

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**PRUEBAS Y MEDICIONES PARA LA PROVISION, OPERACIÓN
Y MANTENIMIENTO DE LAS NUEVAS REDES OPTICAS**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRONICO

PRESENTADO POR:

FREDDY ORTIZ MAGALLANES

**PROMOCIÓN
1984- I**

**LIMA – PERÚ
2006**

**PRUEBAS Y MEDICIONES PARA LA PROVISIÓN, OPERACIÓN Y
MANTENIMIENTO DE LAS NUEVAS REDES OPTICAS**

**Dedico este trabajo:
a mis padres Rosa y Francisco,
quienes son verdaderos ejemplos de vida y sacrificio**

SUMARIO

Durante los últimos años el progreso de las aplicaciones ópticas en las Telecomunicaciones ha sido enorme, lo que ha originado por lógica, una evolución en la manera de realizar las pruebas y mediciones que deben de considerarse en el mantenimiento y provisión de los cables de fibra óptica. Hemos organizado nuestro tema, basándonos en tres tipos tipo de redes: La red de larga distancia, la red metropolitana y la red de acceso.

El Capitulo II presentará los conceptos teóricos que deben de tenerse en cuenta ó debe de conocer el Ingeniero encargado del Diseño y Mantenimiento de las Redes Ópticas.

El Capitulo III, revisa las características de las Redes de Larga Distancia también conocidas como Long Haul, detallando las principales pruebas y mediciones tales como la dispersión por el modo de polarización y la dispersión cromática.

En el capitulo IV lo dedicamos las Redes Metropolitanas, las cuales tienen características particulares que deben de tomarse en cuenta, considerando que en estas redes se utiliza con mayor frecuencia la Multiplexación de Longitud de Onda Densa DWDM, y por lo cual se deben de realizar mediciones especiales, aquí haremos una descripción detallada de los usos del reflectómetro óptico, así como del uso y aplicaciones del analizador de espectro óptico.

El Capitulo V trata sobre las Redes de Acceso y en particular sobre la redes Ópticas Pasivas, PON, las mismas que hoy en día se están convirtiendo en el nuevo estándar de las redes de acceso y son la tecnología a tomar en cuenta para el reemplazo de las redes de cobre, con lo cual se logrará el tan esperado objetivo de llegar con fibra óptica hasta los hogares.

ÍNDICE

PRÓLOGO

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la problemática de las redes de fibra óptica	4
1.2 Objetivo del trabajo	5
1.3 Evaluación de la problemática	5
1.4 Limitaciones	6
1.5 Síntesis del trabajo	6

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 Introducción a las redes ópticas	10
2.2 Evolución de la arquitectura de las redes ópticas – taxonomía de las redes publicas.	10
2.2.1 Introducción	10
2.2.2 Jerarquía de las redes globales	13
2.2.3 Análisis Generacional de las redes ópticas.	15
2.2.4 Redes ópticas basadas en el estándar SONET/SDH	17
2.2.5 Introducción al WDM.	23
2.2.6 La tecnología DWDM	27
2.2.7 Taxonomía de redes públicas	29
2.3 La fibra óptica como medio de transmisión	32
2.3.1 Una Breve Historia de la Fibra Óptica.	32
2.3.2 Descripción general de la Fibra Óptica	35
2.3.3 Propagación de la información (luz) en la fibra óptica	36
2.3.4 Estructuras de las fibras ópticas.	39
2.3.5 Longitud De Onda De Corte.	44

2.3.6 La dispersión en la fibra monomodo.	46
2.4 Propiedades de la fibra óptica	50
2.4.1 Atenuación de la fibra óptica	50
2.4.2 Dispersión	50
2.4.3 Efectos no lineales en la fibra óptica	51
2.5 Conceptos de ruido y señal a ruido óptico (OSNR)	54

CAPITULO III

PRUEBAS EN REDES LONG HAUL

3.1 Las redes ópticas de larga distancia ó long haul	55
3.1.1 Alcances de las redes de larga distancia	56
3.1.2 Velocidades típicas de las redes de larga distancia	57
3.2 La tecnología gigaethernet y las redes core	57
3.3 Requerimiento de pruebas en las redes long haul	58
3.4 La dispersión cromática	59
3.4.1 Pruebas de la dispersión cromática	63
3.5 La dispersión de modo de polarización PMD	67
3.5.1 Métodos de medición de la PMD	74

CAPITULO IV

PRUEBAS Y MEDICIONES EN REDES DE AREA METROPOLITANA.

4.1 Introducción a las redes metropolitanas	78
4.2 Tecnología en redes metro	78
4.2.1 Infraestructura	78
4.2.2 Consideraciones sobre la fibra	79
4.2.3 Los nuevos estándares de fibras y multiplexación	84
4.2.4 La DWDM en la red Metro	86
4.3 Requerimiento de pruebas en redes metro	86
4.3.1 Pruebas durante la instalación	87
4.3.2 Provisión y mantenimiento de las redes metropolitanas	90
4.4 Descripción de los principales equipos de pruebas requeridos para las redes Metro	91
4.4.1 OTDR-Teoría y práctica	91
4.4.2 Nuevos Instrumentos de campo para probar y supervisar los sistemas DWDM	100
4.4.3 Descripción del OSA	104

CAPITULO V

REDES DE ACCESO

5.1 Las Redes de Acceso y las Redes Ópticas Pasivas	107
5.1.1 Clasificación de las Redes de Acceso	108
5.1.2 Las Redes de Acceso Basadas en Cable y Fibra Óptica	110
5.1.3 Definición de las redes de acceso de Fibra Óptica	111
5.1.4 La fibra hasta el punto de terminación.	112
5.1.5 Clasificación de las redes de acceso de fibra óptica	113
5.1.6 Las Redes Ópticas Pasiva	113
5.2 Las redes FTTx y su clasificación	114
5.2.1 ¿Qué es FTTx?	114
5.2.2 Clasificación de las redes FTTx:	115
5.2.3 Conceptos Básicos de PON y Planta de Fibra	117
5.3 Diseño de las redes e Ingeniería	119
5.3.1 Los Elementos Activos	120
5.3.2 Componentes Pasivos Ópticos	122
5.4 Descripción del equipamiento de la planta externa	123
5.4.1 Los Elementos de Planta Externa	123
5.5 Pruebas y Test sobre la capa física	124
5.5.1 La Capa Física	124
5.5.2 La verificación de la pérdida óptica de retorno ORL	125
5.5.3 Instalación	130
5.6 Activación y Provisión del servicio	138
5.6.1 Prueba de activación del OLT	138
5.6.2 Prueba en los terminales ópticos ONT	139
5.7 Mantenimiento	139
5.8 Prueba de elementos pasivos	143

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

PROLOGO

Durante mi experiencia profesional en los últimos años, en la cual he tenido bajo mi responsabilidad el mantenimiento de los cables de fibra óptica de la empresa Telefónica del Perú, he sido testigo del impresionante avance de las aplicaciones ópticas en las redes de telecomunicaciones, del crecimiento del tráfico en las redes, y de los cambios que se han dado en los procedimientos del diseño de las redes; todo a consecuencia del crecimiento extraordinario de los servicios de datos.

Las tecnologías de las comunicaciones y la de los ordenadores son hoy en día inseparables, y estamos ingresando a la nueva etapa de fusión con la electrónica de consumo y el entretenimiento para crear toda una nueva industria denominada de multimedios interactivos. Toda esta renovación tecnológica nos lleva siempre a mayores flujos de datos y de tecnologías hambrientas de mayores anchos de banda. Hoy en día la fibra óptica es el medio físico capaz de soportar las velocidades solicitadas por todos estos nuevos servicios.

Este informe tiene el objetivo de presentar los conceptos que deben de ser tomados en cuenta; así como los tipos de equipos y características que deben de tener estos, para poder llevar a cabo una óptima actividad de mantenimiento, instalación y provisión de los cables ópticos a fin de poder soportar las nuevas velocidades y tecnologías que se están usando en el mercado.

El capítulo II, lo iniciamos con el repaso sobre los conceptos teóricos de la fibra óptica, así como de las nuevas tecnologías como la multiplexación de longitud de onda WDM, que hoy en día se ha convertido en el nuevo estándar del transporte de las telecomunicaciones.

Las redes de larga distancia o Long Haul son estudiadas en el capítulo III. Analizaremos los conceptos de la dispersión cromática y la dispersión por el modo de polarización, que vienen a ser dos características que tiene que tomarse en cuenta cuando empezamos a usar velocidades que superan los 2.5 Gbps.

El Capítulo IV lo dedicamos al estudio de las redes Metropolitanas; redes en las cuales hoy en día se está usando de manera sostenida la tecnología de multiplexación de longitud de onda densa DWDM. Esta tecnología requiere de cuidados especiales, así como del conocimiento de otras características de la fibra.

Hoy en día la tecnología está permitiendo usar todas las bandas de la fibra óptica, por lo cual los nuevos equipos de mediciones tienen que adaptarse a estas nuevas condiciones y el ancho espectral requerido en las pruebas abarca desde los 1260 nm a 1625 nm. Estas redes debido a la transmisión por una sola fibra de múltiples señales, requiere para sus pruebas de un analizador de espectro óptico, OSA. Este equipo será analizado en detalle, así como también se analizará en este capítulo al reflectómetro óptico, OTDR, equipo que es utilizado en todos los tipos de redes ópticas, pero por motivo de importancia hemos preferido analizarlo en este capítulo.

El Capítulo V, es el que tendrá una mayor extensión y lo dedicamos al estudio de las redes de Acceso, sobre todo a las redes ópticas pasivas que hoy día están normalizadas y se han empezando a instalar en la planta externa, como un reemplazo lógico a la actual red de cobre. Este último capítulo le prestará especial atención a conceptos como la pérdida de retorno óptico, ORL, la medición de la atenuación y planteará la necesidad de nuevos equipos para medir las señales que usan las nuevas redes PON.

Los cables de fibra óptica inicialmente se instalaron en las redes de larga distancia para luego empezar a dominar en las redes Metropolitanas, y hoy en los países adelantados se están utilizando para llegar a los clientes; todo esto está originando una revolución continua en las Telecomunicaciones, pero a su vez trae consigo nuevos retos para los Ingenieros encargados del Diseño y del Mantenimiento, ya que parámetros que originalmente no fueron tomados en cuenta están hoy en día reclamando una atención especial. El presente trabajo tratará sobre esta problemática y las consideraciones que

debemos de tener en cuenta en nuestras actividades de Pruebas y Mediciones en los cables de fibra óptica

La totalidad de conceptos que presento en el siguiente trabajo son fruto de experiencias y conocimiento adquiridos a través de estos últimos años en mi centro de trabajo, e incluye conceptos y experiencias que han sido transmitidos por diversos proveedores de equipos. Merece un agradecimiento especial la empresa EXFO Electro-Optical Engineer Inc, empresa Canadiense, quienes han sido nuestros socios proveedores del 90% de los equipos de mediciones y pruebas que han estado siendo utilizados en el mantenimiento de los cables de fibra óptica de Telefónica del Perú, y no quiero terminar este prólogo sin agradecer de manera especial al PH.D Andre Girard, de la empresa EXFO, quien fue muy amable en hacerme llegar una serie de recomendaciones, sobre todo, en los conceptos relacionados a las nuevas tecnologías y pruebas de las redes PON.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de problemática en redes de fibra óptica

Las primeras fibras ópticas que inicialmente fueron utilizadas en aplicaciones de Telecomunicaciones, fueron del tipo multimodo. Estas fibras tenían un diámetro de núcleo de 50 μm y 62.5 μm con un revestimiento común de 125 μm . Para las aplicaciones de banda angosta, se usaba un núcleo del tipo índice escalón, luego se uso un núcleo de índice gradual que podría ofrecer hasta 1 GHz de ancho de banda sobre un Kilómetro. La longitud de onda de operación fue de 850 nm ó de 1330 nm. Los parámetros críticos que se tomaban en cuenta en esta primera época eran la atenuación espectral y el ancho de banda de la fibra. Las mediciones con el OTDR (reflectómetro óptico) era útil, pero los impactos de las irregularidades menores no eran considerados importantes. Asimismo por aquella época, el láser típico usado proveía solo unos cuantos miliwatts de potencia de salida.

