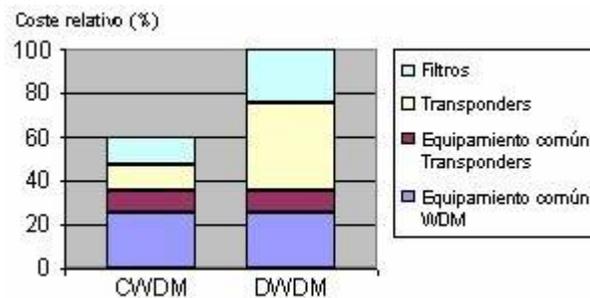


Figura 5.24: Costes relativos CWDM vs DWDM<sup>s</sup>.

Al mismo tiempo, el diseño de los filtros de película delgada (thin-film filter, TFF) es más simple puesto que se necesita depositar menos capas en comparación con aquellos para DWDM, los cuales deben cumplir unos requisitos estrictos para las bandas de paso y de guarda. Adicionalmente, se produce también un ahorro de costes en el empaquetamiento de los TFFs como consecuencia de unos requisitos de alineamiento menos severos, lo cual permite una mayor automatización de los procesos de fabricación.

<sup>s</sup> Figura tomada de <http://www.radioptica.com>

Recientemente, la norma UIT-T G.694.2 ha estandarizado una rejilla de longitudes de onda para CWDM con un espaciado entre canales de 20 nm. La elección de este valor no es algo accidental, sino que es el resultado de un minucioso estudio económico que asegura una reducción significativa en los costes de los transmisores y de los filtros ópticos, así como un número razonable de canales por fibra óptica. Sin embargo, como muestra la figura 5.25 las fibras mono modo G.652 convencionales presentan una atenuación significativa de 1350nm a 1450nm debido al pico de absorción del agua. Las nuevas fibras G.652.C, por ejemplo la fibra AllWave, eliminan este pico de atenuación y conducen a un aumento de un 33% de capacidad extra. Considerando un espaciado entre canales de 20nm, se pueden transmitir hasta 16 canales CWDM cubriendo la banda de 1310nm a 1610nm sobre una fibra ZWPF (zero water peak fiber). En cambio, una fibra SMF puede transportar 12 canales o incluso menos dependiendo de la posición e intensidad del pico de absorción. Por debajo de 1310nm, no obstante, predominan las pérdidas causadas por dispersión de Rayleigh y no se puede transmitir en entornos metropolitanos, quedando su uso limitado al bucle de abonado o aplicaciones de corto alcance como aquellas definidas en IEEE 802.3ae.

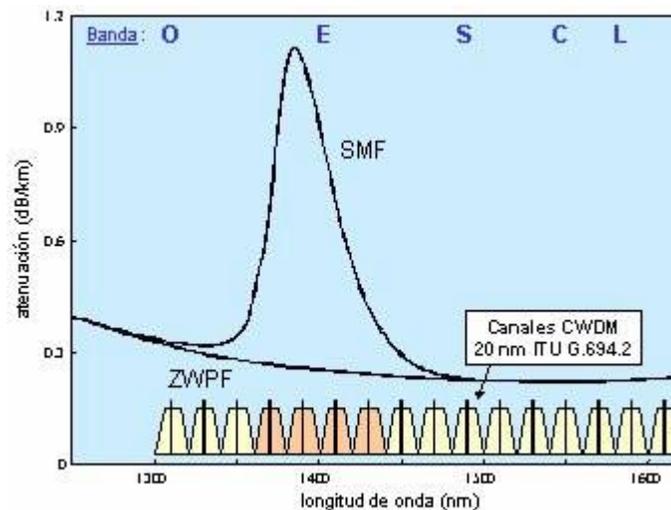


Figura 5.25: Planificación de canales en sistemas CWDM<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Figura tomada de <http://www.radioptica.com>

Existen diversos escenarios, además de las ya comentadas redes metropolitanas, donde CWDM constituye una opción atractiva. Por ejemplo, los sistemas de acceso de banda ancha sobre redes HFC requieren a menudo la transmisión de tráfico de retorno desde los nodos HFC hacia la cabecera situada a unos 75km de distancia de éstos, siendo CWDM un candidato ideal para esta aplicación. El alcance de las transmisiones digitales banda base sobre CWDM es de hasta 75km, si bien en el caso de retorno analógico se tiene un alcance más reducido debido a los requisitos de relación señal a ruido. La estandarización de esta aplicación está llevándola a cabo en USA la SCTE (Society of Cable Television Engineers). Los sistemas de acceso de bucle de abonado FTTC (fiber to the curb), FTTB (fiber to the building) o FTTH (fiber to the home), caracterizados por alcances de hasta 20km, constituyen otro campo de aplicación donde CWDM puede ser beneficioso.

Pero además del requisito de acomodar un amplio margen de alcances del sistema, los proveedores de servicio deben ser capaces también de proporcionar múltiples servicios (voz, vídeo y datos) a los usuarios finales a distintas longitudes de onda usando una variedad de protocolos y tasas de bit: SONET/SDH, ATM, QAM, ESCON, FICON, DV-6000, OC-3 hasta OC-48, Gigabit Ethernet, etc. En este caso, CWDM se ajusta perfectamente a este paradigma, ya que ofrece ancho de banda escalable de una forma económica. Si en un futuro se necesitara aumentar la capacidad por encima de los 16 canales, entonces podrían colocarse varios canales DWDM en sustitución de uno o dos canales CWDM de la banda C. Esta técnica se conoce como DWDM-over-CWDM y permite hacer crecer el sistema de una forma flexible con un coste inicial reducido.

La mayoría de sistemas CWDM que ya se encuentran implantados en la actualidad transportan tráfico de almacenamiento (SAN, storage area networking) de las redes de grandes empresas. Esta aplicación se encuentra en auge últimamente y los sistemas CWDM son un candidato ideal debido a su bajo coste, por lo que nadie se preocupa de desperdiciar un canal CWDM completo para transportar un flujo ESCON de 200Mbit/s.

Los fabricantes de routers y conmutadores Ethernet están añadiendo capacidades CWDM en sus equipos por medio de GBICs (gigabit interface converters). Por ejemplo, Cisco Systems ha incorporado GBICs en siete de sus productos. De hecho, más de veinte vendedores de sistemas

están ofreciendo soluciones CWDM en sus catálogos de productos. Según los analistas, el mercado mundial de sistemas CWDM durante el año pasado se situó en torno a los 100 millones de euros y se espera que en el futuro esta tecnología se convierta en un importante nicho de mercado. Para finalizar, en la tabla I se resumen a modo comparativo las características de las diferentes tecnologías WDM existentes.<sup>[10]</sup>

<b>Aplicación/parámetro</b>	<b>CWDM Acceso/MAN</b>	<b>DWDM MAN/WAN</b>	<b>DWDM Largo alcance</b>
<b>Canales por fibra</b>	4 – 16	32 – 80	80 – 160
<b>Espectro utilizado</b>	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
<b>Espaciado entre canales</b>	20nm (2500GHz)	0.8nm (100GHz)	0.4nm (50GHz)
<b>Capacidad por canal</b>	2.5Gbit/s	10Gbit/s	10 – 40Gbit/s
<b>Capacidad por fibra</b>	20 – 40Gbit/s	100 – 1000Gbit/s	>1Tbit/s
<b>Tipo de láser</b>	Uncooled DFB	Cooled DFB	Cooled DFB
<b>Tecnología de filtros</b>	TFF	TFF, AWG, FBG	TFF, AWG, FBG
<b>Distancia</b>	Hasta 80Km	Cientos de km.	Miles de km.
<b>Coste</b>	Bajo	Medio	Alto
<b>Amplificación óptica</b>	Ninguna	EDFA	EDFA, Raman

Tabla 5.4: Comparativa entre tecnologías WDM según el tipo de aplicación<sup>u</sup>.

<sup>u</sup> Tabla tomada de <http://www.radioptica.com>

## **CAPÍTULO 6**

### **MEDICIONES Y PROCEDIMIENTOS**

#### **6.1 Testeo de Empalmes**

##### **6.1.1 OTDR - Optical Time Domain Reflectometer - Reflectómetro Óptico**

Este es el elemento de prueba utilizado para la medición de las propiedades del cable de fibra óptica. Cada medición se entrega con un informe y el protocolo correspondiente. Para probar las fibras en una dirección, conectamos el OTDR a un extremo de la fibra óptica para adquirir una lectura que proveerá información sobre la continuidad del tramo de fibra, sobre la pérdida en cada empalme, la pérdida total (punta a punta), la atenuación característica de cada segmento de fibra en la red y la reflectancia de empalmes o conexiones, etc.

Como regla general, todas las mediciones reflectométricas se llevan a cabo en las ventanas de 1310nm y 1550nm. Las mediciones en la segunda ventana, permiten la evaluación de la instalación, mientras que la que se llevan a cabo en la tercera ventana demostrarán el impacto de las tensiones residuales y curvaturas en la fibra, lo que permite detectar defectos en la instalación. La tolerancia en la longitud de onda de trabajo del equipo es de 35nm para la segunda y tercera ventana. Cuando se analizan atenuaciones, las mismas son llevadas a cabo en ambas direcciones donde el valor real será la media aritmética en ambas direcciones. Si no conocemos el valor del índice de refracción, el valor adoptado es 1.4650.

##### **6.1.2 Aceptación del empalme**

Se entiende por sección a toda longitud de cable óptico comprendido entre dos terminaciones a nivel del distribuidor de fibra óptica o Patch Panel. La pauta de aceptación debe ser respetada para cada fibra óptica a nivel de sección. El valor de atenuación medio de todos los empalmes de fibra óptica no puede superar los 0.15dB.

El valor máximo de atenuación aceptado por empalme es de 0.2dB. Si el valor de atenuación del empalme resulta mayor de 0.2dB, el mismo se rehace hasta un máximo de tres intentos.

Todas las medidas de atenuación se efectúan en las longitudes de onda de 1310nm y 1550nm y en ambos sentidos, se considera como valor absoluto de pérdida el promedio obtenido en ambas mediciones.

### **6.1.2.1 Prueba de aceptación de empalme en el nivel de distribuidor de fibra óptica**

Dos tipos de configuraciones son diferenciados según utilicemos cable de acometida para terminaciones en edificios o se realice directo del cable exterior al distribuidor de fibra óptica debido a razones de implementación.

- *Acceso al edificio por medio de cable de acometida.* En esta configuración se entiende por conexión en el ámbito de distribuidor de fibra óptica al conjunto de discontinuidades de pérdida, formado por la pérdida intrínseca del conector, el empalme de unión pigtail-cable de acometida y el empalme de unión cable de acometida-cable exterior. La pérdida global no deberá ser superior a 0.8dB, considerando el promedio resultante de las mediciones efectuadas en ambos sentidos, a la longitud de onda de 1550 nm.
- *Acceso al edificio por medio del cable exterior.* En esta configuración, se entiende por conexión a nivel del distribuidor de fibra óptica al conjunto de discontinuidades de pérdida formado por la pérdida intrínseca del conector y el empalme de unión pigtail-cable entrante. La pérdida global no deberá ser superior a 0.7dB, considerando el promedio resultante de las mediciones efectuadas en ambos sentidos, en las longitudes de onda de 1310nm y 1550nm.

Para la medición deberán utilizarse dos bobinas de fibra óptica de una longitud no inferior a 1000m. Cada bobina deberá ser de la misma tecnología de fibra óptica que la utilizada por los cordones pigtail, debiendo ser acompañada por la certificación correspondiente. A los efectos de poder realizar la medición, uno de los extremos de la bobina deberá ser preconectorizado con el mismo tipo de conector empleado a nivel del distribuidor de fibra.

### 6.1.3 Medición de pérdida total

La pérdida total de cada sección (A), para cada fibra óptica deberá satisfacer la siguiente ecuación:<sup>[24]</sup>

$$A < aL + n(E)*a(E) + n(C)*a(D).$$

Estos símbolos equivalen a:

A: Atenuación total en el tramo.

a: Atenuación nominal de la fibra a la longitud de onda especificada (dB/km).

L: Longitud óptica total del tramo.

n(E): Número total de empalmes.

a(E): Valor medio de atenuación por empalme (dB).

n(C): Número de conectores.

a(D): Atenuación en la conexión a causa del distribuidor (dB).

donde:

$a = 0.22\text{dB/km}$  a 1550nm.