Comparándolo con hoy en día, la actual fibra óptica es del tipo monomodo y se instala sobre cientos de kilómetros de longitud y pueden soportar más de un ciento de canales DWDM, y cada canal soportar velocidades de hasta 10 Gbps. Este nuevo mercado ha generado la necesidad de controlar cada uno de los parámetros de la fibra óptica. La atenuación espectral tiene que medirse con un alto orden de precisión y las limitaciones del ancho de banda debido a la influencia de la dispersión cromática y la dispersión por el modo de polarización deben de ser cuantificados. Los OTDRs son utilizados para visualizar todas las imperfecciones que puedan producir degradaciones en la comunicación. Por otro lado la tecnología de la DWDM trae consigo la operación de varios canales, cada uno de ellos con alta potencia de transmisión y la utilización de varios canales a la vez por la misma fibra causa que se presenten los efectos no lineales dentro de ella.

En conclusión el incremento de velocidad y el número de canales en la fibra ha traído consigo la necesidad que las redes ópticas cuenten con un adecuado sistema de mantenimiento, y se hace de necesidad contar con equipos especiales y además conocer cuales son los parámetros críticos que deben de ser medidos en cada una de los tipos de redes óptica, ya que a pesar que todos los tipos de redes ópticas puedan estar soportadas por el mismo tipo de cable óptico, cada una de ellas debido a los servicios que soporta, son afectadas en diferentes proporciones por cada una de las características de la fibra óptica

1.2 Objetivo del trabajo

Si bien las redes ópticas pueden tener un buen número de clasificaciones, para motivo del presente trabajo hemos tomado tres tipos de redes como representativas. Las redes de larga distancia, las redes metropolitanas y las redes de acceso, y a partir de ellas definimos cada uno de los parámetros principales que deben de ser medidos.

Cada capítulo incidirá sobre los conceptos de los parámetros críticos así como las características que deben de tener los equipos de mediciones. El informe permitirá tener una visión clara de las consideraciones que se deben de tener para dar un mantenimiento adecuado a los cables de fibra óptica

1.3 Evaluación de la problemática

Contar con los equipos necesarios para las mediciones y pruebas plantea a las empresas el realizar una inversión nada despreciable.

Los equipos de mediciones al igual que las redes han seguido un inexorable camino de mejoras, hoy en día los equipos son mas pequeños y potentes pero aún los costos de algunos de ellos siguen siendo importantes, en la tabla 1.1 mostramos los precios actuales en moneda nacional referencial de los principales equipos y la inversión que debe de realizarse como mínimo en el área de mantenimiento de los cables de fibra óptica.

Por otro lado es importante contar con una guía que permita seleccionar los más importantes tipos de equipos y conseguir aquellos que nos simplifiquen la vida por su facilidad de uso, y mejor aún, prever las nuevas tecnologías que se van a implementar en la red y evitar que nuestros equipos queden obsoletos en un corto período de tiempo

Tabla 1.1 Costo de los principales equipos usados en el mantenimiento de los cables de Fibra Óptica

DESCRIPCION	Cantidad	Costo Unitario en miles S/.	Costo Total en miles S/
Analizador de Dispersión Cromática y PMD	1	587.2	587.20
OLTS - Conjunto Medición de pérdida de Potencia óptica	1 par	15	15.00
OTDR Reflectómetro Óptico de alta rango dinámico	1	73	73.00
Medidor de pérdida de retorno óptico ORL	1 par	9.09	9.09
OSA Analizador de espectro óptico	1	125.4	125.40
Empalmadora de Fusión	1	85.3	85.30
Detector de fibra activa LFD	2	6.392	12.78
Kit de empalme de fibra óptica	2	8.043	16.09
Cortadora de fibra óptica	2	4.34	8.68
Video Fiber Scope	1	11.3	11.30
Localizador Visual de fallo	2	1.54	3.09
TOTAL			946.94

1.4 Limitaciones

Si bien para las redes ópticas se requieren realizar una serie de mediciones de calidad, el presente trabajo se limitará a ver las consideraciones que se debe de tener sobre el cable de fibra óptica, que es el soporte físico, así como de los otros elementos pasivos que conforman un sistema de comunicaciones óptico

El presente trabajo evitará en lo posible el uso de pruebas matemáticas y descripciones complejas de los equipos y redes a ser analizadas.

1.5 Síntesis del trabajo

Es conocido que la demanda del ancho de banda esta creciendo, lo cual plantea a los operadores la alternativa de tender nuevas redes ó, como se esta optando, aprovechar la red actualmente instalada mediante el incremento de las velocidades ó el aumento del número de canales por el mismo medio físico y aún más transmitir a mayores distancias sin tener que regenerar la señal. Decir esto es sencillo, pero el hecho de aumentar la velocidad sobre la fibra, a mayores distancias, trae consigo serios problemas que deben de ser analizadas, entendidas y controladas. El hecho de incrementar el número de longitudes de ondas ó colores de transmisión, viene acompañado de sistemas mas potentes que llevan a la red a

un nivel superior de desempeño, pero para ello se requiere de una apropiada instalación y mantenimiento de las redes ópticas.

Nuestro trabajo revisa los parámetros críticos, y el orden en que estos deben de ser testeados, así como los criterios generales requeridos para tener una transmisión de calidad, empezando con el hecho que todos los trabajos de mediciones en los sistemas de fibra óptica se inicie con la limpieza e inspección de conectores, el hecho de no realizar esto inevitablemente nos llevará a resultados errados en nuestras pruebas, para lo cual se debe de usar un instrumentos que ayuden a inspeccionar los conectores mediante una especie de microscopio que detecta si un conector esta dañado ó sucio.

Dentro de los equipos de mediciones en los cables de fibra óptica, indudablemente el OTDR ó reflectómetro óptico en el dominio del tiempo, es uno de los equipos claves, ya que este equipo nos permite plotear la señal reflejada como una función de la distancia dentro de la fibra. Esto permite localizar de manera fácil todos los eventos (dobladuras, empalmes malos, etc) que contribuyen a la perdida total. Así como calcular el nivel de reflectancia de un enlace. Adicionalmente el OTDR mide con precisión la longitud de la fibra y permite localizar los cortes que se dan en el cable.

La fibra y otros componentes ópticos exhiben una cierta cantidad de reflexión lo cual puede afectar la calidad de transmisión. Esta potencia reflejada se da principalmente por la reflexión de Fresnel, así como por los cambios locales del índice de refracción causados por componentes tales como los empalmes y los conectores. Si existe demasiada perdida de retorno óptico, (ORL – Optical return loss) puede dramáticamente degradarse la calidad del sistema dañando la data y desestabilizando el láser transmisor, incrementándose el ruido total trayendo como resultado una degradación de la tasa de error (BER). Para medir el ORL se usa una señal continua y la potencia de la señal que retorna es medida mediante un conjunto de equipos de pruebas de ORL.

Por otro lado la perdida total de inserción es importante, ya que las pérdidas debido a la absorción y a los efectos de retrodispersión atenúan la señal original. Si la potencia llega a ser demasiado baja, el receptor será incapaz de analizar la señal, y esto generará errores. Los equipos medidores de pérdidas ópticas usan una fuente en un lado y un medidor de

potencia en el otro extremo y se prueban en ambas direcciones y son conocidos con el nombre de OLTS (optical loss test set).

Las pruebas mencionadas anteriormente se deben de realizar en todos los tipos de redes. Por otro lado existen otras pruebas que se deben de tener en cuenta en los sistemas de alta velocidad y en los sistemas de multiplexación de longitud de onda densa DWDM.

Debido a los cambios locales en el índice de refracción (llamado birrefringencia) los dos estados de polarizaciones de la luz viajan en ejes a diferentes velocidades, lo que da como resultado un ensanchamiento del pulso en el tiempo y la distancia, eventualmente deteriorando el BER. Estos efectos se deben a la dispersión del modo de Polarización (PMD). Otros factores que contribuyen al incremento de la PMD son las curvaturas físicas del cable, los cambios locales del índice de refracción, así como la vibración y variaciones de la temperatura, debido a que estos fenómenos son aleatorios, la PMD llega a ser un fenómeno de naturaleza estadística.

Incrementar la velocidad de bits es la manera más popular de incrementar el flujo de datos. Conforme la transmisión de velocidad se incrementa se requiere tener un PMD pequeña para que sea aceptable. Algunos tipos de fibra (las aéreas por ejemplo) son más riesgosas, y pueden tener un alto PMD. Se debe de contar con una técnica de medición efectiva.

En el campo; la PMD es medida usando el método interferométrico, para esto desde un punto de la fibra se envía una señal de luz polarizada y en el otro extremo se usa un analizador de PMD. Desde que la PMD afecta el ancho de banda de la fibra se debe tener en claro los límites que deben de tenerse para que la PMD no llegue a ser un problema y para esto se debe tener en cuenta lo indicado en la siguiente tabla:

Tabla 1.2 La PMD máxima y la velocidad de transmisión

Velocidad (Gb/s)	Max PMD (ps)	Coefficiente PMD * (ps/$\sqrt{\text{km}}$)
2.5	40	< 2.0
10	10	< 0.5
40	2.5	< 0.125

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 Introducción a las redes ópticas

¿Que es una Red Óptica (RO)?

Una Red Óptica es una red de telecomunicación en donde los enlaces de transmisión son fibras ópticas y cuya arquitectura está diseñada para explotar las características singulares de este medio de transmisión. Su diseño e implementación requiere en general de la combinación (compleja) de elementos ópticos y electrónicos y su concepción arquitectónica obedece a un modelo de capas

2.2 Evolución de la arquitectura de las redes ópticas y taxonomía de las redes públicas.

2.2.1 Introducción

Conforme avanzamos en el presente milenio, somos testigos de cambios dramáticos en el mundo de las telecomunicaciones, que de alguna ú otra manera inciden en nuestro modo de vida. Existen varios drivers que estimulan estos cambios, el primero y el más destacado viene a ser el continuo e incesante requerimiento de ancho de banda, que a su vez es alimentado por varios factores, siendo el principal, el vertiginoso crecimiento del Internet, que se ha desarrollado rápidamente siendo uno de sus principales logros el permitirnos el acceso a todo tipo de información desde cualquier rincón de la tierra.

La tecnología del intercambio de información, que ha estado evolucionado continuamente desde la invención del teléfono, aún esta esforzándose por encontrar soluciones a la alta demanda de ancho de banda de los usuarios. Esta demanda atribuida al incremento de la popularidad de búsqueda en la web (WWW), a aplicaciones basadas en Java, la videoconferencia, la enseñanza a distancia, juegos en líneas, etc. Un ejemplo de este

último fenómeno lo podemos notar si comparamos el promedio de una llamada telefónica de 3 minutos; en contraste al tiempo que en promedio utilizan los usuarios conectados a Internet vía línea conmutada, los cuales permanecen en promedio 20 minutos, en la red^[1]. Por lo que solamente el Internet conmutado genera aproximadamente seis veces más tráfico que una red de voz normal.

El tráfico de Internet se ha venido duplicando cada cuatro a seis meses, y esta velocidad de incremento continuará. Por otro lado somos testigo del despliegue de tecnologías de banda ancha, tales como la tecnología ADSL y el Cable MODEM que proveen anchos de bandas que permiten hoy a los usuarios gozar de servicios que llegan a los 2 Mbps, en contraste al ancho de banda que ofrece la línea conmutada que va de los 28 Kbps a los 56 Kbps. El impacto de tales desarrollos es bastante significativo.

En el Perú por ejemplo, Telefónica a fines del año 2005 contaba con 360,000 clientes con la tecnología ADSL. Para atender el tráfico generado por estos clientes se ha desplegado 3 STM16 para poder soportar solo el tráfico internacional de Internet, el mismo que tiende a duplicarse en el año 2006.

Por otro lado, las empresas privadas hoy en día despliegan redes de alta velocidad para manejar su información, estas redes son usadas para interconectar múltiples edificios de la empresa, así como conectarse con redes de otras empresas para realizar transacciones business to business.

Existe también una fuerte correlación entre el incremento de la demanda y el costo de la banda ancha. Los avances tecnológicos han contribuido a una continua reducción de los costos del ancho de banda lo cual incentiva el desarrollo de nuevos conjuntos de aplicaciones que a su vez hacen uso de un mayor ancho de banda y afecta el comportamiento de los patrones establecidos en el mercado. Un ejemplo simple de esto es el abaratamiento de las llamadas telefónicas, que permite que las personas pasen mayor tiempo en el teléfono. Esto a su turno conduce a la necesidad de un mayor ancho de banda en la red. Este ciclo de realimentación positiva no muestra señal de abatimiento en un futuro cercano.

Otro factor que está causando mayores cambios en la industria es la desregulación de la industria de la telefonía y el quiebre de los monopolios del teléfono. Por varias décadas, el negocio de las telecomunicaciones fue controlado por los proveedores de servicios que eran esencialmente monopolios. En verdad esto es así aún en algunas partes del mundo. Es bien conocido que los monopolios impiden un rápido progreso, las compañías que tienen esta característica se toman su tiempo para adaptarse a los cambios y no tienen incentivos para reducir los costes de los servicios. La desregulación de estos monopolios ha estimulado la competencia del mercado, que está llevando a que el usuario final goce de menores costos y a un rápido desarrollo de las nuevas tecnologías y servicios.

La desregulación ha permitido la creación de nuevas compañías Startup, proveedoras de servicios y de equipos. Esto es una gran diferencia con la situación existente en los años 90 en los cuales a nivel mundial, la industria de las Telecomunicaciones se encontraban dominada por unas cuantas empresas proveedoras de servicios y proveedoras de equipos. También se presenta un significativo cambio en el tipo de tráfico que está predominado en la red. Mucha de la demanda nueva está siendo impulsada por la data, en oposición al tradicional tráfico de voz, que había predominado hasta hace poco. Sin embargo muchas de las redes actuales están diseñadas para soportar muy bien el tráfico de voz y no el de dato. Este cambio en el mix de tráfico está causando que los proveedores de servicios reexaminen el modo en que diseñan su red, el tipo de servicio que transportan, y en algunos casos completamente el modelo del negocio.

Todos estos factores han conducido al desarrollo de las redes ópticas de alta capacidad. A la fecha se ha comprobado que mientras, el tráfico de voz muestra un crecimiento continuo moderado, el tráfico de datos prácticamente ha explotado y su crecimiento ha sido exponencial. Para soportar este crecimiento exponencial del tráfico de datos, hay una fuerte demanda de redes con gran ancho de banda. Estas necesidades van más allá de lo que pueden soportar las redes populares, tales como ATM (Modo de transferencia asíncrono), SONET/SDH¹, etc.

¹ SONET y SDH son estándares para la transmisión sincrónica de datos sobre las redes de fibra óptica. SONET es el acrónimo de Synchronous Optical Network y SDH es un acrónimo de Synchronous Digital Hierarchy.

La tecnología de la Fibra Óptica puede soportar las necesidades previamente mencionadas debido a su potencial capacidad ilimitada de ancho de banda, baja atenuación de señal (0.2 dB/Km), baja distorsión de señal, bajo requerimiento de energía, requerimiento de poco espacio, y bajo costo. Dado que el ancho de banda potencial de una fibra monomodo esta por encima de la velocidad de datos que maneja la electrónica de los equipos de transmisiones, que por ahora se encuentran por las decenas de Gigabits por segundos, aún queda mucho por explotar debido a esta gran disparidad existente entre el ancho de banda óptico y el electrónico. Debido a que la máxima velocidad a la que un usuario final (que puede ser una estación de trabajo o un gateway que actúa de interfase en una red de baja velocidad) puede acceder a la red, esta limitada por la velocidad de la electrónica. Se puede introducir la concurrencia de una gran cantidad de usuarios transmisores en la red para así explotar el gran ancho de banda de la fibra. Hoy en día la tecnología de la WDM es la favorita para la multiplexación en las comunicaciones ópticas porque puede soportar de manera eficiente la concurrencia de un buen número de transmisiones en el dominio de la longitud de onda por una sola fibra

2.2.2 Jerarquía de la Red Global

Las modernas redes de comunicaciones están en constante evolución. Factores tales como nuevas aplicaciones, cambiantes forma de uso, y redistribución del contenido, hacen de la definición de red como un trabajo en progreso. Sin embargo podemos definir ampliamente las entidades mayores que forman la red global basadas en las variables tales como tecnologías de transporte, distancias, aplicaciones, etc.

Para razones del presente estudio, La red de telecomunicaciones de hoy la consideramos formadas por tres tipos de subredes [2]:

- **Red de Acceso** : desplegado en longitudes que pueden ir entre 1 a 20 Km,
- **Red Metropolitana MAN**: que cubre distancias que van desde los 20 a 100 km, y
- **Las Redes de larga distancia ó Long Haul**: que se extienden desde cientos a miles de Kilómetros, (ver la figura 2.1).



Figura 2.1 Tipos de Subredes

a) Redes de larga distancia

Son el corazón de la red global de Telecomunicaciones de hoy en día. Las redes de larga distancia son las que conectan las MANs. Su aplicación es transportar, así su primera preocupación es la capacidad. En muchos casos estas redes, que se han basado tradicionalmente en la tecnología SONET o SDH están al límite de capacidad como resultado de la demanda actual. Estas redes pueden ser terrestres o submarinas.

b) Redes de acceso

En el otro extremo del espectro están las redes de acceso. Estas redes son las más cercanas a los usuarios finales y están en los extremos de la MAN. Se caracterizan por sus distintos protocolos y estructuras y tiene un amplio abanico de velocidades. Los usuarios son desde usuarios residenciales a grandes empresas e instituciones. El predominio del tráfico IP, con su funcionamiento en ráfagas, asimétrico y de naturaleza impredecible, presenta muchos retos especialmente con las nuevas aplicaciones en tiempo real. Al mismo tiempo estas redes requieren continuar soportando las redes antiguas y sus protocolos.

c) MANs

Estas redes están entre las de larga distancia y las de acceso. Estas redes canalizan el tráfico dentro del dominio metropolitano (entre empresas, oficinas, y áreas metropolitanas) y entre los puntos de presencia (POP) de las redes de larga distancia. Las MANs tienen muchas características que tienen las redes de acceso tales como diversidad de protocolos

y velocidades de transmisión. Las MANs se han basado tradicionalmente en SONET/SDH, usando topología punto a punto ó en anillo con multiplexadores de extracción e inserción (ADM). La MAN por un lado debe cubrir las necesidades creadas por la dinámica de la disponibilidad del ancho de banda siempre creciente en las redes de transporte de larga distancia y por otro lado, debe cumplir con los requerimientos de conectividad y ser compatible con las tecnologías de las redes de acceso.

2.2.3 Análisis Generacional de las redes ópticas

a) La primera generación de redes ópticas

La necesidad de incrementar la velocidad de los servicios y la capacidad de tener canales libres de ruido para la comunicación hicieron que las redes ópticas fueran atractivas para las empresas de telecomunicaciones. La fibra se hizo necesaria para la transmisión de datos con velocidades de unas cuantas decenas de Mbps sobre distancia que excedían el Kilómetro. Las características básicas de la primera generación de redes Ópticas son: (a) La fibra óptica solo es visto como un medio más de transmisión. (b) es usado con una longitud de onda simple, y (c) todos los conmutadores y procesadores son manejados por la electrónica. Esta redes son muy populares y las mas conocidas son las redes SONET/SDH y empezaron a usarse ampliamente en los años 80.

La primera generación tiene un propósito claro: Maximizar la capacidad de la infraestructura de los tramos largos de fibra. Este objetivo tuvo su punto de máximo desarrollo con la utilización punto a punto de la multiplexación de longitud de onda densa (DWDM). En estos tipos de redes todo el procesamiento e inteligencia reside en los componentes electrónicos existentes, tales como las redes ópticas síncronas (SONET/SDH), Los Switches de Modo de Transferencia Asíncrona (ATM), y ruteadores IP. Estas soluciones cumplieron con sus objetivos, y en verdad, a la fecha muchas de estas redes aún están operando.

b) Segunda Generación de Redes Ópticas

Muchas veces en la industria de las Telecomunicaciones, aprendemos de las debilidades y errores de las primeras tecnologías para mejorar. Teniendo esto en mente examinemos las características de la segunda generación de redes ópticas. Primero, en esta generación se podrá notar que se incorporan muchas de las funciones de ruteo y conmutación que

previamente estuvieron en manos de la electrónica en la parte óptica de la red. En otras palabras las redes ópticas fueron por mucho tiempo un medio de transmisión poco eficiente, pero fueron capaces de desarrollar las necesidades de los servicios de red bastante bien.

La segunda generación de redes ópticas ha sido introducida para vencer los obstáculos básicos de la conectividad. Estos dispositivos expanden la capacidad de los sistemas de primera generación con la introducción de los conceptos de topologías básicas incluyendo anillos y mallas simples. Este tipo de redes encuentra aceptación en las redes Metro donde la fibra es usualmente desplegada en anillos y la DWDM permite el uso múltiples flujos OC-48/STM-16 (2.5 Gbits/seg) que pueden ser ruteados sobre longitudes de onda individual.

Sin embargo, de manera similar a los dispositivos de la primera generación, las restricciones tecnológicas relegan estos elementos a funciones elementales de transporte. La segunda generación de redes ópticas también delegan en los dispositivos electrónicos existentes todos los procesos del nivel de servicio.

En la segunda generación de redes para el caso de la redes Metro, la DWDM dobla el número de canales e introduce protección de anillo y multiplexores ópticos de extracción e inserción estáticos (OADMs), 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 multiservicios 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, lo cual da por resultado costes elevados. Adicionalmente, la mayoría de crossconnects ópticos (OXC) 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.

C) Tercera generación

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. Asimismo, el número de canales es mayor y existe una monitorización de prestaciones más sofisticada que se realiza sobre cada canal óptico. Por medio de láser 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.

2.2.4 Redes ópticas basadas en el estándar SONET/SDH

Evolución de PDH a SONET/SDH^[3]

Los primeros sistemas de transmisión digital que aparecieron se basaban en la llamada jerarquía digital plesiócrona (Plesiochronous Digital Hierarchy, PDH). La UIT-T definió dos tipos de jerarquía con diferentes tasas binarias para Europa y Norteamérica, ambas están basadas en el entrelazado asíncrono de señales TDM. En la tabla 2.1 se presenta un resumen de las tasas binarias PDH utilizadas en ambos casos. Los sistemas de transmisión digital que implementan el estándar PDH en Europa y Norteamérica se conocen como portadores E y portadores T, respectivamente.

Tabla 2.1 Tasas binarias PDH en Europa y Norteamérica.

Nivel	Tasa binaria nominal (Mbit/s)	Número de canales de voz
E-1	2,048	30
E-2	8,448	4 x 30 = 120
E-3	34,368	4 x 120 = 480
E-4	139,264	4 x 480 = 1920
E-5	564,992	4 x 1920 = 7680
T-1	1,544	24
T-2	6,312	4 x 24 = 96
T-3	44,736	7 x 96 = 672
T-4	274,176	6 x 672 = 4032

Las señales correspondientes a un determinado nivel se obtienen multiplexando de forma asíncrona un determinado número de señales del nivel inmediatamente inferior. Así, por

ejemplo, una señal de nivel T-3 se obtiene multiplexando 7 señales de nivel T-2, lo cual equivale a una tasa binaria de 44,736 Mbit/s capaz de transportar 672 canales de voz. Obsérvese que, en realidad, 7 señales T-2 equivalen a una tasa binaria de $7 \times 6,312 = 44,184$ Mbit/s. La diferencia de velocidad se explica por el hecho de que el multiplexado se realiza de forma asíncrona, ya que las diferentes señales a multiplexar provienen de distintos terminales cuyos relojes no se encuentran enganchados o sincronizados entre sí. De este modo, resulta necesario añadir bits de relleno y bits de trama para acomodar las posibles variaciones de tasas binarias. Como consecuencia de ello, los procesos de multiplexado y demultiplexado de señales resultan costosos. Al mismo tiempo, las señales de nivel inferior no resultan accesibles en el interior de la trama de alta velocidad, por lo que el tráfico debe demultiplexarse completamente para poder acceder a los datos. Todo esto, unido a la reducida capacidad de gestión de los sistemas PDH, hizo que fueran progresivamente sustituidos por el estándar SONET/SDH desde finales de los años 80.