$a(E) = 0.15\text{dB}$ .

$a(D) = 0.8\text{dB}$  ó  $0.7\text{dB}$  según corresponda.

## 6.2 Medición de pérdidas en los empalmes

### 6.2.1 Atenuación por tramo

Es debida a las características de fabricación propia de cada fibra (naturaleza del vidrio, impurezas, etc.) y se mide en dB/Km, lo cual nos indica cuántos dB se perderán en un kilómetro.

### 6.2.2 Atenuación por empalme

Cuando empalmamos una fibra con otra, en la unión se produce una variación del índice de refracción lo cual genera reflexiones y refracciones, y sumándose la presencia de impurezas, todo esto resulta en una atenuación. Se mide en ambos sentidos tomándose el promedio. La medición en uno de los sentidos puede dar un valor negativo, lo cual parecería indicar una amplificación de potencia, lo cual no es posible en un empalme, pero el promedio debe ser positivo, para resultar una atenuación.

#### 6.2.2.1 Empalmes promediados

El resultado real de la medición de un empalme se obtiene midiéndolo desde un extremo, luego, en otro momento se medirá desde el otro, y finalmente se tomará como atenuación del empalme el promedio de ambas (suma sobre 2), como se muestra en la figura 6.1.

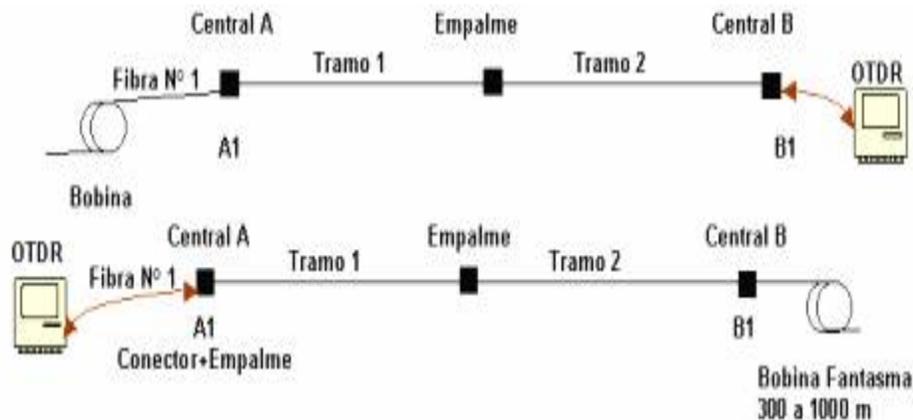


Figura 6.1: Medición de empalmes promediados<sup>a</sup>. (Tomada de [www.yio.com.ar](http://www.yio.com.ar))

<sup>a</sup> Figura tomada de <http://www.yio.com.ar>

### 6.2.2.2 Empalmes atenuados

En algunos casos, la atenuación de un tramo de FO es tan baja que en el final del mismo la señal óptica es demasiado alta y puede saturar o dañar el receptor.

Entonces es necesario provocar una atenuación controlada y esto se hace con la misma empalmadora, con la función de empalme atenuado. En la figura 6.2 se pueden ver todos los causales de atenuación geométrica.

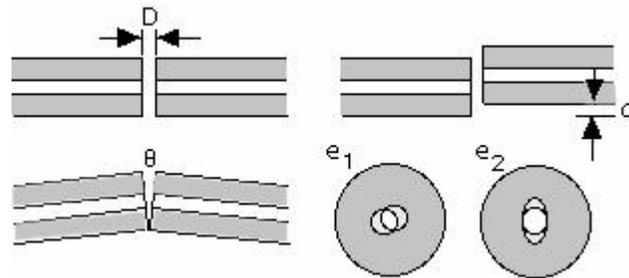


Figura 6.2: Representación de atenuaciones controladas<sup>b</sup>.

Entonces, para realizar empalmes atenuados una empalmadora puede desalinear los núcleos o darle un ligero ángulo a una de las dos fibras.

## 6.3 Ejemplos de mediciones y equipo para empalmes

### 6.3.1 Medición de atenuación total de un tramo (Medición de potencia)

Para medir la atenuación total de un enlace de fibra, se utilizan una fuente de luz y un medidor, que se conectarán en ambos extremos de la fibra a medir. Como se ilustra en la figura 6.3.

<sup>b</sup> Figura tomada de <http://www.yio.com.ar>

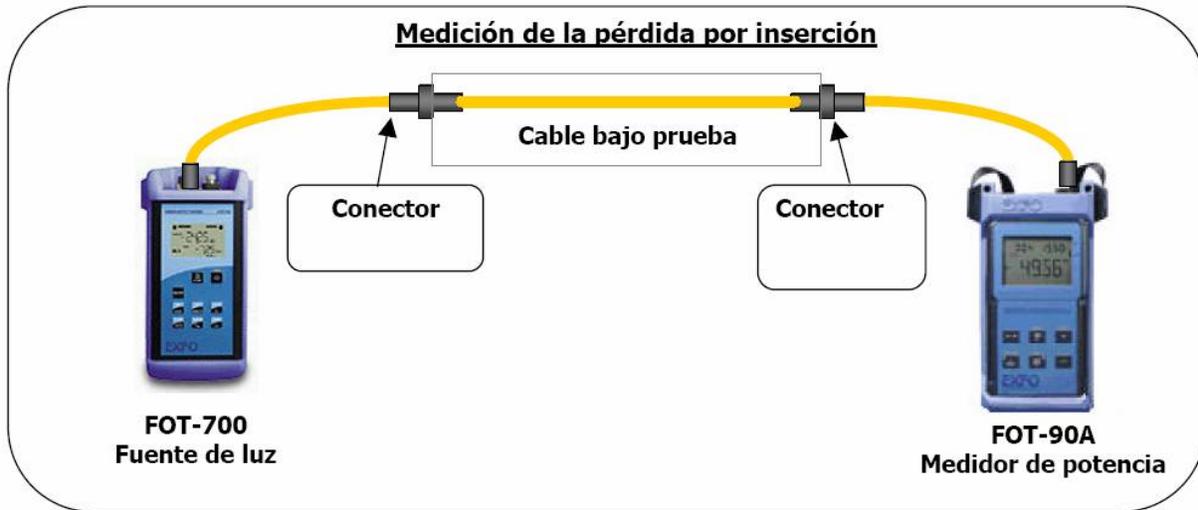


Figura 6.3: Medición de la atenuación total de un tramo<sup>c</sup>.

Entonces una Medición de Atenuación Total podría ser:

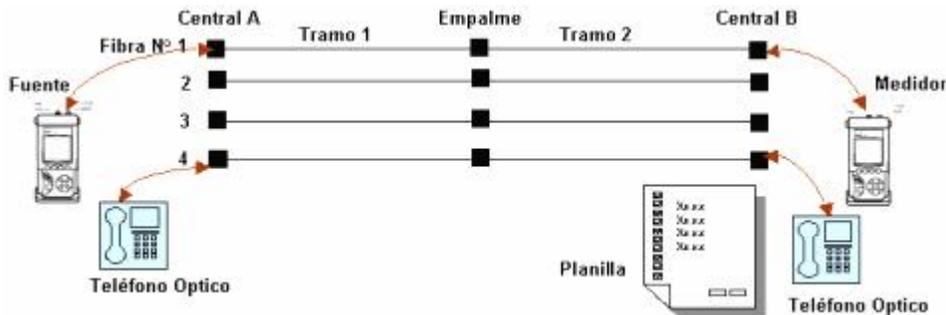


Figura 6.4: Ejemplo de una medición de atenuación total<sup>d</sup>.

### 6.3.2 Medición de atenuación por conectores

Cuando necesitamos medir la atenuación total de un tramo o pérdida de potencia, debemos excluir las atenuaciones producidas por los jumpers usados en la medición. Para esto, antes de realizarla, debemos conectar la fuente de luz al medidor de potencia con los mismos jumpers y adaptadores que usaremos luego (vea la figura 6.5), y seguir estos pasos:

- Encendemos ambos equipos
- Los ajustamos a CW (continuous wave-onda continua no pulsante)

<sup>c</sup> Figura tomada de <http://www.exfo.com>

<sup>d</sup> Figura tomada de <http://www.yio.com.ar>

- Elegimos la ventana deseada
- Presionamos ahora en el medidor el botón ABS>REF para almacenar el nuevo valor de referencia
- Entonces, al desconectar los jumpers entre sí y conectarlos a la fibra bajo prueba obtendremos el valor de atenuación de la fibra.

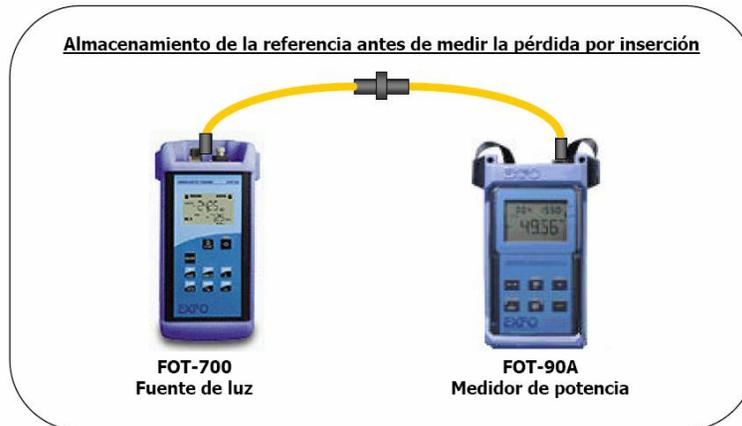


Figura 6.5: Medición de la atenuación producida por conectores<sup>e</sup>.

Los conectores utilizados a la salida de la fuente y a la entrada del medidor no deben desconectarse hasta no terminar todas las mediciones pues la atenuación producida por un conector varía cada vez que se vuelve a conectar. Para el caso de que un equipo posea los dos módulos en él, debe conectarse el jumper de medición entre su módulo emisor y su módulo medidor como se muestra en la figura 6.5, establecer la atenuación producida por este jumper para descontarla de la medición final, o, si el equipo lo permite, ajustar la referencia.

Paralelamente en el otro extremo de la fibra otro operador hará lo mismo con otro equipo. La ventaja de este método es que no es necesario que fuente y medidor deban encontrarse en el mismo lugar antes de medir.

<sup>e</sup> Figura tomada de <http://www.exfo.com>

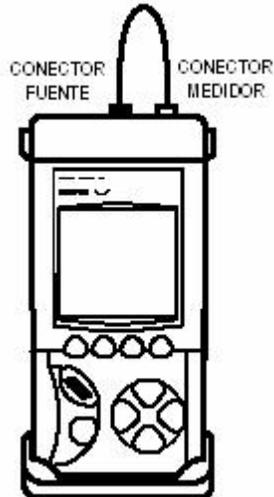


Figura 6.6: Medidor con ambos módulos (emisor y receptor)<sup>f</sup>.

### 6.3.3 Equipo básico para mediciones ópticas

#### 6.3.3.1 Fuente variable y medidor de potencia



Figura 6.7: Fuentes y medidores ópticos. Fuente Variable EXFOFLS-210<sup>g</sup>, Medidor de potencia EXFO FOT-90, Kit Fuente y Medidor Wandel & Goltermann GOMK6 SM<sup>g</sup>.

#### 6.3.3.2 Atenuadores ópticos variables

Tienen un conector de entrada y uno de salida. Producen una atenuación por fuga por curvatura (a través de un servomotor) o por algún otro método.

<sup>f</sup> Figura tomada de <http://www.exfo.com>

<sup>g</sup> Figura tomada de <http://www.yio.com.ar>



Figura 6.8: Atenuador EXFO<sup>h</sup>.

### 6.3.3.3 Identificador lumínico de fibras y roturas

Inyecta una luz visible sobre una fibra. Si hay alguna rotura, en un pigtail por ejemplo, se verá la luz dispersada. O podemos identificar una fibra entre un manajo, produciéndoles una curva, y entonces la que disperse luz será la fibra correspondiente al conector donde colocamos el láser.<sup>[23]</sup>



Figura 6.9: Identificador de fibras y fallas Wavetek VFF5 (Visual Fault Finder)<sup>h</sup>.

### 6.3.3.4 Detector de tráfico

Su función es la de detectar el tráfico y medir la señal en cualquier punto de las fibras monomodo o multimodo sin tener que desconectarlas. Utiliza una técnica segura de macroflexión, al flexionar ligeramente la fibra, la luz escapa y es capturada por el detector.