El estándar SONET/SDH

Los esfuerzos para la creación del estándar SONET comenzaron con los trabajos de ANSI² en 1985. Siguiendo al desarrollo del estándar SONET, el CCITT³ comenzó la definición de un estándar síncrono que permitiera tratar el problema de la interconexión entre las jerarquías de transmisión europea y americana. El trabajo culminó en el año 1989 con la publicación del estándar SDH. En realidad, SDH es un estándar mundial, y como tal SONET puede considerarse un subconjunto de SDH.

Las tramas y señales de los distintos niveles de la jerarquía SONET se obtienen mediante multiplexado síncrono a nivel de bytes. Estas señales se conocen con el nombre de STS-n (señal de transporte síncrona de nivel n) donde $n = 1, 3, 12, 48, 192$. Por otro lado y en el caso de SDH, las señales se conocen con el nombre de STM-n (módulo de transporte síncrono de nivel n), donde $n = 1, 4, 16, 64$. Los niveles estándar de las jerarquías SONET y SDH se resumen en la tabla 2.2 En este caso, una señal STS-n (STM-n) se obtiene por entrelazado de bytes de n señales STS-1 (STM-1) en un único paso, sin necesidad de multiplexado recursivo como ocurría con PDH (ver la figura 2.2, donde se muestra una

² ANSI : American National Standards Institute, es una organización sin ánimo de lucro que supervisa el desarrollo de estándares para productos, servicios, procesos y sistemas de Estados Unidos

³ CCITT : Siglas del Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico (Consultative Committee for international Telegraphy and Telephony), antiguo nombre del comité de normalización de las telecomunicaciones dentro de la UIT ahora conocido como UIT-T

comparación entre ambos sistemas). Dado que todos los terminales de la red disponen de una referencia de reloj estable, no es necesario ningún tipo de bits de relleno o de trama durante el multiplexado de las señales. Esto aumenta la eficiencia, ya que la tasa binaria de una señal STS-n (STM-n) es exactamente n veces la tasa binaria de una señal STS-1 (STM-1). Al mismo tiempo, las señales STS-1 (STM-1) pueden extraerse directamente sin necesidad de tener que demultiplexar la señal STS-n (STM-n) completa.

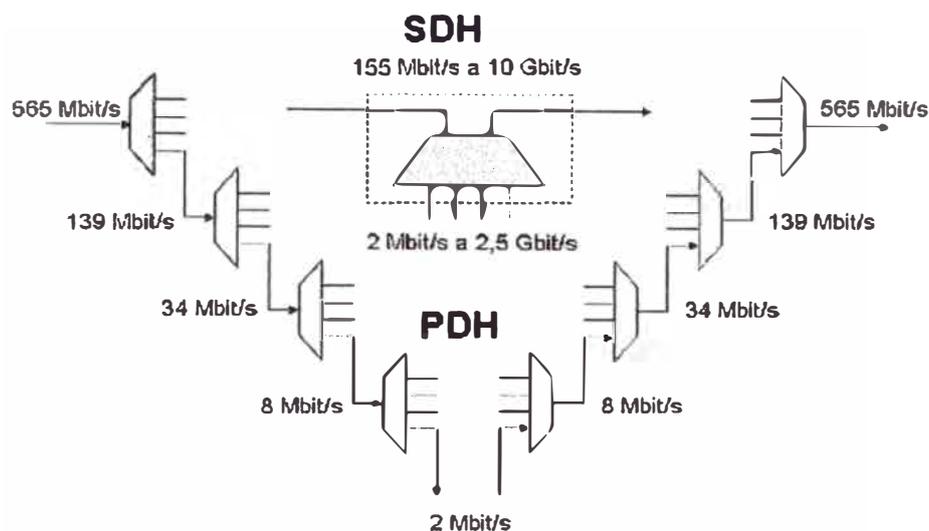


Figura. 2.2. Acceso al tráfico en PDH frente a SDH.

Tabla 2.2. Jerarquías SONET/SDH.

SONET	Nivel SDH	OC	Tasa de línea (Mbit/s)
STS-1	-	OC-1	51,84
STS-3	STM-1	OC-3	155,52
STS-12	STM-4	OC-12	622,08
STS-48	STM-16	OC-48	2488,32
STS-192	STM-64	OC-192	9953,28
STS-768	STM-256	OC-768	39813,12

Las altas velocidades de transmisión del sistema SONET/SDH son posibles gracias a la utilización de fibra óptica como medio de transporte. Los equipos terminales SONET/SDH convierten una señal eléctrica STS-n (o la correspondiente señal STM) en una señal óptica OC-n (optical carrier) con la misma velocidad. La señal OC-n se transmite entonces sobre

fibra óptica monomodo. Una conexión de fibra extremo a extremo entre dos terminales SONET se puede descomponer en tres capas jerárquicas: la capa de ruta (path layer), la capa de línea (line layer) y la capa de sección (section layer). Esta estructura se representa de forma esquemática en la figura 2.3 Los elementos de terminación de ruta (Path Terminating Element, PTE) delimitan una ruta. Esta ruta está compuesta de varias líneas situadas entre diferentes nodos de red. Por último, cada una de estas líneas consta de diferentes secciones de repetición colocadas entre regeneradores o amplificadores.

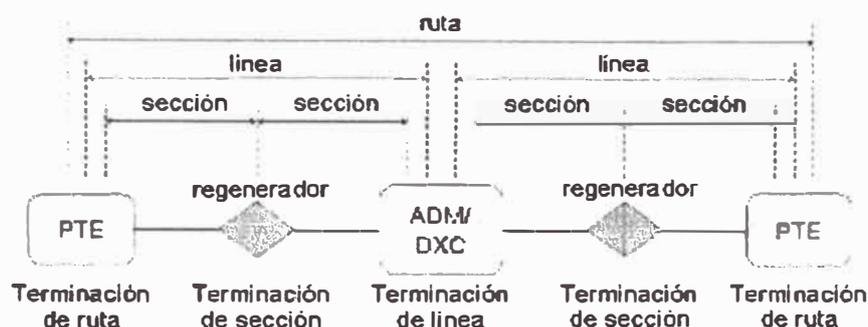


Figura. 2.3 Capas en SONET/SDH.

Aunque el estándar SONET/SDH para redes ópticas fue establecido hace más de 10 años, la tecnología y la velocidad de las redes ópticas ha ido evolucionando constantemente. Así, se puede hablar ya de señales OC-768 (40 Gbit/s), OC-1536 (80 Gbit/s) o incluso OC-3072 (160 Gbit/s), que no se encontraban definidas inicialmente en el estándar. De hecho, existen equipos comerciales que operan a algunas de estas velocidades, por lo que no se puede establecer todavía dónde se encuentra el límite de velocidad.

Una importante característica del estándar SONET/SDH es su capacidad de monitorizar la integridad de las señales digitales que alcanzan los nodos de la red. Aunque el mecanismo de monitorización es intrusivo y requiere conversión optoelectrónica, detecta y aísla rápidamente posibles fallos en la red. Al mismo tiempo, durante una pérdida de señal, de trama, o cualquier otro fallo, SONET/SDH proporciona ancho de banda adicional para el transporte de señales de alarma que pueden restaurar la red. Dada la gran cantidad de tráfico que circula por las fibras ópticas, cualquier corte de la línea o fallo de un nodo sería catastrófico si no fuera porque la rápida restauración del servicio es una parte integral de las estrategias de diseño y operación de la red. SONET/SDH también mejora la gestión de la red proporcionando canales de datos OAM&P (Operations, Administration, Maintenance and Provisioning). En definitiva, todas estas medidas contribuyen a reducir

los desplazamientos de personal de mantenimiento y de este modo reducir grandes costes a los operadores de servicio.

Arquitectura de red SONET/SDH

Los elementos básicos de una red óptica SONET/SDH son: sistemas ópticos de línea, multiplexores terminales, multiplexores de agregación y extracción (ADMs) y cross-connects digital (DXCs). Los sistemas ópticos de línea están formados por fibras ópticas, amplificadores y regeneradores, entre otros, y proporcionan la capacidad de transmisión de la red SONET/SDH. Por otro lado, los multiplexores terminales se encargan de multiplexar el tráfico de los diferentes servicios a través de interfaces normalizadas. Los ADMs ofrecen las mismas funcionalidades que los multiplexores terminales, si bien permiten además acceder a una porción del tráfico que los atraviesa para realizar labores de inserción/extracción (add/drop) de canales. Por último, los DXCs se encargan de realizar funciones de conmutación. Así, un DXC permite conexiones sin bloqueo entre cualesquiera de sus puertos de entrada y de salida. Por lo tanto, los DXCs son los elementos que permiten una mayor flexibilidad en relación con la gestión de red.

La forma de conexionar entre sí los anteriores elementos de red proporciona la topología de la red SONET/SDH, la cual puede ser muy variada. De este modo, se pueden tener topologías en anillo, malla, estrella o árbol. De entre todas ellas, las más comunes son el anillo y la malla, las cuales se representan en la figura 2.4. En el caso de la malla, cada nodo de red puede conectarse con cualquier otro por medio de DXCs. Esta topología permite un gran número de rutas alternativas en caso de caída de algún elemento de red o de corte de alguna fibra. Suele utilizarse en el núcleo de la red. Por otro lado, el anillo consiste en una concatenación de ADMs, cada uno de los cuales se encarga de insertar/extraer tráfico en/de el anillo desde/hacia una determinada área. Suele utilizarse como red de acceso y dispone de mecanismos de gestión de ancho de banda y de protección frente a cortes de fibra o fallos de los equipos.

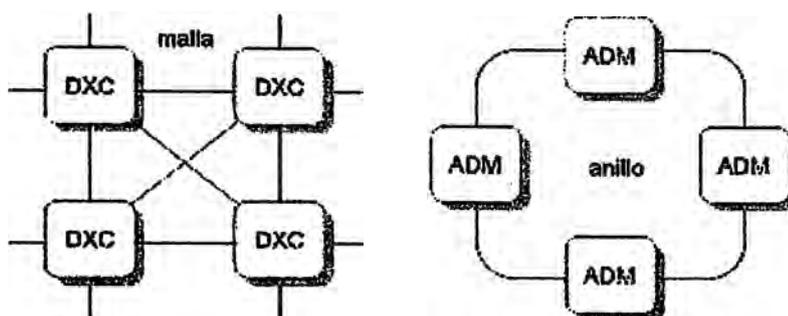


Figura. 2.4 Topologías de malla y anillo en SONET/SDH.

Todas estas topologías de red pueden combinarse y enlazarse entre sí para formar arquitecturas de red más complejas. Así, por ejemplo, varios anillos pueden enlazarse entre sí por medio de un anillo mayor utilizando DXCs para enrutar el tráfico en los puntos de unión de dos de los anillos. En la figura 2.5 se muestra una posible arquitectura de red. Varios anillos SONET/SDH se encargan de recoger el tráfico de diferentes usuarios (Customer Premises Equipment, CPE) por medio de ADMs y encaminarlo por medio de DXCs hacia una o varias redes metropolitanas. Asimismo, estas redes metropolitanas disponen de enlaces con redes de largo alcance (backbone) basadas en DWDM y que suelen tener una estructura de malla. Estas redes deben caracterizarse por una buena escalabilidad para poder acomodar los incrementos de ancho de banda de las redes Metropolitanas.