<sup>h</sup> Figura tomada de <http://www.yio.com.ar>

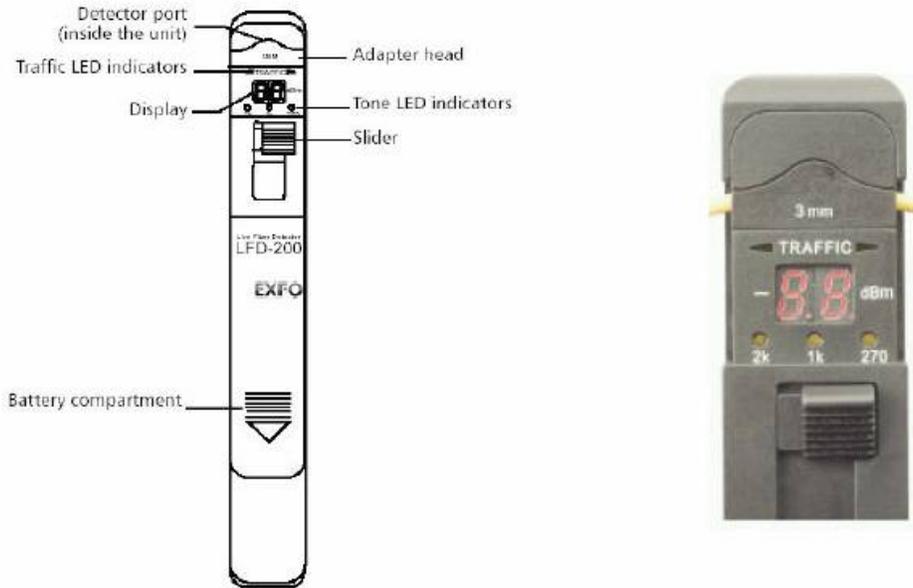


Figura 6.10: Detector de Tráfico EXFO LFD-200<sup>i</sup>.

### 6.3.4 Medición de PMD

Debido a las altas frecuencias normalmente utilizadas, la medición de la dispersión en tiempo real es poco práctica, así que se han propuesto dos planteamientos fundamentales para medir la PMD.

- El temporal
  - Barrido de longitudes de onda con transformación de Fourier.
  - Método Interferométrico.
- El Espectral
  - Barrido de longitudes de onda con cuantificación de extremos.
  - Método polarimétrico.

Según el primero, se evalúa la desviación promedio del tiempo de propagación de la señal en la fibra y, en el segundo caso, se calcula el promedio del retraso de los grupos diferenciales, que representan los diferentes estados de polarización. Dos métodos para medir la PMD derivan del primer enfoque y otros dos del segundo. El enfoque temporal hace uso del barrido de

<sup>i</sup> Figura tomada de <http://www.exfo.com>

longitudes de ondas con transformación de Fourier y del método interferométrico, y el enfoque espectral propone el barrido de longitudes de ondas con cuantificación de extremos y el método polarimétrico.

El método interferométrico es el más usado.

#### 6.4.1 Procedimiento para medir la PMD

El método de medición de PMD requiere el módulo WDM +PMD del MTS5100 de Alcatel, un polarizador óptico variable OVP – 15 en un extremo del enlace y un generador de banda ancha OBS – 15 en el otro extremo del enlace.

La función del OBS – 15 es generar una señal de banda ancha por el enlace para determinar la distorsión que sufre la señal en el dominio de la frecuencia.

El OVP – 15 deja pasar solo un modo de polarización; se utiliza para tomar una referencia de la distorsión de amplitud sufrida por la señal y descartar esa distorsión al analizar la señal que representa la suma vectorial de los modos, dejando apenas los efectos de la distorsión causada por las diferencias de fase entre los modos de polarización.

El módulo del MTS compara el espectro medido y la referencia sin el OVP – 15 para obtener los valores de retardo de un grupo diferencial, en ps y el coeficiente de PMD en  $ps/\sqrt{km}$ .

- 1- Conectar el módulo WDM – PMD en un extremo del enlace y el OBS – 15 en el otro extremo como se muestra en la figura 6.11.
- 2- Hacer una medición de referencia sin conectar el polarizador OVP – 15.
- 3- Una vez tomada la referencia, conectar el OVP – 15 con una polarización de  $0^{\circ}$  y presionar “START” en el MTS. Los resultados deben ser aproximadamente los mismos configurando cualquier ángulo de polarización en el OVP – 15.
- 4- Esperar los resultados.

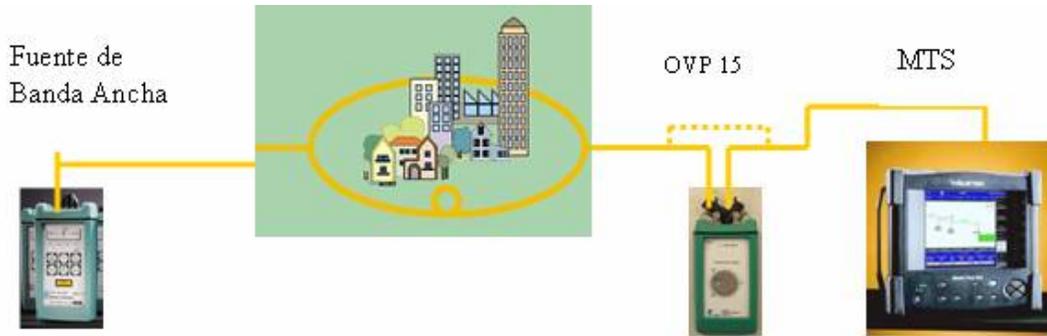


Figura 6.11 Conexión para la medición de PMD<sup>j</sup>.

### 6.4.2 Interpretación de resultados

El valor del coeficiente de PMD es un factor que limita la distancia máxima de enlace en transmisiones TDM de alta velocidad (10Gbps ó 40Gbps). Según las recomendaciones de la ITU – T, el valor máximo de retardo es la décima parte de la duración de un pulso (a mayores velocidades, la duración de los pulsos es menor). La distancia máxima que se puede alcanzar está dada por la siguiente relación:<sup>[33]</sup>

$$L \leq \Delta\tau^2 / \Delta\tau_c^2$$

Donde:

$\Delta\tau^2$  = Coeficiente de PMD ( ps/ $\sqrt{KM}$  )

$\Delta\tau_c^2$  = Retardo de PMD (ps)

<sup>j</sup> Figura tomada de <http://www.exfo.com>

## CAPÍTULO 7

### COMPONENTES Y REDES DE ALTA CAPACIDAD

En este capítulo se hace referencia a los aspectos y características que definen a las redes de larga distancia (alta capacidad) y los componentes ópticos, dado que en los capítulos anteriores se ha hecho mención a la mayoría de los conceptos que a continuación se enumeran, la metodología que se emplea es la síntesis de los parámetros a contemplar para poder alcanzar el grado de complejidad requerido por dichas redes, esto con la finalidad de evitar la redundancia de información.

#### 7.1 Redes ópticas de larga distancia

##### 7.1.1 Ventajas

- Conectividad:
  - Ofrecen soporte a un gran número de estaciones y usuarios finales.
  - Soportan un gran número de conexiones concurrentes, incluyendo múltiples conexiones por estación.
  - Soportan eficientemente la facilidad de “multicast” (difusión).
- Transporte de velocidades por encima de 10Gb/s por fibra.
- Rendimiento:
  - Alta velocidad de usuarios (Gb/s).
  - Pequeño retardo en las conexiones end to end.
  - Baja tasa de error (digital) o alto nivel de SNR (analógico).
  - Baja carga de procesado en los nodos y estaciones.
  - Adaptabilidad a cambios y niveles de tráfico.
  - Eficiente y rápida localización de fallo y su recuperación.
- Flexibilidad para ajustarse a las demandas de tráfico.
- Aspectos estructurales:
  - Escalabilidad.

- Modularidad.
- Tolerancia a fallos.
- Alta calidad del servicio (alta velocidad de restauración).
- Sistemas de gestión eficientes compatibles con los emergentes (TMN).

### 7.1.2 Retos

- Minimizar el coste y el número de regeneradores
- Evitar regeneradores optoelectrónicos: paso óptico por los nodos
- Procesado óptico: conmutación, filtrado...

### 7.1.3 Problemas

- Acumulación de ruido óptico
- No uniformidad de la ganancia espectral (amplificadores ópticos)
- Distorsión:
  - Dispersión cromática
  - Dispersión por modo de polarización
  - No linealidades ópticas

### 7.1.4 Tecnología WDM en las OTN (Optical Transport Network)

#### 7.1.4.1 Aspectos de la transmisión de los sistemas DWDM

- El dispositivo fundamental es el **amplificador óptico**.
- La capacidad agregada de una fibra es la capacidad de cada  $\lambda$  (B) por el número de éstas (N)  $B_{tot}=B*N$ .
- Esta circunstancia permite mantener una B media (2.5Gb/s), y no padecer los problemas asociados a la **dispersión cromática, PMD**.
- Pueden aparecer por el contrario efectos propios del WDM como son los fenómenos no lineales **FWM** (Four Wave Mixing), **XPM** (Cross Phase Modulation)

- Estos efectos se limitan utilizando fibras con dispersión no nula (incluso alta, SSMF), en combinación de técnicas de compensación de dispersión o sistemas con **gestión de dispersión**.
- Compatibilidad con las redes existentes (PDH, SDH o ATM).

#### 7.1.4.2 Características de las redes WDM

- Reutilización de longitudes de onda.
- Conversión de longitud de onda.
- Transparencia.
- Conmutación de circuitos.
- Supervivencia.
- Topología de caminos ópticos.

#### 7.1.5 Ruido en sistemas de LD amplificados

Los EDFA's amplifican unos 40 canales DWDM con un espaciado de 100GHz, existen EDFA's de bandas C y L. En el detector se produce un ruido de batido entre la señal y la emisión espontánea amplificada (ASE). Existen diversos métodos para aumentar el OSNR

- Reduciendo Lspan.
  - Normalmente en líneas submarinas  $L_{span}=10$  dB (50 Km).
  - En líneas terrestres es difícil reducirlo debido a los costes.
- Aumentando Pout (solo hasta cierto punto, para evitar no linealidades).
- Reduciendo NF del amplificador (limitado a 3 dB en amplificadores de ganancia altas).
- La amplificación distribuida RAMAN mejora el OSNR (como si el amplificador estuviera al final del enlace)
  - Los enlaces pueden ser más largos.
  - No necesita localización como en amplificadores discretos.
  - Pueden emplearse potencias de canal menores para mitigar las interacciones no lineales entre canales.

- Empleando FEC puede mejorarse el BER (El OSNR mejora y se permiten enlaces de mayor alcance).
  - El FEC aumenta el régimen binario por lo que el OSNR que se requiere es ligeramente mayor.
  - El más empleado es un FEC Reed Solomon que aumenta un 7% el régimen binario pero introduce una ganancia de código de 6 dB en redes de larga distancia.
  - Es más crítico a 40 Gb/s, pues se requiere OSNR muy alta.

### **7.1.6 Formatos de modulación utilizados en redes de LD**

- En redes de larga distancia se emplea codificación NRZ.
- Cuando  $B=2.5\text{Gb/s}$  y en distancias largas se emplea modulación externa debido al efecto del chirp introducido en la modulación directa.
- La modulación RZ es más compleja, pero garantiza un mejor funcionamiento, además es más robusta frente a distorsiones en el sistema.
- Otros formatos de modulación son Carrier Supressed RZ o Chirped RZ eliminan interacciones no lineales entre canales.
- Si el sistema lo permite se emplean solitones en los cuales los efectos de automodulación de fase y dispersión se compensan para mantener la forma de los pulsos a lo largo de todo el enlace.

## **7.2 Componentes ópticos**

### **7.2.1 Terminales de línea ópticas (OLT's)**

Multiplexan y demultiplexan varias longitudes de onda de una o varias fibras de entrada a una o varias de salida. Estos comprenden:

- Transpondedores (O/E/O)
  - Conversión de longitud de onda
  - Añadir cabeceras de gestión

- Corrección de errores FEC
- Monitorizar BER
- Multiplexores de longitud de onda
- Amplificadores (opcional)
- Transmite y recibe el canal de supervisión

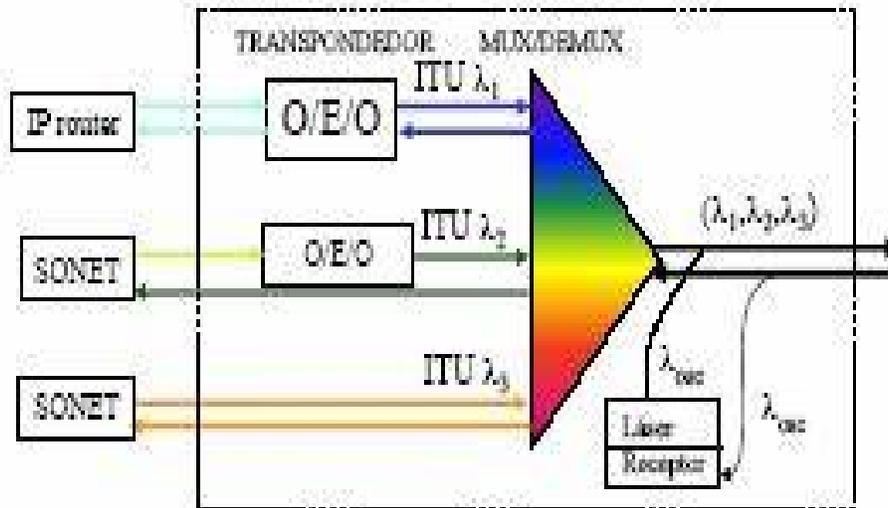


Figura 7.1: Esquema representativo de una Terminal de línea óptica<sup>cccc</sup>.

### 7.2.2 Multiplexores ópticos Add/Drop (OADM)

Toman una señal WDM de su puerto de entrada extrayendo de forma selectiva algunas longitudes de onda hacia sus puertos locales dejando pasar el resto intacto al puerto de salida. Al mismo tiempo puede inyectar selectivamente longitudes de onda desde sus puertos locales hacia el puerto de salida. Proporcionan una solución eficiente (coste) para gestionar el tráfico de paso en redes Metro y WAN. Pueden implementarse en las redes de larga distancia junto a los amplificadores o solos.

<sup>cccc</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

### 7.2.2.1 Utilidad de los OADM's

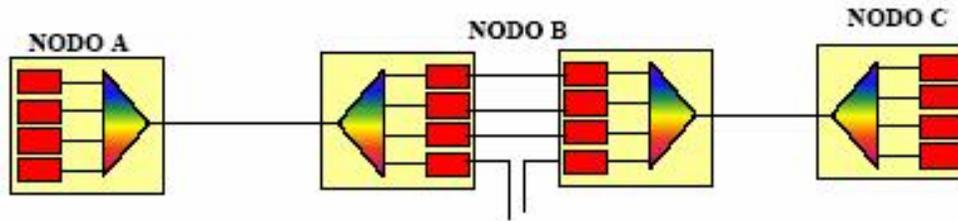


Figura 7.2: Conexión de dos nodos mediante 2 enlaces punto a punto<sup>dddd</sup>.

En el ejemplo de la figura 7.2 la conexión entre nodos mediante 2 enlaces punto a punto requiere 8 transpondedores.

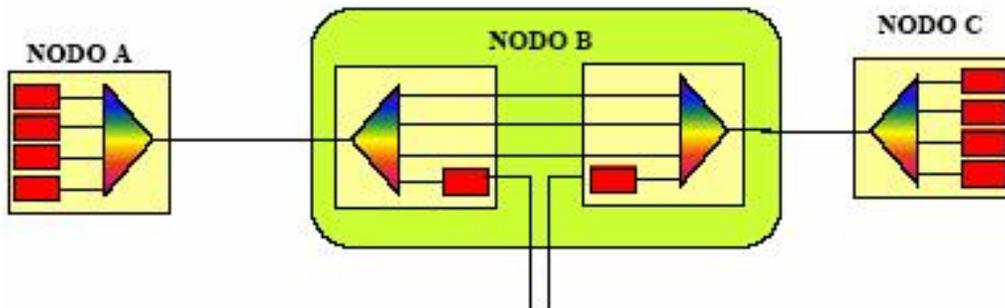


Figura 7.3: Esquema de utilización de un OADM<sup>b</sup>.

Insertando un OADM se ahorran 6 transpondedores y se da idéntico servicio. Los OADM ayudan a ahorrar componentes fotónicos introduciendo encaminamiento en la capa óptica. Los OADM pueden implementarse empleando diversos componentes (redes de Bragg AWG's, filtros multicapa, etc.).

Desde el punto de vista de caja negra, es importante en un OADM:

- Número de longitudes de onda que puede soportar.
- Restricciones sobre las longitudes de onda extraídas/insertadas (una, varias, grupos o bandas).
- ¿Qué tan fácil es insertar/extraer un canal adicional?

<sup>dddd</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

- ¿Es modular? (coste proporcional al número de cables).
- Complejidad de su diseño físico de transmisión y como afecta la adición de nuevos canales.
- ¿Es reconfigurable? (Capacidad para la selección dinámica de las longitudes de onda extraídas e insertadas).

### 7.2.2.2 Configuraciones

Configuración paralelo: Conmutación de  $\lambda$  (wavelength routing)

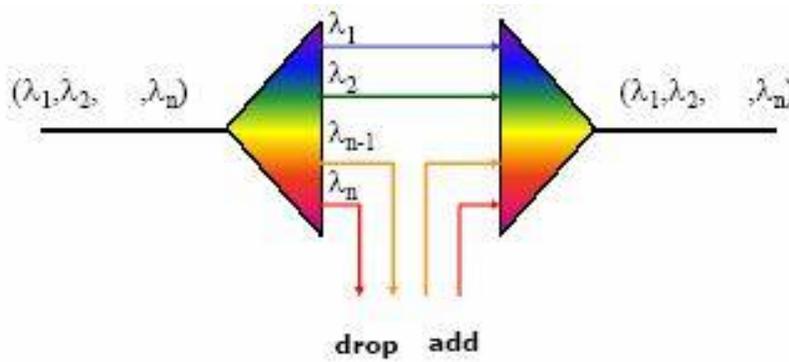


Figura 7.4: Configuración paralelo, conmutación de longitud de onda<sup>eeee</sup>.

Configuración paralelo: Conmutación de banda (waveband routing)

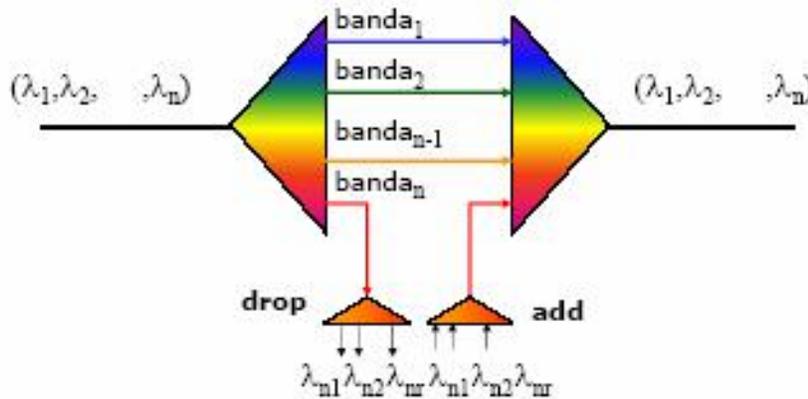


Figura 7.5: Configuración paralelo, conmutación de banda<sup>c</sup>.

<sup>eeee</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

Configuración serie: conmutación de  $\lambda$  (waveband routing)

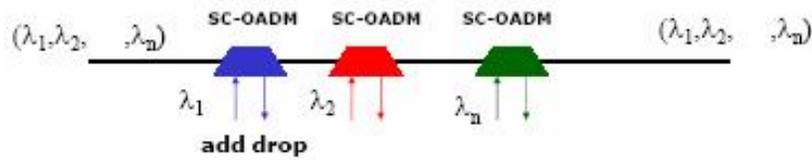


Figura 7.6: Configuración serie, conmutación de longitud de onda<sup>ffff</sup>.

Configuración serie: Conmutación de banda (waveband routing)

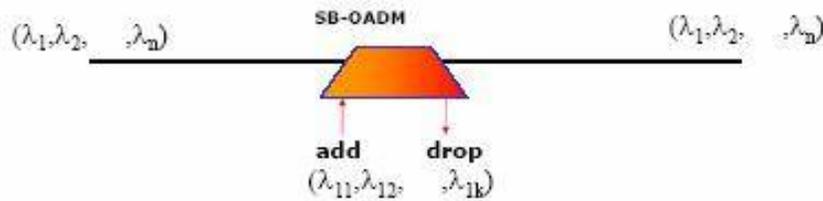


Figura 7.7: Configuración serie: Conmutación de banda<sup>d</sup>.

### 7.2.2.3 Requisitos ideales de los OADM's

- Deben poderse configurar para extraer un número máximo de canales.
- La selección de canales a extraer debe poderse realizar por el usuario mediante el control remoto, incluyendo los transpondedores sin afectar a los que ya operan.
- No deben forzar al usuario a realizar una planificación de antemano de los canales que deben extraerse en un nodo.
- Deben mantener pérdidas constantes independientemente del número de canales que se deseen extraer.

<sup>ffff</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

### 7.2.3 Filtros ópticos

#### 7.2.3.1 Redes de difracción de Bragg en fibra (FBG) con WDM

Las redes de difracción en fibra presentan los siguientes aspectos:

- Tecnología madura.
- Integración con fibra.
- Repetibilidad y reversibilidad.
- Adecuado nivel de BER.
- Alta SNR.
- Sintonizabilidad.
- Bajas pérdidas de inserción.
- Insensible a la polarización.
- Bajo coste.

La figura 7.8 muestra de manera sencilla la función de un FBG, el espectro incidente con todas sus componentes cromáticas llega al FBG, donde para obtener una componente específica se deja pasar a las demás a excepción de ésta que es conseguida como un espectro reflejado. Otra visión de lo dicho se ve en la figura 7.9.

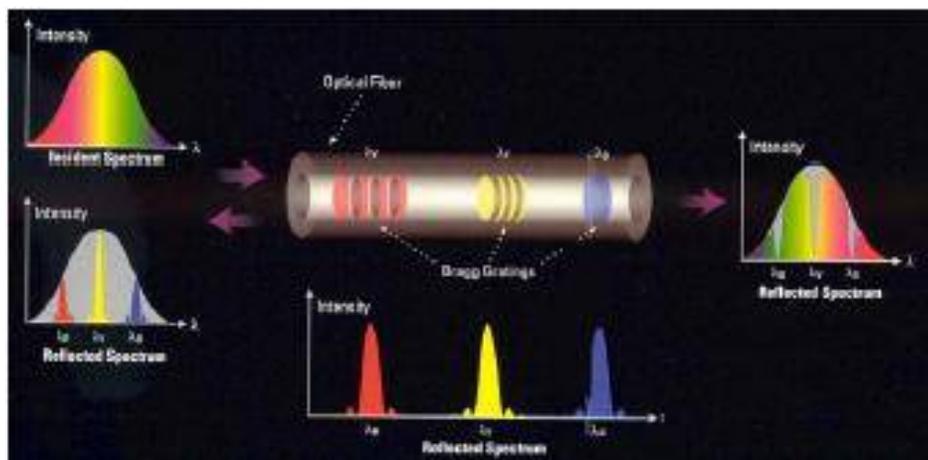


Figura 7.8: Funcionamiento de un FBG<sup>ggggg</sup>.

<sup>ggggg</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

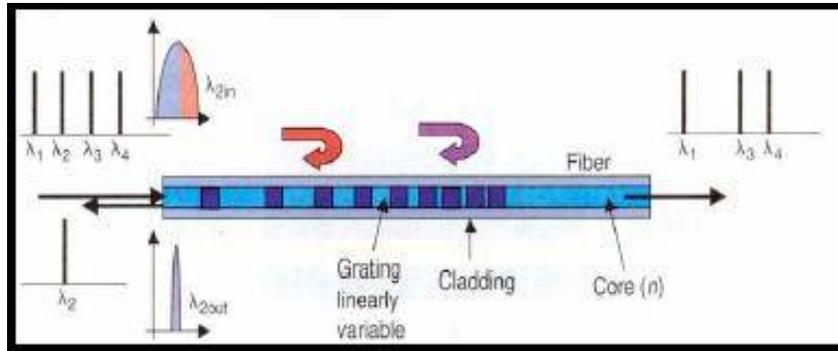


Figura 7.9: Selección de una longitud de onda específica con un FBG<sup>hhhh</sup>.