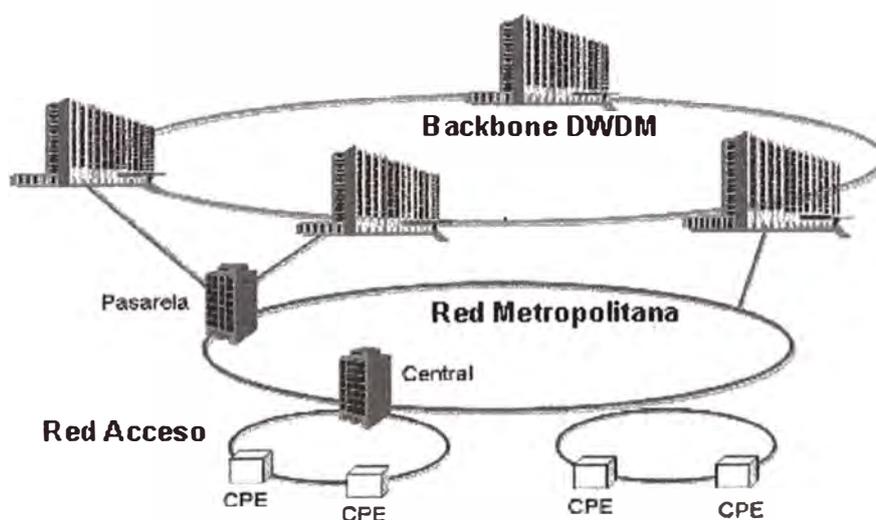


Figura 2.5 Arquitectura de red óptica SONET/SDH.

2.2.5 Introducción al WDM

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 óptica típica podía estar formada por 12 fibras, y rara vez se instalaban 24. 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.

WDM (Wavelength Division Multiplexing) es una tecnología de multiplexación por división de longitud de onda orientada a transmitir información a través de fibra óptica. Dicho proceso permite que diferentes cadenas de información sean transportadas a diferentes longitudes de onda y enviadas todas a la vez por una única Fibra Óptica, con lo cual se incrementa la capacidad de transmisión en el medio físico. Una manera de asemejar esta multiplexación es la transmisión de una estación de radio, en diferentes longitudes de onda sin interferir una con otra, porque cada canal es transmitido a una frecuencia diferente, la que puede seleccionarse desde un sintonizador (Tuner). Otra forma de verlo, es que cada canal corresponde a un diferente color, y varios canales forman un “arco iris”.

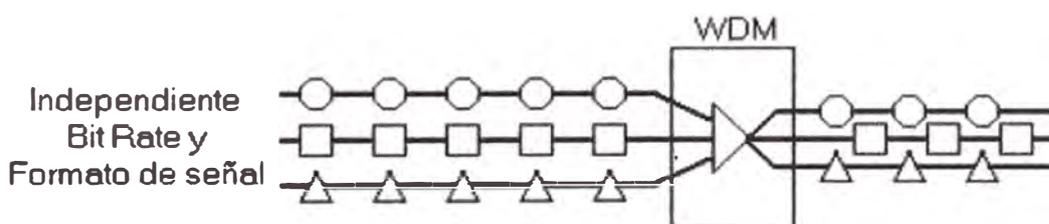


Figura 2.6 Incremento de la capacidad con WDM

Por poner un ejemplo, si queremos transmitir 16 canales a lo largo de 600 Km utilizando métodos tradicionales, necesitaríamos 16 fibras y un total de 144 elementos de regeneración y amplificación de señal. En cambio, esto mismo implementado mediante tecnología WDM, reduciría los dispositivos necesarios a una sola fibra y seis elementos de amplificación, como se muestra en la figura 2.7. Además los sistemas tradicionales

utilizan sistemas optoelectrónicos de amplificación, menos eficientes que los sistemas puramente ópticos utilizados en WDM.

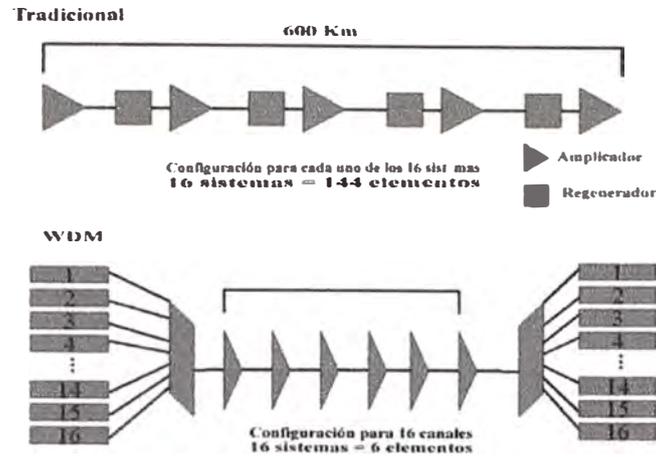


Figura 2.7 Transporte por WDM

La tecnología WDM ha estado en el mercado desde los años 80, pero solamente después que el amplificador de fibra dopado con Erblio (EDFA) llegó a ser capaz de proveer un ganancia eficiente con bajo ruido, en la banda de los 1550 nm, la WDM punto a punto llegó a ser una aplicación realista capaz de incrementar la capacidad de transmisión y resolver los problemas del ancho de banda de las redes Metropolitanas.

Componentes de una red WDM

Este tipo de sistemas básicamente se forman con:

- **Fuentes ópticas ó emisores:** Convierten la señal eléctrica en energía luminosa y la emiten con diferentes longitudes de onda.
- **Multiplexores ópticos:** combinan la energía luminosa emitida por las fuentes ópticas para alimentar la fibra.
- **Medio de transmisión:** Esta es la fibra óptica, debe tener una baja atenuación para las longitudes de onda de interés.
- **Demultiplexores ópticos:** Dispositivos que separan la energía luminosa que le llega a través de la fibra por medio de la longitud de onda.
- **Fotodetectores:** Este es el elemento que se encarga de hacer la conversión de energía óptica a señal eléctrica.

a) Emisores

En WDM, las señales eléctricas son convertidas en señales ópticas (luz) mediante diodos láser cuya longitud de onda se encuentra dentro de un rango permitido para poder realizar la multiplexación. En la literatura encontraremos indistintamente el uso de WDM o DWDM (multiplexación por longitud de onda densa), las cuales se diferencian por las distintas longitudes de onda que utilizan. El WDM convencional está estandarizado internacionalmente por la ITU-T G 692 para utilizar longitudes de onda que van desde 1310 nm hasta 1550 nm donde la distancia entre los distintos canales que ocupan la misma fibra es de entre 0.8 nm (100 GHz) y 1.6 nm (200 GHz). Este rango de longitudes de onda se escoge debido a que dentro de este rango las pérdidas en la *Fibra Óptica* son mínimas, exceptuando el pico de pérdidas existente en 1400 nm debido a las cualidades físicas del material (ver figura 2.8).

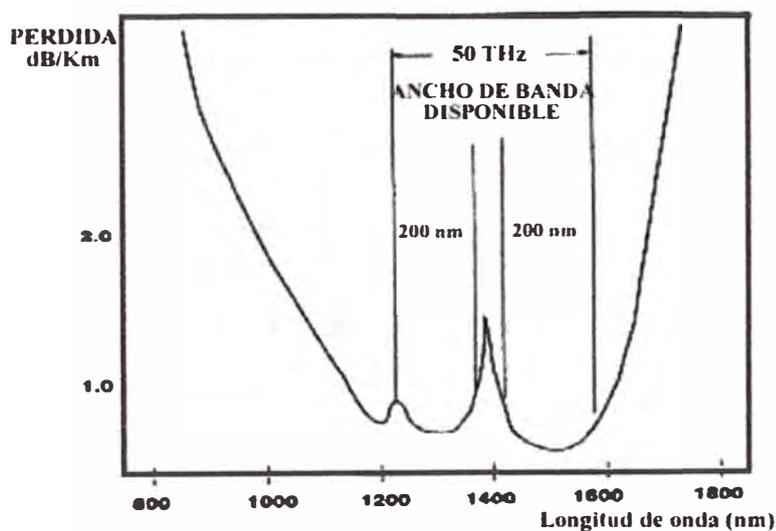


Figura 2.8 Ancho de banda utilizado por WDM

Como podemos observar en la gráfica anterior, en un rango de 200 nm, entre 1300 y 1500 nm, la atenuación media es de entre 0.2 dB/Km y 0.5 dB/Km. Por otro lado la DWDM utiliza para el mismo rango de longitudes de onda un espaciado entre canales de menos de 100GHz. Ya se han probado sistemas con separación entre canales de 0.4 nm (50 GHz) y 0.2 nm (25 GHz) con resultados satisfactorios.

b) Multiplexores

En WDM son necesarios dispositivos eficaces para introducir por una única fibra distintas longitudes de onda. Si se utilizan acoplamientos pasivos en la multiplexación las señales de

luz perderían gran parte de su fuerza. Por otro lado si se utilizan rejillas Littrow ó Matriz de rejilla de guía de onda (AWGs - Array Waveguide Gratings) ó elementos similares la pérdida se reduce considerablemente. Una típica rejilla Littrow comercial combinando 32 canales tiene una pérdida de unos 6 dB por canal (3/4 de cada señal es perdida). Existen AWGs con pérdidas totales de 5 dB para 64 canales. El escoger unos aparatos u otros depende del sistema que queramos construir. Si un sistema va a utilizar tan solo 4 canales se puede utilizar un acoplamiento. Por otro lado, si queremos un sistema con mayor número de canales, un dispositivo de los mencionados será mucho más adecuado.

c) Fotodetectores de luz

En el lado receptor, es necesario recuperar las señales transmitidas a diferentes longitudes de onda en la fibra. Debido a que por naturaleza los fotodetectores son dispositivos de banda ancha, las señales ópticas son demultiplexadas antes del detector. Se utilizan fundamentalmente dos tipos de fotodetectores, el fotodiodo PIN (Positive-Intrinsic-Negative) y el fotodiodo de avalancha (APD). El fotodiodo PIN trabaja bajo principios similares a los LEDs pero al revés, es decir, la luz es absorbida más que emitida, y los fotones se convierten en electrones en una relación 1:1. Los APDs son dispositivos similares a los fotodiodos PIN, pero su ganancia se obtiene a través de un proceso de amplificación. Un fotón actuando en el dispositivo libera muchos electrones. Los fotodiodos PIN tienen muchas ventajas, incluido su coste y su fiabilidad, pero los APDs tienen mayor sensibilidad de recepción y mayor exactitud. Sin embargo los APDs son más caros que los fotodiodos PIN, y pueden tener requerimientos de intensidad mayores y son más sensibles a la temperatura.

d) Repetidores y amplificadores

La tecnología WDM permite transmisión de información en un rango amplio de distancias entre emisor y receptor. En distancias cortas la atenuación de la fibra (mínima para una longitud de onda de 1550 nm) y la dispersión (mínima para 1300 nm) no representan un gran problema. Sin embargo para largas distancias estos fenómenos son un factor a tener en cuenta por lo que se requiere el uso de amplificadores/repetidores

Los repetidores convencionales funcionan transformando la señal óptica en eléctrica, amplificando ésta última, y transformándola de nuevo a una señal óptica mediante un diodo Láser para de nuevo inyectarla en la Fibra Óptica con mayor potencia que antes. Este

proceso es complejo e introduce retardos debido a los dispositivos electrónicos que son necesarios para ello. Este problema se podría solucionar si todo el camino fuese óptico (all-optical).

Esta solución fue llevada a cabo por la Universidad de Southampton mediante repetidores/amplificadores ópticos de fibra dopada con erbio (EDFAs). Estos repetidores evitaba el tener que convertir la señal óptica a eléctrica y viceversa, y evitando así los retardos. El funcionamiento de estos repetidores ópticos se basaba en la posibilidad de amplificar una señal óptica de longitud de onda 1550 nm haciéndola pasar por una fibra de 3 metros de longitud, dopada con iones de erbio, e inyectando en ella una luz Láser de 650 μm (fenómeno que se conoce como bombeo o pumping), consiguiéndose de esta manera hasta 125 dB de ganancia. En la actualidad, los repetidores/amplificadores comerciales utilizan un Láser con una longitud de onda de 980 o 1480 μm en lugar de los 650 μm originales.

Los amplificadores dopados de erbio tienen un rango de funcionamiento limitado en cuando a la longitud de onda de las señales que procesan. A la hora de poner muchos amplificadores en cascada hay que tener en cuenta la aparición de varios efectos que pueden distorsionar la señal. Estos efectos son:

- Ganancia no lineal dinámica de los amplificadores.
- Generación de fluctuación de potencia.
- Ruido introducido por los amplificadores.
- Dependencia de efectos de polarización.

De todos estos efectos sólo los tres primeros son realmente significativos. El cuarto efecto solamente es importante en sistemas con un alto número de amplificadores.

El número de amplificadores en un tramo se reduce en la misma proporción que aumenta el número de canales por una sola fibra, lo que aumenta la fiabilidad del sistema y su complejidad.

2.2.6 La Tecnología DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

El término DWDM no implica una diferencia tecnológica a la empleada por la WDM. En realidad, los dos términos pueden ser usados indistintamente. Estrictamente hablando, DWDM se refiere a menor espaciamiento de longitudes de ondas de acuerdo a lo propuesto en la ITU-T G 692.

Despliegue de la tecnología DWDM

Uno de los factores más importantes a considerar en el diseño de una red WDM es el número de las longitudes de onda que se van a utilizar. El número máximo de longitudes de onda es limitado por la tecnología de los dispositivos ópticos y es afectado sobre todo por el ancho de banda total disponible o la gama espectral de los componentes (incluyendo la fibra) y el espaciamiento entre los canales. Las fibras convencionales tienen un punto bajo de atenuación entre 1335 nm y 1625 nm con una ventana de pico de agua en los 1385 nm. Las nuevas fibras "all wave" no tienen este pico del agua y por lo tanto pueden utilizar un espectro más grande tal como se muestra en la figura 2.9. El espaciamiento en sí mismo es afectado por varios factores tales como la velocidad de bit del canal, la potencia de energía óptica, las no linealidades en la fibra, y la resolución de transmisores y de receptores. En la DWDM, una gran cantidad de longitudes de onda (> 160) se empaqueta de manera densa en la fibra. En el caso de DWDM, los canales se disponen en las bandas C y L de la fibra óptica, correspondientes a las longitudes de onda situadas entre 1530 y 1625 nm, por ser estas longitudes de onda las de actuación de los amplificadores EDFA. El espaciado entre los distintos canales multiplexados en DWDM es muy pequeño, típicamente de 1.6 nm, 0.8 nm, 0.4 nm y hasta 0.2 nm.

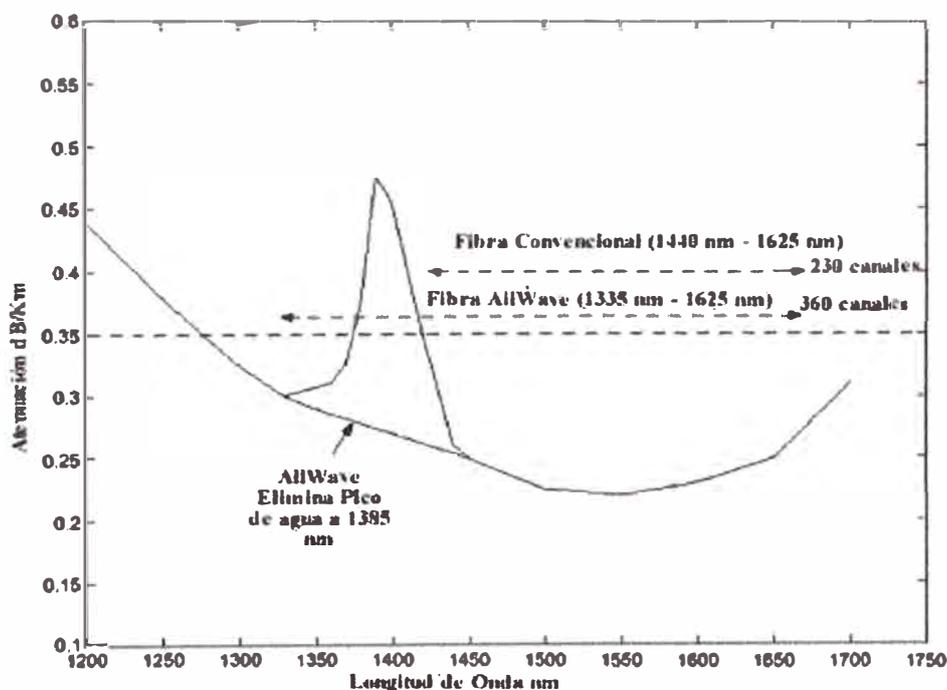


Figura 2.9 Fibra Convencional y Fibra Allwave

Una tecnología WDM alternativa con un número más pequeño de longitudes de onda , un ancho mayor por canal, y un espaciamiento de canal más grande, y un costo mucho más bajo es el denominado Coarse-WDM (**CDWM**), en el cual el espaciado entre los distintos canales que se introducen en una fibra es mucho mayor, generalmente de 20 nm. Además, la disposición de los canales no se limita exclusivamente a las longitudes de onda de DWDM, sino que se hace uso de un mayor margen del espectro de utilización de la fibra óptica. Esto se establece en la norma ITU – T G.694.2. Mas adelante volveremos a tratar este concepto.

2.2.7 Taxonomía de redes públicas

Las redes por su desarrollo pueden tener diferentes tipos de clasificación, aquí mencionaremos alguna de ellas:

a) Según la titularidad de su propietario:

Públicas: Pertenecen a operadores de telecomunicación, que las explotan y ofrecen sus servicios a terceros.

Privadas: Los equipos, enlaces, canalizaciones, etc, pertenecen a empresas privadas. Algunos enlaces emplean infraestructura pública (líneas alquiladas)

b) Según su ámbito Geográfico:

Redes de datos:

LANs : Una LAN es un segmento de red que tiene conectadas estaciones de trabajo y servidores o un conjunto de segmentos de red interconectados, generalmente dentro de la misma zona. Por ejemplo un edificio.

MANs : Una red MAN es una red que se expande por pueblos o ciudades y se interconecta mediante diversas instalaciones públicas o privadas, como el sistema telefónico o los proveedores de sistemas de comunicación por microondas o medios ópticos.

WANs : Las WAN y redes globales se extienden sobrepasando las fronteras de las ciudades, pueblos o naciones. Los enlaces se realizan con instalaciones de telecomunicaciones públicas y privadas, además por microondas y satélites.

c) Taxonomía de Redes: Modelo Núcleo-Frontera (Figura 2.11)

En la introducción de este trabajo, en el punto 2.2.2 realizamos un desglose de la red global, el cual nos permitía hablar de tres tipos de redes, la de acceso, la MAN y la de larga distancia (ver figura 2.10). Pero en realidad las líneas entre los dominios de los tipos de redes no son siempre tan claras. Las redes de larga distancia y las redes metropolitanas a veces no están claramente delimitadas; lo mismo es cierto para los dominios de acceso y los dominios metropolitanos.

Además existen otras visiones de la red global. Una por ejemplo define la red de acceso como parte de la MAN, más que algo separado, mientras otros incluyen la conectividad de la empresa como algo del dominio metropolitano. Con este punto de vista, la red metropolitana se desglosa en el núcleo o Core y la frontera ó Edge.

Corazón (Core) – Esto es esencialmente las redes de larga distancia a pequeña escala. Se considera el corazón de la MAN porque interconecta los POP del “carrier” y no se conecta directamente a los usuarios finales. Los dispositivos en el núcleo tienen las siguientes características:

- Realizan la función de encaminamiento de flujo de paquetes de alta velocidad desde sus orígenes a destinos.
- Responden a instrucciones de dispositivos frontera y se aseguran de la disponibilidad de recursos a través de la WAN para garantizar QoS extremo a extremo.
- Son, más robustos que los dispositivos frontera.
- Proporcionan > 20 Gb/s de ancho de banda en sus tarjetas
- Son sin bloqueo y soportan un elevado número de interfaces de alta velocidad.

Frontera (Edge) : Viene a ser el segmento entre los Punto de Presencia POP del “carrier” y las facilidades de acceso de los usuarios finales. Sus dispositivos tienen las siguientes características:

- Concentración de tráfico (Mux estadístico)
- Discriminación (determinación característica de diferentes tráfico)
- Asegurar la disponibilidad de los niveles de calidad de servicio requerido.
- Interoperabilidad de protocolos
- Punto origen de servicios tipo IP
- Proporcionan < 20 Gb/s de ancho de banda en sus tarjetas.

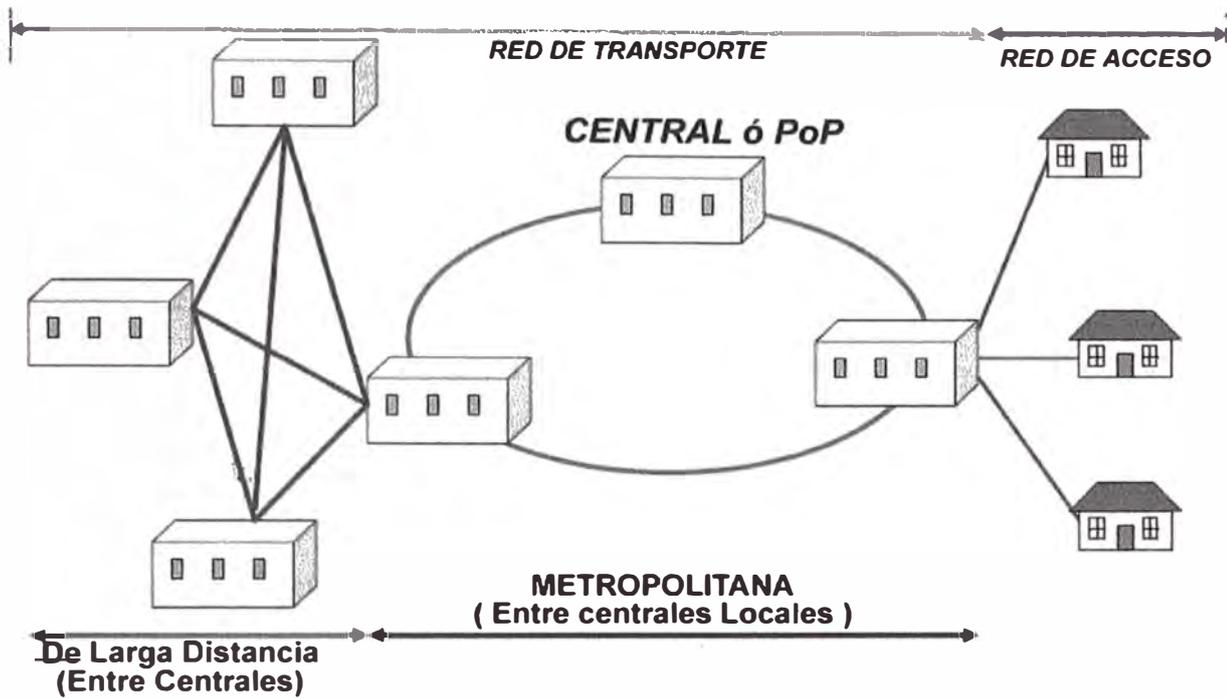


Figura 2.10 Taxonomía de redes (Públicas)

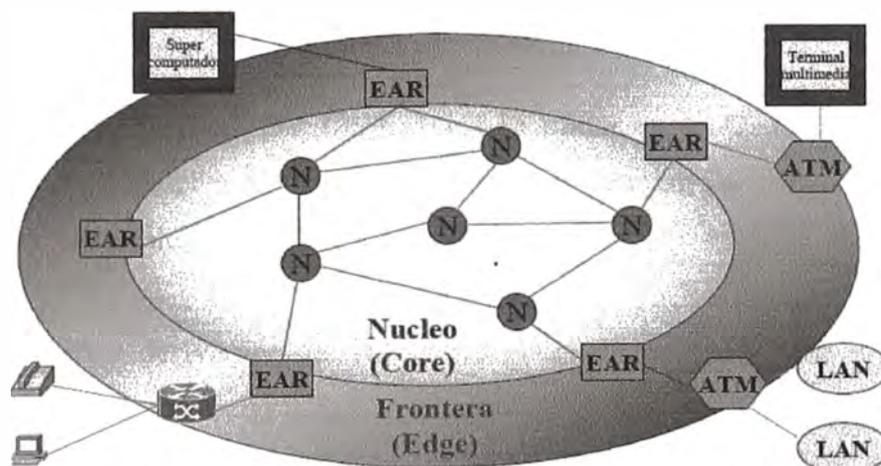


Figura 2.11 Modelo Núcleo-Frontera

2.3 La Fibra Óptica como medio de transmisión

2.3.1 Una breve historia de la Fibra Óptica.

Un principio importante en la física llega a ser el fundamento teórico para las comunicaciones ópticas: “Las señales eléctricas de luz en un medio de cristal puede transportar mas información sobre distancias largas que las que señales eléctricas a baja frecuencia pueden transportar en un medio de cobre o coaxial”. Este desafío llevo a los científicos a desarrollar un vidrio puro que sea capaz de retener la luz.