Lo anterior permite implementar un OADM como se muestra en la figura 7.10

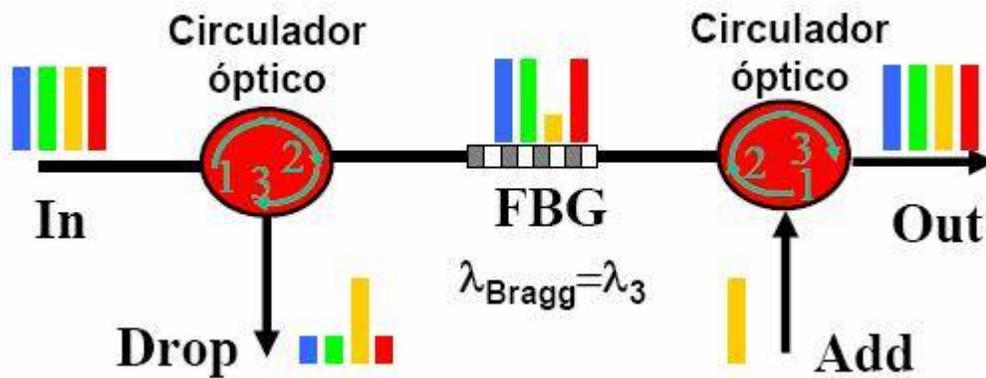


Figura 7.10: OADM implementado con un FBG<sup>f</sup>.

La figura muestra la utilización de un FBG para lograr la función de un OADM, para el caso el circulator óptico en función con el FBG seleccionan la 3er. longitud de onda del espectro de entrada (extracción), y posteriormente el segundo circulator óptico permite la inserción de una longitud de onda en el espacio obtenido en el paso anterior.

<sup>hhhh</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

### 7.2.3.2 Filtros de capas (Thin – Film Filters, TFF)

Se pueden definir como un array de filtros de bajo coste sintonizable mediante un sistema electro – mecánico con las siguientes características:

- Estabilidad con la temperatura.
- Bajo coste.
- Baja diafonía.
- Bajas pérdidas de inserción.
- Baja dependencia con la polarización.
- Tiempos de conmutación reducidos (ms).
- Compacto.
- Resolución de 0.1nm.

La figura 7.11 muestra la estructura de funcionamiento de los TFF's y la figura 7.12 muestra su función como OADM.

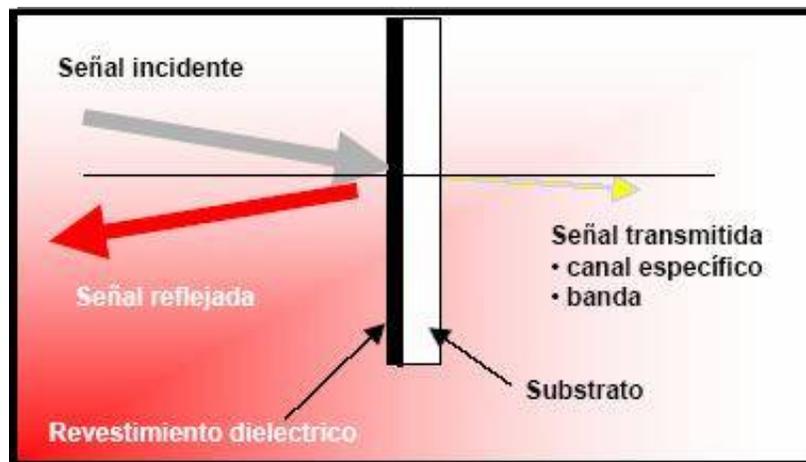


Figura 7.11: Estructura de funcionamiento de un TFF<sup>iiii</sup>.

<sup>iiii</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

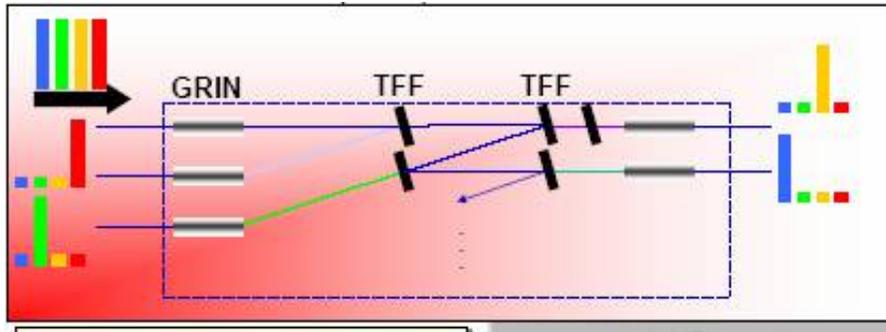


Figura 7.12: Utilización de un TFF como OADM<sup>iiii</sup>.

### 7.2.3.3 Filtro acústico – óptico, AOTF

La onda acústica crea una red de difracción de Bragg sobre la guía – onda, que realiza la selección en longitud de onda, se muestra en la figura 7.13. Ésta depende de la longitud de onda acústica. Sus características son:

- Alta velocidad de sintonización.
- Altas pérdidas de inserción.
- Necesidad de varios AOTF.
- Tecnología menos desarrollada, aunque disponible.
- Difícil integración.
- Sintonización muy sencilla y precisa mediante RF.
- Bajo número de longitudes de onda extraídas (8).
- Espaciado único de 100GHz.



Figura 7.13: Filtro acústico – óptico<sup>h</sup>.

<sup>iiii</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

### 7.2.3.4 Filtros ópticos con interferómetros Mach – Zehnder

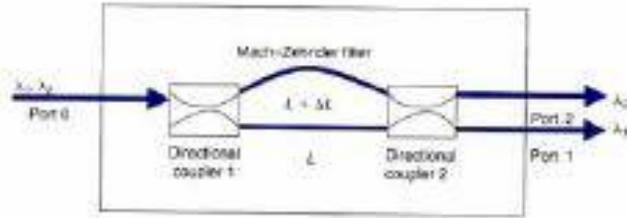


Figura 7.14: Filtro Mach – Zehnder<sup>kkkkk</sup>.

### 7.2.3.5 Filtros Arrayed Waveguide Grating (AWG)

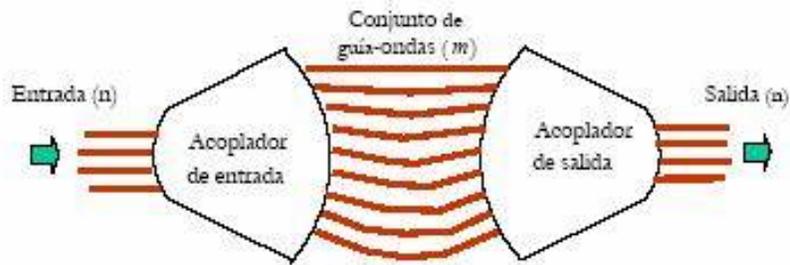


Figura 7.15: Filtro AWG<sup>i</sup>.

### 7.2.3.6 Parámetros de los filtros ópticos

Parámetro	Símbolo	Unidades
Pérdidas de inserción en el pico	$IL_p$	dB
Longitud de onda central	$\lambda_c$	nm
Anchura de banda a 0.5dB	$BW_{0.5dB}$	nm
Anchura de banda a 25dB	$BW_{25dB}$	nm
Banda de paso	$BW_{PB}$	nm
Máximas pérdidas de inserción en la banda	$IL_{max}$	dB
Rizado	DIL	dB
Pérdidas dependientes a la polarización	PDL	dB
Coefficiente de cambio con la temperatura	CTW	pm/°C

Tabla 7.1 Parámetros básicos de los filtros ópticos<sup>i</sup>.

<sup>kkkkk</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

## 7.2.4 Matriz de conmutación óptica u optical cross connect (OXC)

Es capaz de conmutar una longitud de onda presente en uno de sus puertos de entrada hacia cualquier puerto de salida. La conmutación puede llevar aparejada o no conversión de longitud de onda.

### 7.2.4.1 Características

- Elemento básico de conmutación óptica.
- Proporciona conectividad entre N puertos de entrada y N puertos de salida.
- Cada puerto gestiona un conjunto de señales multiplexadas.
  - Conmutación por fibra: se conmutan conjuntamente todas las longitudes de onda que transporta la fibra.
  - Conmutación por longitud de onda: se conmutan individualmente cada longitud de onda.
- El OXC soporta las reconfiguraciones de la red, permitiendo la gestión eficiente de los canales (es un elemento clave).
- Se requiere para gestionar recursos en redes con topologías de malla complejas.
- No incluye los OLT's.
- Proporciona soporte de tráfico express (bypass) así como para el local originado en equipos conectados a él a través de WDM.
- Internamente el OXC puede ser todo óptico o híbrido óptico/eléctrico, se ilustra en las figuras 7.16, 7.17, 7.18, 7.19.



Figura 7.16: OXC con núcleo eléctrico<sup>iiii</sup>.

<sup>iiii</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>



Figura 7.17: OXC con núcleo óptico y convertidores O/E/O<sup>mmmmm</sup>.



Figura 7.18: OXC con núcleo óptico conectado directamente a transpondedores WDM<sup>k</sup>.



Figura 7.19: OXC todo óptico<sup>k</sup>.

De los OXC se puede decir que son eficientes en términos de coste al ahorrar transpondedores y convertidores O/E y E/O, sin embargo, no incorporan tres funciones importantes:

- Agrupamiento de tráfico de baja velocidad (necesario para agregar señales y rellenar completamente canales de longitud de onda).
- Conversión de longitud de onda (necesaria para reutilizar eficientemente el recurso de longitud de onda).
- Regeneración de señales.

<sup>mmmmm</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

#### **7.2.4.2 Funciones de un OXC**

- Aprovisionamiento de servicio.
- Protección.
- Transparencia a velocidad binaria.
- Acceso a puntos de prueba, monitorización y localización de fallos.
- Conversión de longitud de onda.
- Multiplexación y agrupamiento (grooming).

#### **7.2.4.3 Estructura funcional de un OXC**

Comprende dos partes funcionales:

- El núcleo de conmutación: contiene al conmutador central propiamente dicho.
- La zona de puertos: aloja las tarjetas de los puertos que se emplean como interfaces para comunicarse con otros equipos. Estos puede incluir (o no) convertidores O/E ó O/E/O.

#### **7.2.5 Conversores de longitud de onda**

- Convierten una longitud de onda de entrada a una longitud de onda de salida posiblemente diferente, dentro del conjunto de canales que permite el sistema.
- Necesario en dispositivos de encaminamiento cuando es preciso cambiar la longitud de onda (porque la de origen está ocupada).
- Aumentan la posibilidad de reutilizar de las longitudes de onda entre un 10% y un 40%.
- Transparente a tasas de bit y formatos de señal.

### 7.2.5.1 Clasificación

Por su funcionalidad:

- Entrada y salida variables.
- Entrada variable y salida fija
- Entrada fija y salida variable.

Por su mecanismo de funcionamiento:

- Optoelectrónicos.
- Optical Grating.
- Interferométricos.
- Mezclado de ondas.

### 7.2.5.2 Conversión de longitud de onda optoelectrónica

La señal es detectada, regenerada y retransmitida empleando otro láser que emite una longitud de onda distinta a la inicial.

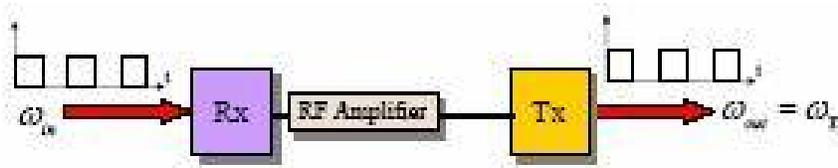


Figura 7.20: Conversión optoelectrónica<sup>nnnn</sup>.

### 7.2.5.3 Conversión de longitud mediante Optical Gating

Optical Gating emplea un dispositivo óptico cuya respuesta cambia dependiendo de la intensidad de una señal de entrada.

<sup>nnnn</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

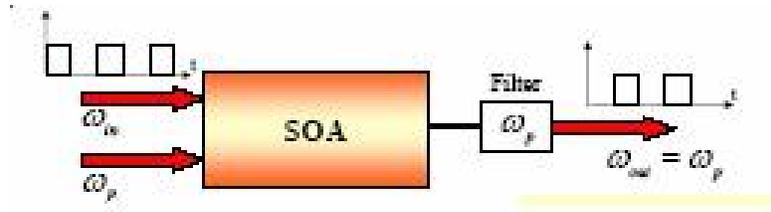


Figura 7.21: Conversión Optical Gain<sup>oooo</sup>.

### 7.2.5.4 Conversión de longitud mediante técnicas interferométricas

La variación de densidad de portadores en el SOA con la intensidad de la señal de entrada produce un cambio en el índice de refracción, que a su vez, provoca la modulación de fase de la señal de control. Ésta es convertida en modulación de intensidad en un interferómetro Mach – Zehnder.

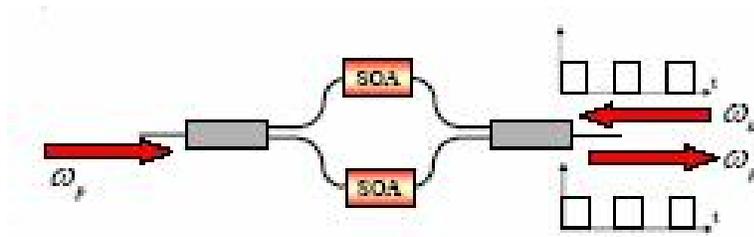


Figura 7.22: Conversión interferométrica<sup>m</sup>.

### 7.2.5.5 Conversión de longitud mediante mezclado de ondas

Se emplea el efecto no lineal de mezclado de cuatro ondas para conseguir la conversión de longitud de onda.<sup>[31]</sup>



Figura 7.23: Conversión con mezclado<sup>m</sup>.

<sup>oooo</sup> Figura tomada de <http://www.ice.org>

## CONCLUSIONES

Los grandes avances logrados en el campo de las comunicaciones ópticas desde la aparición de la primera fibra óptica con las características necesarias para utilizarse como medio de comunicación, han sido de suma importancia para considerar a las redes ópticas como la infraestructura de backbone en las redes de larga distancia actuales, las atenuaciones en dichas redes han ido disminuyendo con el paso del tiempo y la mejora de los métodos de fabricación de fibras, receptores, transmisores e instrumentos de medición han permitido incrementar la complejidad de estas redes.

De igual manera en el que estos componentes se desarrollan y la complejidad de las redes ópticas va en aumento, surgen métodos de amplificación más eficaces los cuales permiten lograr alcanzar grandes distancias, siendo de mayor uso los amplificadores de fibra dopada con Erblio y la amplificación Raman, con los cuales se tienen más posibilidades de adecuarse a las necesidades de ancho de banda requerido por las redes de alta capacidad.

Pero al hablar de incrementar distancias, físicamente también se ha mejorado la manera en la que las fibras se conectan entre sí, habiendo mejoras en los conectores y máquinas de empalme que mantienen la atenuación tan baja que en ciertos casos puede ser imperceptible para los instrumentos de medición existentes.

Cabe hacer mención que la medición y monitoreo de las redes ópticas es de suma importancia, puesto que de esta manera se puede mantener la confiabilidad y rendimiento de la red, pero así mismo, la detección de fallas se hace mas fácil y su reparación puede efectuarse de manera eficaz, dando la posibilidad de mantener un servicio ininterrumpido.

Para lograr esto han surgido diversos sistemas o estándares de comunicación los cuales establecen una “lógica” de funcionamiento de las redes ópticas, dichos estándares han permitido incrementar el ancho de banda que podemos utilizar en una fibra óptica pero también permiten el uso de sistemas de detección de errores, recuperación ante fallos y respaldo de ruta de comunicación. De gran ayuda para estos estándares ha sido el desarrollo de técnicas de

multiplexado tanto en el dominio del tiempo como en el aspecto óptico, siendo de nuestro interés el DWDM que permite el multiplexar una gran cantidad de información en una sola fibra.

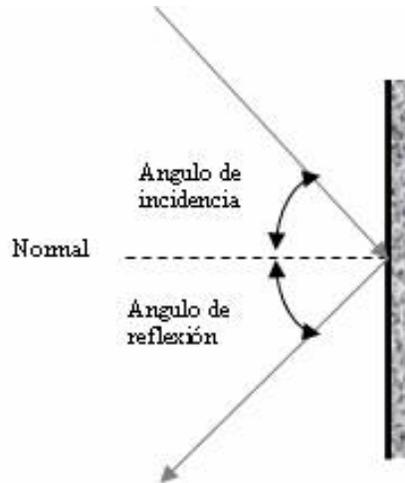
Tanto estudios como mejoras recientes se enfocan en controlar los parámetros que caracterizan a una fibra óptica, las tendencias apuntan a buscar obtener fibras con mejores áreas efectivas, menores coeficientes de dispersión, y mejores desempeños en general según la aplicación, se debe recordar que por ejemplo, la PMD, es de suma importancia cuando se habla de aumentar la capacidad de transmisión de una fibra, ya que a mayor capacidad es menor el coeficiente de PMD permitido.

Cabe hacer mención que también se ha trabajado en busca de desarrollar fibras específicas para cada necesidad, tómesese el caso de una red metropolitana y una de larga distancia, en ambas los caudales de información podrán ser iguales, pero las distancias de transmisión no son las mismas, y éste hecho hace una gran diferencia, ya que se puede obtener un ahorro en costes si se utilizan fibras correctas para cada aplicación.

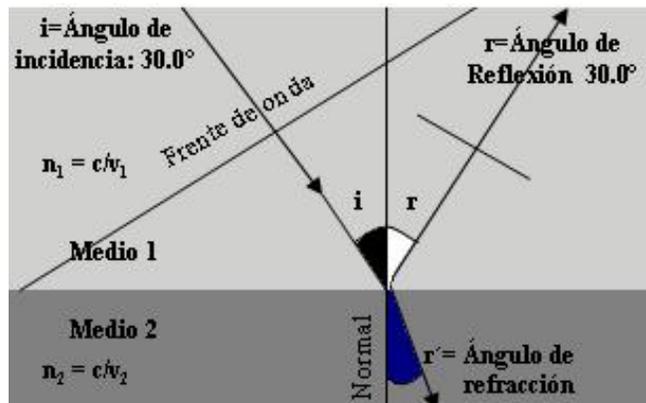
Las ventajas de la fibra óptica para establecer un sistema de comunicación confiable y de gran capacidad a larga distancia, se están haciendo presentes también para instalaciones de última milla, es decir, su aplicación se está extendiendo al usuario final y no solamente a operadores de servicios de gran capacidad. La fibra óptica es y representa un medio de comunicación con gran futuro.

## GLOSARIO

**Ángulo de incidencia y ángulo de reflexión:** Se llama ángulo de incidencia “ $i$ ” el formado por el rayo incidente y la normal. La normal es una recta imaginaria perpendicular a la superficie de separación de los dos medios en el punto de contacto del rayo. El ángulo de reflexión “ $r$ ” es el formado por el rayo reflejado y la normal, en la figura se muestran los ángulos mencionados.

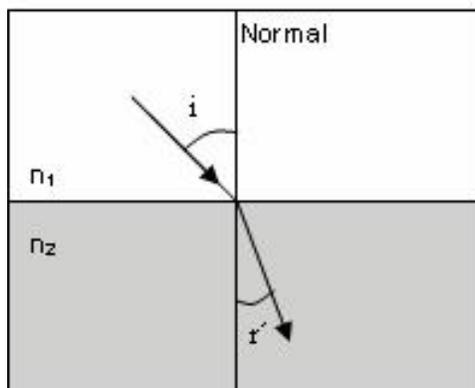


**Ángulo de incidencia y ángulo de refracción:** Siempre que un rayo pasa de un medio menos denso a uno más denso, se dobla hacia la normal. Al revés, siempre que un rayo pasa de un medio más denso a uno menos denso se dobla alejándose de la normal. Se llama ángulo de incidencia “ $i$ ” el formado por el rayo incidente y la normal. El ángulo de refracción “ $r$ ” es el formado por el rayo refractado y la normal.



**Ángulo límite o ángulo crítico:** Cuando se estudia el caso en que la luz pasa de un medio menos denso a otro más denso (esto es,  $n_2 > n_1$ , como por ejemplo de aire a vidrio o de aire a agua). El ángulo de incidencia va a ser siempre mayor que el de refracción como se muestra en la figura.

$$(i > r')$$

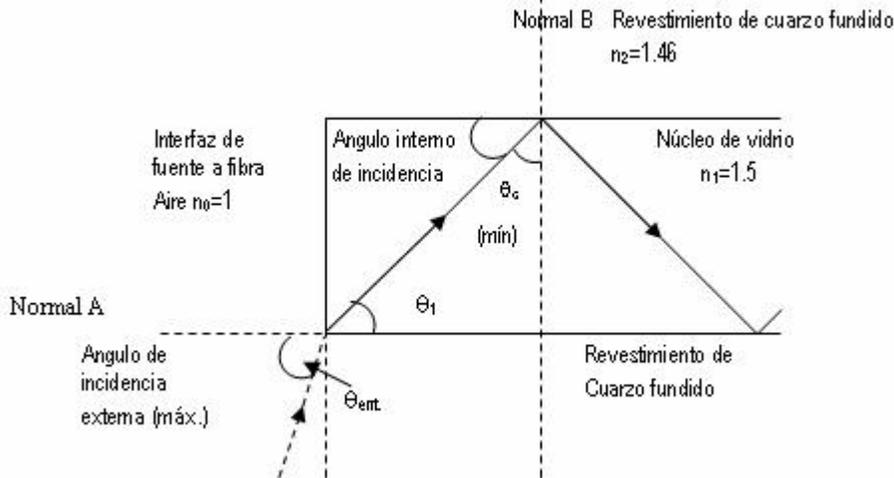


Sin embargo, cuando se produce la refracción entre un medio cualquiera y otro menos denso que él (o sea,  $n_1 > n_2$ , como por ejemplo vidrio a aire o agua a aire). El ángulo de refracción va a ser siempre mayor que el de incidencia.

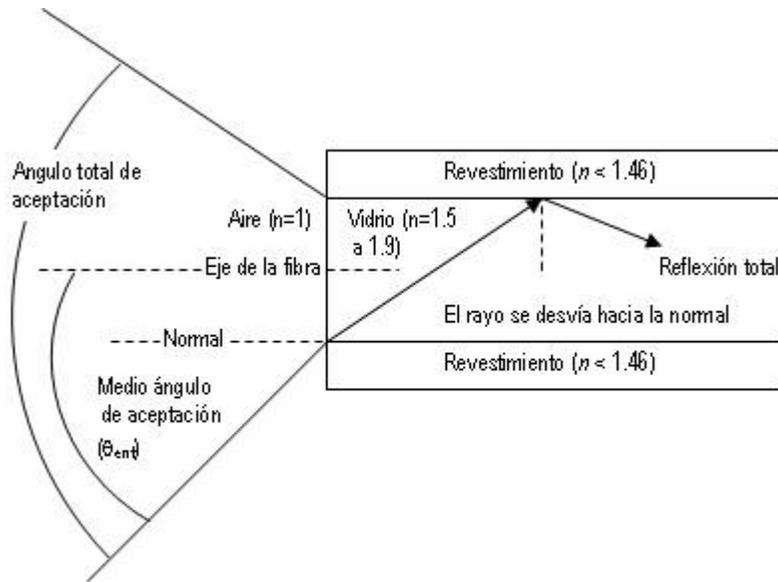
Se define el ángulo límite,  $i_{lim}$ , como el ángulo de refracción a partir del cual desaparece el rayo refractado y toda la luz se refleja. Como el valor máximo del ángulo de refracción, a partir del cual todo se refleja, es  $r'_{max}=90^\circ$ , podremos conocer el ángulo límite por la ley de Snell. Para ángulos de incidencia mayores a él, el ángulo de refracción será mayor de  $90^\circ$  y el rayo no será refractado, puesto que no pasa de un medio a otro, y se produce una reflexión total interna.