Hoy en día todos sabemos que las fibras ópticas son filamentos de vidrio de alta pureza extremadamente compactos. El grosor de una fibra es similar a la de un cabello humano, con bajas pérdidas de señal, amplia capacidad de transmisión y un alto grado de confiabilidad debido a que son inmunes a las interferencias electromagnéticas de radiofrecuencia. Las fibras ópticas no conducen señales eléctricas por lo tanto son ideales para incorporarse en cables sin ningún componente conductor y pueden usarse sin ningún problema en zonas de alta tensión. Tienen la capacidad de tolerar altas diferencias de potencial sin ningún circuito adicional de protección y no hay problemas debido a los cortos circuitos. Tienen un gran ancho de banda, que puede ser utilizado para incrementar la capacidad de transmisión con el fin de reducir el costo por canal, de esta forma es considerable el ahorro en volumen en relación con los cables de cobre.

La Historia de la comunicación por fibra óptica se inicia en 1977, cuando se instala un sistema de prueba en Inglaterra; dos años después, se producían ya cantidades importantes de pedidos de este material.

Antes, en 1959, como derivación de los estudios en física enfocados a la óptica, se descubrió una nueva utilización de la luz, a la que se denominó rayo láser, que fue aplicado a las telecomunicaciones con el fin que los mensajes se transmitieran a velocidades inusitadas y con amplia cobertura. Esta utilización en primera instancia del láser era muy limitada debido a que no existían los conductos y canales adecuados para hacer viajar las ondas electromagnéticas provocadas por la lluvia de fotones originados en la fuente denominada láser, siendo esto un nuevo reto al que se enfrentaron los investigadores de la ciencia aplicada. Fue en el año 1966 cuando surge la primera propuesta para usar una guía óptica para la comunicación, desde entonces el avance es incesante y hoy en día la

tecnología hace que esta fibra sea capaz de enviar datos a velocidades extremadamente altas.

Hitos importantes en la historia de la Fibra

En 1854, el físico británico James Tyndal preparó un tanque de agua con una cañería por ambos lados permitiendo que fluyera agua por los ductos, y entonces envió una luz luminosa del lado opuesto del tanque hacia el flujo de agua. Conforme el agua caía por la cascada, un arco de luz seguía aguas abajo conduciendo la luz. Esto demostró la reflexión interna total, un principio que se discutirá después en más detalle.

En 1880, Alejandro Graham Bell inventó el photophone. Bell consideró esto como un descubrimiento mayor que su invención anterior, el teléfono. Con el photophone, Bell hablaría en un micrófono que causaría una vibración en un espejo. La luz del sol golpearía en el espejo, y la vibración del espejo transmitiría la luz por el espacio de aproximadamente 200 metros. El espejo del receptor recibiría la luz y causaría una vibración en un cristal de selenio, y el ruido saldría en el otro extremo. (Ver figura 2.12) Aunque el photophone tuvo éxito permitiendo conversaciones a espacio abierto, tenía inconvenientes: No funcionaba bien por la noche, en la lluvia, o si alguien caminaba entre la señal y el receptor. Bell perdió interés en esta idea. El problema de la transferencia de la información haciendo uso de la luz permaneció como un problema insoluble. Mientras tanto el mundo aprendió a comunicarse usando la corriente eléctrica sobre el cable de cobre.

Aún así los científicos e ingenieros tuvieron conocimiento por años que la fibra óptica podía transmitir la luz, pero la fibra no podía transmitir información demasiado lejos. No fue hasta el año 1959 en el que se inventa el láser. Este dispositivo era un refinado rayo de luz controlado, que podría transmitir información a distancias largas. Desgraciadamente, los mismos inconvenientes que había experimentado Alejandro Graham Bell afectaron al láser. Aunque pudiera usarse por la noche, no funcionó durante la lluvia, la niebla, o la interferencia de cualquier edificio entre el remitente y el receptor.

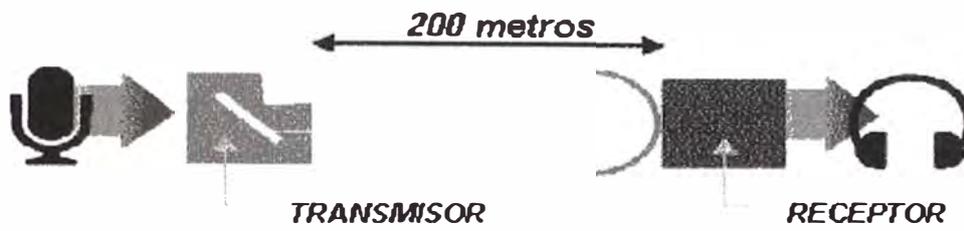


Figura 2.12 *El photophone de Bell*

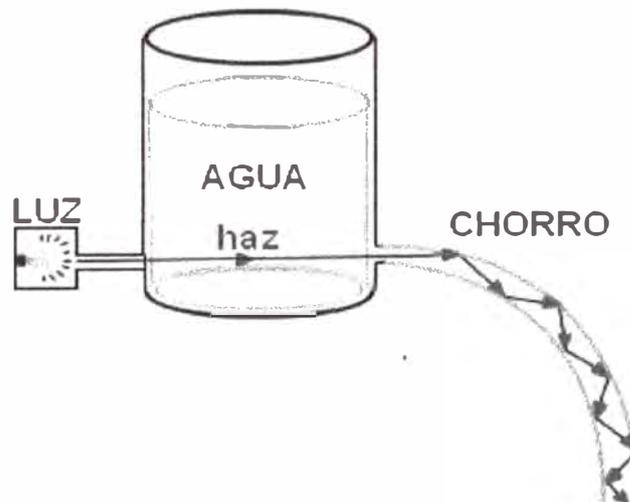


Figura 2.13 Experimento de Tyndall

Fue Charles K. Kao en 1966 en los laboratorios STC (Standard Telecommunications Laboratory), el que propuso la idea que si se pudiera tomar vidrio y se podría purificarlo, a un nivel bajo de impurezas, podría usarse para comunicaciones ópticas de la misma manera que en 1870 lo experimento Tyndall con sus tuberías de agua.

El Dr. Robert Maurer de Corning, en Nueva York, propuso la primera fibra óptica de baja pérdida, con menos de 20 dB/km (decibelios por kilómetro) de pérdida. (Hoy, los cables monomodos, se venden con especificaciones debajo de los 0.25 dB/km .)

2.3.2 Descripción general de la fibra óptica

La fibra óptica se usó inicialmente en las plataformas principales, hoy ya esta llegando al abonado. Mientras la tecnología que soporta la fibra óptica es compleja, y su proceso industrial muy sofisticado, el propio producto final es sorprendentemente amistoso al usuario. Con prácticas normales de campo y equipo no muy complicado, el proceso de instalación de un sistema óptico es simple, rápido, y de bajo costo; y las pruebas después de la instalación son sencillas. El hecho es que, hoy, la tecnología de fibra óptica supera de lejos a la del cobre, pero realmente es más fácil trabajar con ella.

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 (figura 2.14). Al extremo opuesto, un receptor cambia los pulsos regresándolos a señales eléctricas.

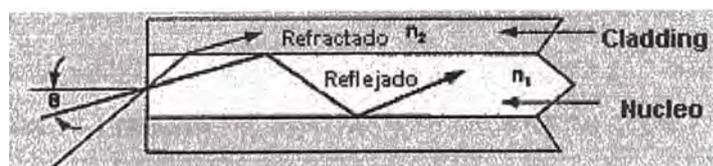


Figura 2.14 El principio de operación de la fibra óptica esta basado en el principio de la reflexión interna total. En la figura, n =Índice de Refracción. Cuando $n_1 > n_2$, la fibra tiene Reflexión interna total.

La fibra óptica básica, esta compuesto de tres capas concéntricas que difieren en propiedades (figura 2.15).

- **Núcleo ó Core:** La parte interna que conduce la luz.
- **Revestimiento ó Cladding:** la capa media que sirve para confinar la luz en el centro.
- **Buffer ó Recubrimiento:** la capa exterior que sirve como un "amortiguador" para proteger al núcleo y al revestimiento de algún daño.

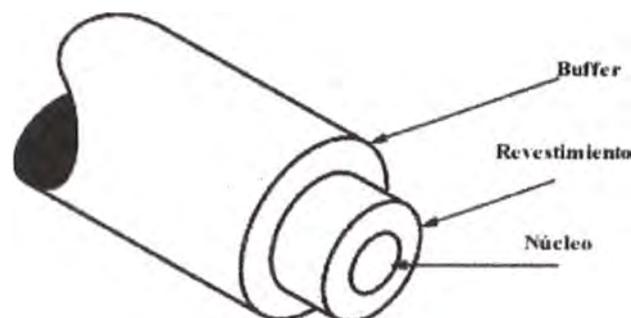


Figura. 2.15 Las capas concéntricas de una fibra óptica incluye al núcleo que lleva la luz, revestimiento y el buffer de protección.

2.3.3 Propagación de la información en la Fibra Óptica

Como hemos mencionado 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 mantiene y propaga a través del núcleo. Se produce por ende el efecto denominado de Reflexión Total, tal como se ilustra en la figura 2.16.

La luz inyectada en el núcleo choca en las interfaces núcleo-revestimiento con un ángulo mayor que el ángulo crítico reflejándose hacia el núcleo. Desde 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 revestimiento.

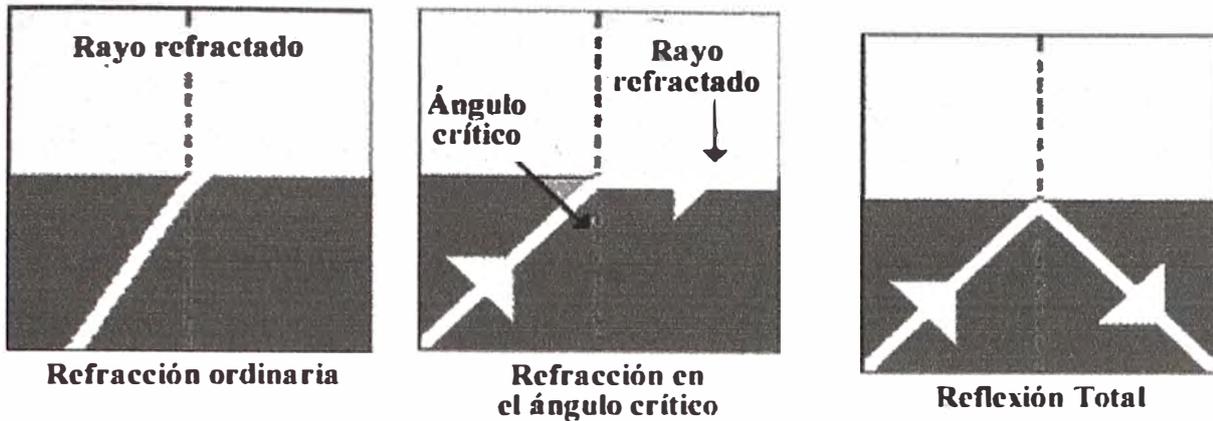


Figura 2.16 Los rayos de luz con ángulo menor al ángulo crítico se pierden en el revestimiento, las otras son atrapadas en el núcleo por la reflexión total de la misma.