**Ángulo y cono de aceptación:** La figura representa el extremo del cable de fibra óptica que da a la fuente. Cuando los rayos de luz entran a la fibra, llegan a la interfaz aire-vidrio en la normal A. El índice de refracción del aire es 1, y el del núcleo de vidrio es 1.5. En consecuencia, la luz que entra a la interfaz aire-vidrio se propaga desde un medio menos denso a uno más denso. Bajo estas condiciones, y de acuerdo con la ley de Snell, los rayos de luz se refractan acercándose a la normal. Esto hace que los rayos cambien de dirección y se propaguen en dirección diagonal por

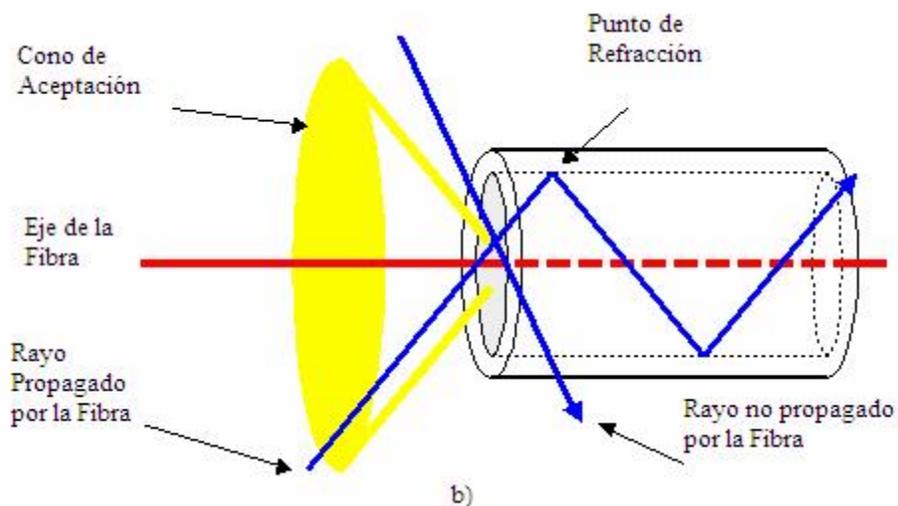
el núcleo, en el ángulo  $\theta_c$ , distinto del ángulo externo de incidencia  $\theta_{ent}$  en la interfaz aire-vidrio. Para que un rayo de luz se propague por el cable debe llegar a la interfaz entre el núcleo y revestimiento formando un ángulo que sea mayor que  $\theta_c$ , el ángulo crítico.



A  $\theta_{ent}$  se le llama *ángulo de aceptación*, o medio ángulo del *cono de aceptación*. Define al ángulo máximo que pueden formar los rayos luminosos externos al llegar a la interfaz aire-fibra para poder propagarse por la fibra, con una respuesta no mayor de 10 dB menos que el valor máximo. En la figura (a) se ve el ángulo de aceptación. Al girar este ángulo en torno al eje de la fibra se obtiene el *cono de aceptación* de la entrada de la fibra, que se ve en la figura (b).



(a)



**Apertura numérica (NA, de *numerical aperture*):** se relaciona en forma estrecha con el ángulo de aceptación y es la figura de mérito que se suele usar para medir la magnitud del ángulo de aceptación. En esencia, se usa la apertura numérica para describir la capacidad de reunir la luz que tiene una fibra óptica. Mientras mayor sea la magnitud de la apertura numérica, la fibra acepta mayor cantidad de luz externa. Los rayos de luz que entran al cable desde el exterior del cono de aceptación entrarán al revestimiento y, en consecuencia, no se propagarán por el cable.

Observaciones:

- Una NA alta recoge más luz, pero se reduce el ancho de banda. Una NA más bajo aumenta en ancho de banda.
- Una NA grande hace más fácil la inyección de la luz en una fibra, mientras un NA pequeño tiende a dar un ancho de banda más grande en la fibra.
- Una NA grande permite una dispersión modal mayor permitiendo más modos en los que la luz puede viajar. Un NA más pequeño reduce la dispersión limitando el número de modos.

**Birrefringencia o doble refracción:** es una propiedad de ciertos cuerpos de desdoblarse un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí y con distinto índice de refracción. La primera de las dos direcciones sigue las leyes normales de la

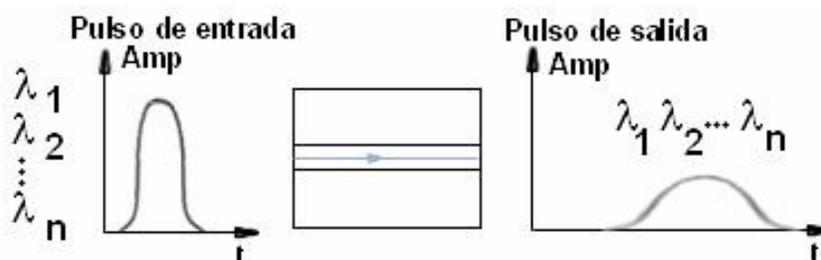
refracción y se llama rayo ordinario; la otra tiene una velocidad y un índice de refracción variables y se llama rayo extraordinario. Ambas ondas están polarizadas perpendicularmente.

**Chirp:** Se define el chirp de un láser como la variación que experimenta su frecuencia óptica instantánea al ser modulado en amplitud, indeseado en sistemas de Modulación de Intensidad y Detección Directa (MI-DD), porque aumenta innecesariamente el ancho de banda de la señal en línea.

Los cambios rápidos de niveles de potencia que ocurren en tasas de bit de alrededor de 10 GHz pueden alterar ligeramente las características del láser de estado sólido causando un chirp en la salida. El chirp aparece como una pequeña cantidad de ruido agregado y de poco pero abrupto cambio en la longitud de onda dependiendo de la construcción del láser. El chirp puede ampliar la salida de un láser que resultaría en dispersión cromática.

**Dispersión:** Uno de los fenómenos de la luz natural es su descomposición en todos los colores del arco iris, desde el rojo hasta el violeta, cuando se refracta a través de algún material de vidrio, este fenómeno recibe el nombre de dispersión y es debido a que la velocidad de la luz en un medio cualquiera varía con la longitud de onda (el índice de refracción de un medio y por tanto la velocidad de la luz en el mismo depende de la longitud de onda. Cada color tiene una longitud de onda distinta). Así, para un mismo ángulo de incidencia, la luz se refracta con ángulos distintos para diferentes colores.

**Dispersión cromática:** En un medio distinto al vacío la velocidad de propagación de la luz depende de su longitud de onda. Por ende dos pulsos de luz de distinta longitud de onda, que sean enviados al mismo tiempo a través de una FO no llegarán al mismo tiempo.



Una fuente de luz no coherente, es decir que no tenga una frecuencia única de luz sino que posea cierto ancho en el espectro, haría que un pulso angosto y con cierta energía que fuera inyectado en una fibra óptica llegara al otro extremo con mayor ancho y menor amplitud, por lo que podría no reconocerse como tal.

**Dispersión de guía de onda (Wave guide dispersion):** Se produce en las fibras monomodo cuando, debido al reducido tamaño del núcleo, la luz viaja tanto por el mismo como por el cladding. De aquí surge el **MFD** (Mode-Field Diameter) el cual es el diámetro mínimo del núcleo de una FO para que la luz propagada no lo exceda y circule también por el cladding.

**Dispersión Reflectiva de Fresnel (Fresnel Reflection Losses):** Pérdida por reflexión ocurrida a la entrada o salida de una fibra óptica debido a las diferencias entre índices de refracción entre el núcleo y el medio donde se inserta.

**Dual Window Fiber (Fibra de dos ventanas):** Es una fibra fabricada especialmente para transmitir en dos ventanas simultáneamente, por ejemplo a 1300 y 1550 nm.

**Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA):** Es un dispositivo óptico que incrementa la amplitud de una señal óptica. Contiene siete metros de fibra de vidrio dopada con iones de Erblio. Cuando la luz del láser es inyectada en él llevando a los iones a un alto estado energético, la fibra dopada pasa de ser un elemento pasivo a ser un medio activo, amplificando así la señal.

**Fonón:** en física, es una partícula (o una excitación del sistema, que es lo mismo en ciertos formalismos). De forma simple, se puede describir como una vibración que se propaga, por ejemplo, por una red cristalina. La propagación de vibraciones (alternancia de bajas y altas presiones) es la base del sonido, de ahí reciben los fonones su nombre.

Los fonones son importantes para la conductividad eléctrica y la superconductividad. El acoplamiento electrón-fonón recibe también el nombre de acoplamiento vibrónico.

Los fonones son más específicamente las oscilaciones de la frecuencia de una red cristalina, pero cuantizada, al igual que la energía en la teoría de la física cuántica.

**Fotón:** Es la partícula mediadora de la interacción electromagnética y la expresión cuántica de la luz. En física se suele utilizar el símbolo  $\gamma$  para referirse a un fotón. Los fotones son partículas fundamentales, componente de todas las manifestaciones de radiación electromagnética (es decir que tanto la luz, como las ondas de radio o los rayos X poseen fotones). Un fotón se caracteriza por su longitud de onda o frecuencia y su estado de spin. La longitud de onda determina la energía del fotón y su momento lineal.

**Frecuencia:** Se define a la frecuencia como el número de veces que se repite una situación o ciclo en un tiempo determinado. La frecuencia es la inversa del periodo (tiempo de duración de un ciclo). Se mide en Hertz que equivale al número de veces que se repite la situación medida en un segundo. Cuanto mayor es la frecuencia, mayor es el número de veces que se repite en un segundo y menor es el tiempo disponible para realizar un ciclo.

Para comunicaciones se define como el número de oscilaciones por segundo de una onda electromagnética (u otra). La frecuencia se mide, usualmente, en Hertz (Hz), donde una onda de una frecuencia de 1Hz oscila una vez por segundo. La frecuencia se designa por  $\nu$  y se relaciona con la longitud de onda ( $\lambda$ ) y la velocidad de la luz mediante la ecuación  $\lambda\nu = C$ .

**Índice de Refracción:** El grado de reflexión o refracción que hay en la interfase entre dos materiales de distintas densidades es bastante predecible, y depende del índice de refracción de cada material. Se llama índice de refracción absoluto, “n”, de un medio transparente al cociente entre la velocidad de la luz en el vacío “c” y la velocidad que tiene la luz en ese medio “v”. El valor de “n” es siempre adimensional y mayor que la unidad y es una constante característica de cada medio.

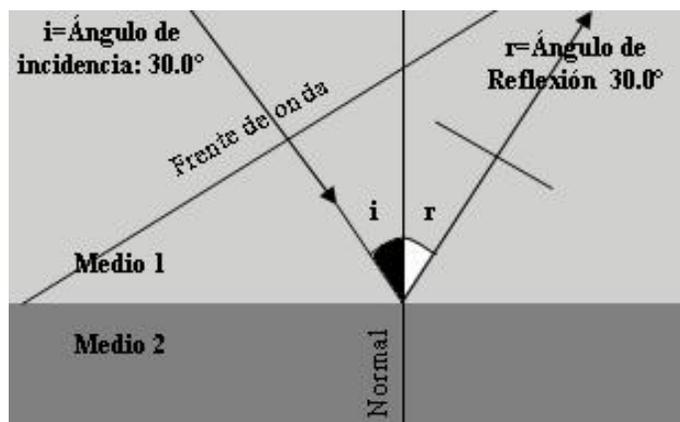
**Index-Matching Fluid:** Es un fluido o gel que, debido a que posee un índice de refracción cercano al del vidrio, reduce las reflexiones causadas por diferencias en los índices. Suele encontrarse en empalmes mecánicos.

**Jitter:** se refiere a la variación de fase en una señal óptica, si la variación es menor a 10 Hz el término usado es **wander**.

**Leyes de la reflexión:** Cuando un rayo incide sobre una superficie plana, pulida y lisa y rebota hacia el mismo medio decimos que se refleja y cumple las llamadas: “*leyes de la reflexión*” como se puede apreciar en la figura.

- 1.- El rayo incidente forma con la normal un ángulo de incidencia que es igual al ángulo que forma el rayo reflejado y la normal, que se llama ángulo reflejado.
- 2.- El rayo incidente, el reflejado y la normal están en el mismo plano. (Si el rayo incidente se acerca al 2º medio en el plano del papel, el reflejado estará en ese plano y no se irá ni hacia adelante ni hacia atrás).

La luz se refleja también en las superficies que no son lisas pero lo hace originando rayos que no son paralelos entre sí. Cada rayo del haz cumple las leyes de la reflexión, pero las normales no son paralelas entre sí, los rayos reflejados no rebotan paralelos entre sí y la luz sale difusa.



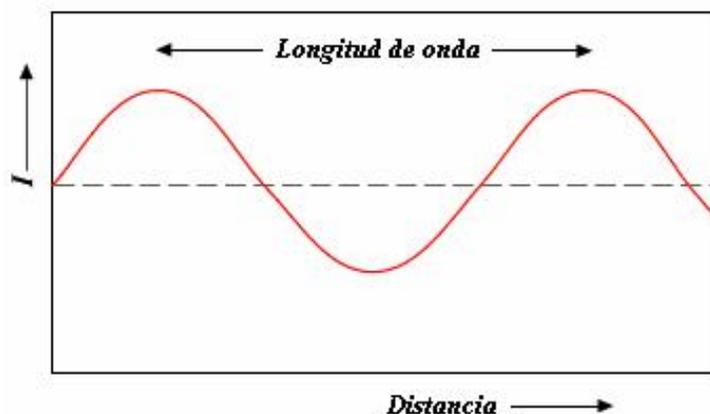
**Leyes de la Refracción:** En la refracción se cumplen las siguientes leyes:

- 1.- El rayo incidente, el rayo refractado y la normal están en un mismo plano.
- 2.- Se cumple la ley de Snell:

La luz se refracta porque se propaga con distinta velocidad en el nuevo medio. Como la frecuencia de vibración no varía al pasar de un medio a otro, cambia la longitud de onda de la luz como consecuencia del cambio de velocidad. La onda al refractarse cambia su longitud de onda. Un rayo incidente cambia más o menos de dirección según el ángulo con que incide y según la relación de los índices de refracción de los medios por los que se mueve.

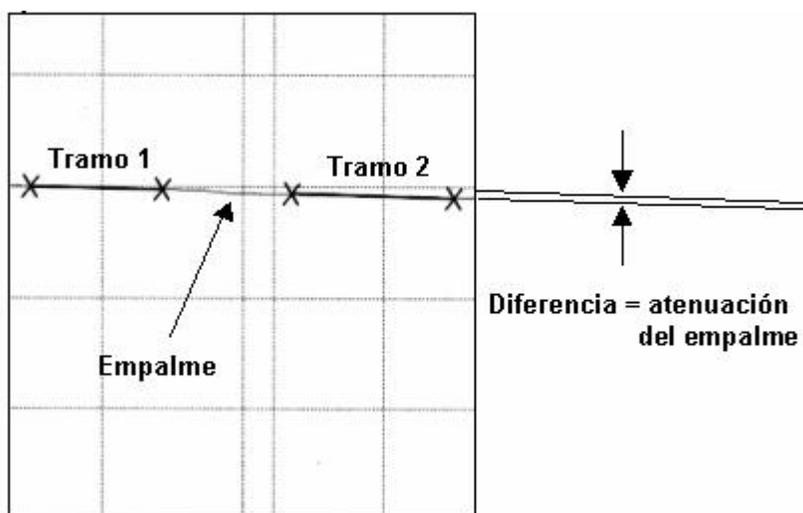
**Longitud de onda:** En ondas armónicas, se define la longitud de onda como la separación espacial existente entre dos puntos cuyo estado de movimiento es idéntico. Lo más sencillo para medirla es fijarse en la distancia existente entre dos crestas o dos valles de una onda. Se suele representar con la letra griega  $\lambda$  (lambda).

La longitud de onda es igual a la velocidad de propagación de la onda en el medio dividida por su frecuencia. En la representación de una onda senoidal de la figura, se puede apreciar la longitud de onda como la distancia entre dos crestas consecutivas. El valor  $I$  del eje  $y$  representa cualquier magnitud física susceptible de variar en función de  $x$ , en este caso de la distancia recorrida por la onda.



Cabe además mencionar que la unidad de medida de la longitud de onda de la luz es el Angstrom  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ . En el Sistema Internacional las unidades son el nanómetro (nm);  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$  o el micrómetro ( $\mu\text{m}$ );  $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ .

**Medición de empalmes por diferencia de altura en pendientes:** En algunos OTDR, especialmente los más antiguos, donde la medición debe realizarse manualmente para cada empalme, se sitúan cuatro cursores, dos sobre cada una de las pendientes de los tramos anterior y posterior al empalme, y el resultado se obtiene por la diferencia de altura entre ambas pendientes:



**Modulación:** En telecomunicación el término modulación engloba el conjunto de técnicas para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda senoidal. Estas técnicas permiten un mejor aprovechamiento del canal de comunicación lo que permitirá transmitir más información simultánea y/o proteger la información de posibles interferencias y ruidos. Básicamente, la modulación consiste en hacer que un parámetro de la onda portadora cambie de valor de acuerdo con las variaciones de la señal moduladora, que es la información que queremos transmitir. Dependiendo del parámetro sobre el que se actúe, tenemos los distintos tipos de modulación.

**Portadora:** En telecomunicaciones, La portadora-T (*Inglés: T-carrier*) es la designación de un sistema genérico de telecomunicaciones para los sistemas digitales multiplexados originalmente desarrollados por los Laboratorios Bell y utilizado en Estados Unidos y Japón. La unidad básica del sistema de portadoras-T es el DS0 que tiene una velocidad de transmisión de 64kbts/s y es normalmente usado para un circuito de voz.

El sistema de Portadoras – E (*Inglés: E-Carrier*), o sistema europeo de portadoras es incompatible con las Portadoras-T y se utiliza en el todo el mundo excepto en Japón y los Estados Unidos.

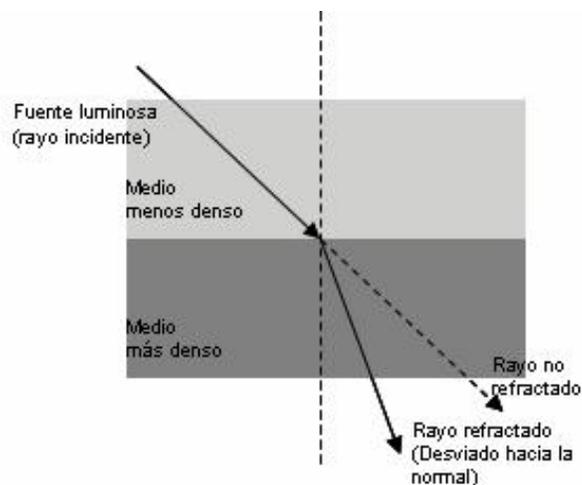
**Presión de prueba para cajas de empalme:** Para probar la estanqueidad de una caja de empalme de FO se le inyecta aire seco (por ej., oxígeno) a una presión de  $500 \text{ g/cm}^2$ , y al otro día se controla con el manómetro si no bajó la presión. También se puede realizar la prueba con una esponja embebida en detergente diluido en agua, revisando en las uniones si no se producen burbujas. La presión máxima que soportan algunas cajas de empalme es de 1At (atmósfera), que equivale a  $1 \text{ kg/cm}^2$ . Los valores típicos son 40kPa ( $1 \text{ kPa} = 6.895 \text{ psi}$ ,  $\sim 7 \text{ psi}$ ) para cajas destinadas a redes no presurizadas y 70 kPa para cajas que se instalen en cables presurizados.

**Reflexión:** Es el cambio de dirección que experimenta un rayo luminoso al chocar con la superficie de un objeto. El fenómeno más evidente de la reflexión es el que se refleja la mayor parte del rayo incidente sucede cuando la superficie es plana y pulimentada (espejo).

**Reflexión de Fresnel:** Este tipo de pérdida es la que tiene lugar debido a un salto o variación del índice de refracción en la interfaz de la unión, de manera que una pequeña proporción de luz puede ser reflejada hacia la fibra transmisora.

**Refracción:** La refracción electromagnética es el cambio de dirección de un rayo al pasar en dirección oblicua de un medio a otro con distinta velocidad de propagación. La velocidad a la que se propaga una onda electromagnética es inversamente proporcional a la densidad del medio en que lo hace. Por consiguiente, hay refracción siempre que una onda pasa de un medio a otro de distinta densidad.

La figura muestra como se refracta un rayo de luz al pasar de un material de determinada densidad a un material menos denso. En realidad, el rayo de luz no se dobla, sino que cambia de dirección en la interfaz.



**Velocidad de propagación de la luz:** La energía electromagnética, como la luz, recorre aproximadamente 300,000,000 m/s en el espacio libre. También, la velocidad de propagación es igual para todas las frecuencias de luz en el espacio libre. Sin embargo, se ha demostrado que en materiales más densos que el espacio libre, la velocidad se reduce. Cuando se reduce la velocidad de una onda electromagnética al pasar de uno a otro medio de un material más denso, el rayo de luz se *refracta*, o se *dobla*, hacia la normal. También, en materiales más densos que el espacio libre, todas las frecuencias de la luz no se propagan con la misma velocidad.

---

## Bibliografía

- [1] <http://fortiz.8k.com/conceptosbasicos/tema03-espectroelectromagnetico.com>
- [2] <http://www.info-ab.uclm.es>
- [3] <http://www.rares.com.ar/1301.pdf>
- [4] Sanz, José M. Comunicaciones ópticas. Ed. Paraninfo. Madrid. 1996.
- [5] [http://www.portalgsm.com/documentación\\_extendida/80\\_0\\_17\\_0\\_C23/](http://www.portalgsm.com/documentación_extendida/80_0_17_0_C23/)
- [6] <http://www2.udec.cl/~jdupre/fibra/tipos.html>
- [7] White, Ian M. A new architecture and Technologies for high capacity next generation metropolitan networks, Tesis de Doctorado, Departamenteo de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Stanford.
- [8] [http://www.iuma.ulpgc.es/users/jrsendra/docencia/com\\_opt\\_1/download/com\\_opt\\_1/temario/conectores.pdf](http://www.iuma.ulpgc.es/users/jrsendra/docencia/com_opt_1/download/com_opt_1/temario/conectores.pdf)
- [9] Tomasi, W. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Ed. Pearson Education. México D.F. 2003. pp 438 – 443, 445 – 448.
- [10] [http://www.radioptica.com/fibra/material\\_fib.asp](http://www.radioptica.com/fibra/material_fib.asp)
- [11] [http://www.ub.edu.ar//investigaciones/tesinas/34\\_cordoba.pdf](http://www.ub.edu.ar//investigaciones/tesinas/34_cordoba.pdf)
- [12] [http://www.sipan.inictel.gob.pe/refiop0/uploads/clase\\_5-param.doc](http://www.sipan.inictel.gob.pe/refiop0/uploads/clase_5-param.doc)
- [13] <http://www2.uah.es/teose/asignaturas/ittst/mt/apuntes/fibra.pdf>
- [14] <http://www ldc.usb.ve/-redes/sep-dic1999/exposiciones/cableado/fibra.html>
- [15] <http://www.proton.ucting.udg.mx/~ohernan/fibraopti.html>
- [16] <http://www.ricardom84.iespaña.es/fibra%20optica.htm>
- [17] Jardón A., Hildeberto. Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas. Ed. Alfaomega. México. 1995. pp 230 – 261.
- [18] <http://www.eie.ucr.ac.cr/proyectos/proybach/pb0413t.pdf>
- [19] <http://www.physionet.cps.unizar.es/-ngarces/docencia/pdfs/4.1.pdf>
- [20] <http://www.arcride.edu.ar/catalogos.htm>
- [21] <http://www.fiber-optics.info/articles/op-amp.htm>
- [22] <http://www.enterate.unam.mx/articulos/2005/febrero/telecom.htm>
- [23] <http://www.yio.com.ar/fo/empalmes.html>
- [24] <http://www.optim.com.ar/es/policy.php#11>

- [25] <http://www.fiber-optic-connectors.globalspec.com>
- [26] <http://www.wilac.net/descargas/documentos/glosario%20telecomunicaciones.pdf>
- [27] <http://www.ate.uniovi.es/11856/fotonicos/teoria/descargas/tema3/curso%20de%20fibra%20%20f3ptica.pdf>
- [28] <http://www.personales.ciudad.com.ar/fuentes-ups2/conectoresparafibraoptica.htm>
- [29] <http://www.telnet-ri.es/index.php?id=42>
- [30] <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/electronicapalicadaIII/plantelexterior/indrodufoinstalaciones.pdf>
- [31] [http://www.iec.org/online/tutorials/atm\\_test/](http://www.iec.org/online/tutorials/atm_test/)
- [32] Alcatel. Introducción a las telecomunicaciones (documento de consulta). Mexico. 2000
- [33] <http://www.exfo.com/en/support/WaveReview/2007-January/WRArticle3.asp>