Los rayos de luz pueden entrar a la fibra óptica si el rayo se halla contenido dentro de un cierto ángulo denominado CONO DE ACEPTACIÓN. Un rayo de luz puede perfectamente no ser transportado por la fibra óptica si no cumple con el requisito del cono de aceptación. El cono de aceptación está directamente asociado a los materiales con los cuales la fibra óptica ha sido construida. La figura 2.17 ilustra todo lo dicho

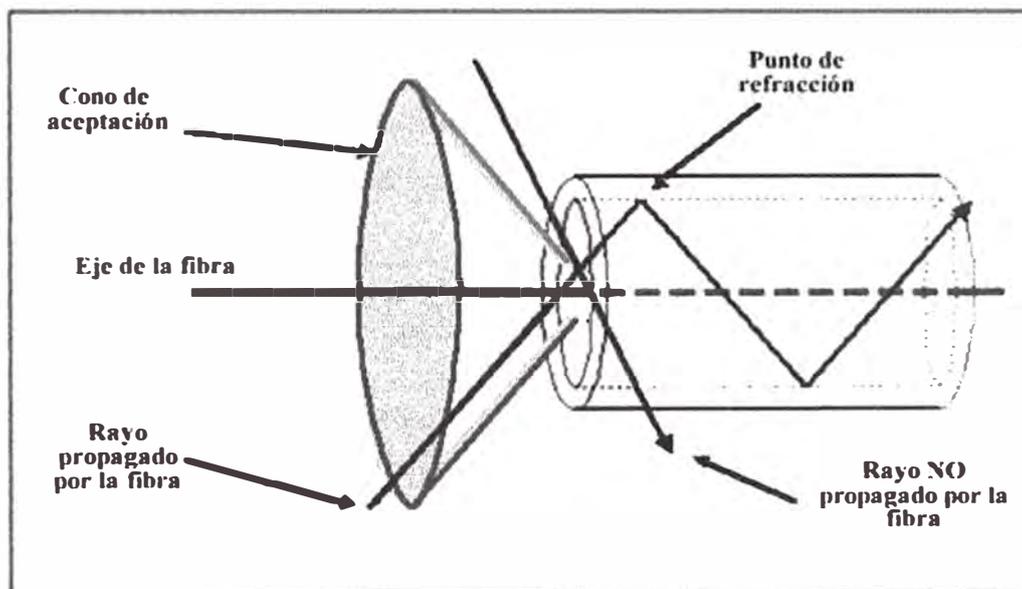


Figura. 2.17 El cono de aceptación en la Fibra óptica

La apertura numérica (NA.)

De acuerdo a la estructura de la fibra el índice del núcleo n_1 es ligeramente superior a la de revestimiento n_2 y su ángulo límite o crítico esta representado por la siguiente expresión:

$$\text{Sen}\alpha_0 = \frac{\eta_2}{\eta_1}$$

De aquí se concluye que todos los rayos luminosos que incidan con un ángulo menor que los $(90^\circ - \alpha_0)$ con respecto al eje de la fibra son conducidos por el núcleo. (Ver figura 2.18) Para acoplar al núcleo un rayo luminoso desde el exterior de la fibra (aire con índice de refracción $\eta_0=1$), el ángulo (entre el rayo luminoso y el eje de la fibra) se rige de acuerdo a la ley de refracción:

$$\frac{\text{Sen}\Theta}{\text{Sen}(90^\circ - \alpha_0)} = \frac{\eta_1}{\eta_0}$$

$$\text{Sen}\Theta = \eta_1 \cdot \text{Cos}\alpha_0 = \eta_1 \cdot \sqrt{1 - \text{Sen}^2\alpha_0}$$

Si consideramos la condición del ángulo límite:

$$\text{Sen}\alpha_0 = \frac{\eta_2}{\eta_1}$$

Se obtiene:

$$\text{Sen}\Theta = \sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2}$$

El máximo ángulo de acoplamiento Θ_{max} se denomina ángulo de aceptación del conductor de fibra óptica y es únicamente función de los índices de refracción η_1 y η_2 . Al seno del ángulo de aceptación se le denomina apertura numérica (AN) del conductor de fibra óptica

Este valor es de gran utilidad en el acoplamiento de la luz a los conductores de fibra.

$$NA = \text{Sen}\Theta_{Max}$$

Nota: Debido a que η_1 y η_2 son casi iguales se puede aproximar:

$$NA = \sqrt{2\eta_1(\eta_1 - \eta_2)}$$

Y Haciendo: $\frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1} = \Delta$

Obtenemos: $NA = \eta_1 \sqrt{2\Delta}$

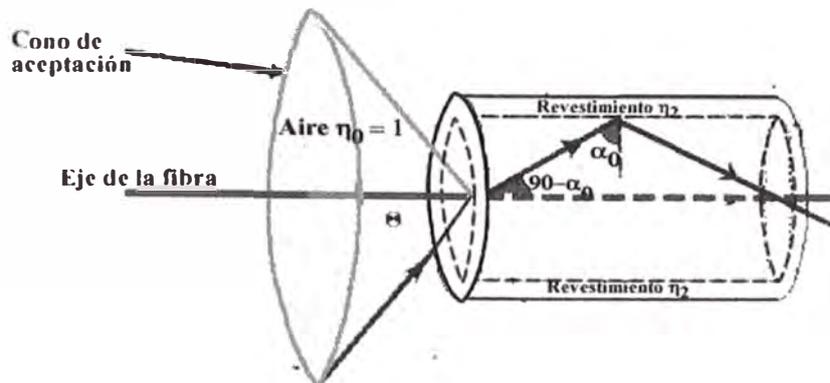


Figura 2.18. Ángulo de acoplamiento de la de fibra óptica

Observaciones

- Una NA alto 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.

2.3.4 Estructuras de las fibras ópticas

Ningún diseño de fibra satisface todos los requerimientos operacionales. Por razones económicas los fabricantes han concentrado sus esfuerzos en tres tipos de fibras:

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

Para poder obtener los índices de refracción distintos entre la revestimiento y núcleo de la fibra tales que satisfagan las condiciones de guía de luz se agrega impurezas al silicio, tales como el flúor y 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 la corteza dopada de flúor, asegurando un rebote sin pérdida.

a) Fibra a índice Escalón (Step Index Optical Fiber) 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 sabe en la fabricación de una fibra un núcleo cilíndrico de vidrio o plástico con índice de refracción n_1 es cubierta por una corteza igualmente de vidrio o plástico con un índice de refracción menor n_2 . Una fibra que esté constituido por un núcleo de vidrio y corteza de plástico se le denomina fibra PCS (Plastic-Clad Silica). Se pueden obtener elevados NA con este tipo de fibras que además se caracterizan por tener un diámetro de núcleo ancho, elevada atenuación y pequeño ancho de banda. Lo importante de este 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.

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. El número máximo de modos de luz M (camino 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, para una fibra del tipo step index se puede determinar matemáticamente por la siguiente expresión.

$$M = 0.5 \left(\frac{\text{diámetro del núcleo} * NA * \pi}{\lambda} \right)^2 = 0.5 \left(\frac{\pi D * NA}{\lambda} \right)^2$$

La 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).

Si la luz del emisor es distribuida uniformemente en el cono de aceptación la potencia óptica del pulso óptico de entrada es distribuida uniformemente en todos los modos. Debido a que cada modo tiene un tiempo diferente de propagación (porque

hay distancias distintas), por lo cual se produce una distorsión del pulso y en consecuencia se tiene un ancho de banda limitado. A este fenómeno se le llama la **Distorsión Multimodo** (Ruido determinístico coherente).

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%

Debido a que los diferentes modos intercambian energía sobre todo en las irregularidades como los empalmes o curvaturas se producen compensaciones de las velocidades entre los modos. Así el ensanche temporal Δt de los pulsos luminosos acoplados no es función lineal de la longitud lineal L del conductor de fibra óptica, sino que en el caso ideal, solamente se puede decir que es proporcional a la raíz cuadrada de la longitud

$$\Delta t \approx \sqrt{L}$$

La dispersión modal se puede eliminar totalmente, dimensionado al conductor de tal manera que solo conduzca un solo modo.

Pero sucede que este solo modo también se ensancha en el tiempo al atravesar un conductor. Este efecto se denomina dispersión cromática y lo explicaremos más adelante. Por tratarse de una propiedad del material esta dispersión en general se produce en todos los conductores de fibra óptica. Sin embargo la dispersión cromática resulta relativamente pequeña o nula frente a la dispersión modal en longitudes de onda que van desde los 1200 a los 1600 nm.

b) Fibras a índice gradual (graded index core)

Este 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 escalón, el núcleo está rodeado por el vidrio del cladding 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 a índice escalón. 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 2.19. y 2.20 El índice de refracción en función del radio del núcleo se expresa de la siguiente manera:

$$n^2(r) = n_0^2 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right]$$

Donde : n_0 es el índice de refracción en el centro del núcleo

r = radio

g = es el perfil del índice (ejemplo Cuadrático)

a = es el valor máximo del radio

$$\Delta = \frac{NA^2}{2\eta_1^2} = \frac{\eta_1^2 - \eta_2^2}{2\eta_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

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 (cuadráticos) del índice de refracción, el tiempo de propagación, para varios modos es casi ecualizado, lo cual reduce la distorsión debido a la propagación multimodo.

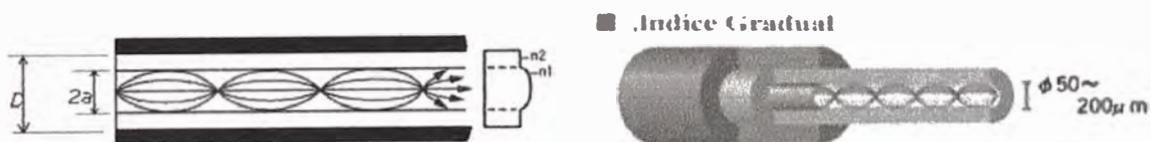


Figura 2.19 Perfil de la fibra de índice gradual

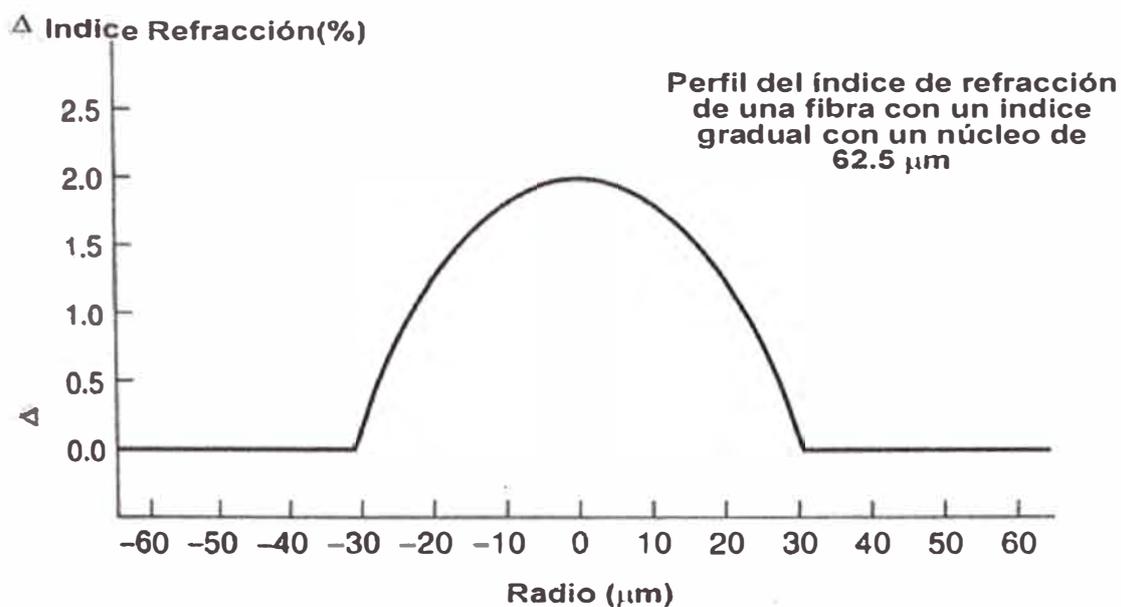


Figura 2.20 Perfil del índice refractivo de una fibra de índice gradual con un núcleo de 62.5- μm

c) **Fibras a modo único**

Estas fibras están caracterizadas por contener un núcleo de pequeñísimo diámetro, pequeño NA, baja atenuación y gran ancho de banda.

El requerimiento básico de 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.

El tipo de fibra monomodo mas simple, frecuentemente se le denomina fibra monomodo estándar, y tiene un perfil del tipo step-index (índice escalón), 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 2.21 nos muestra una vista de los dos tipos principales de fibras monomodos del tipo índice escalón fabricados con sílica.

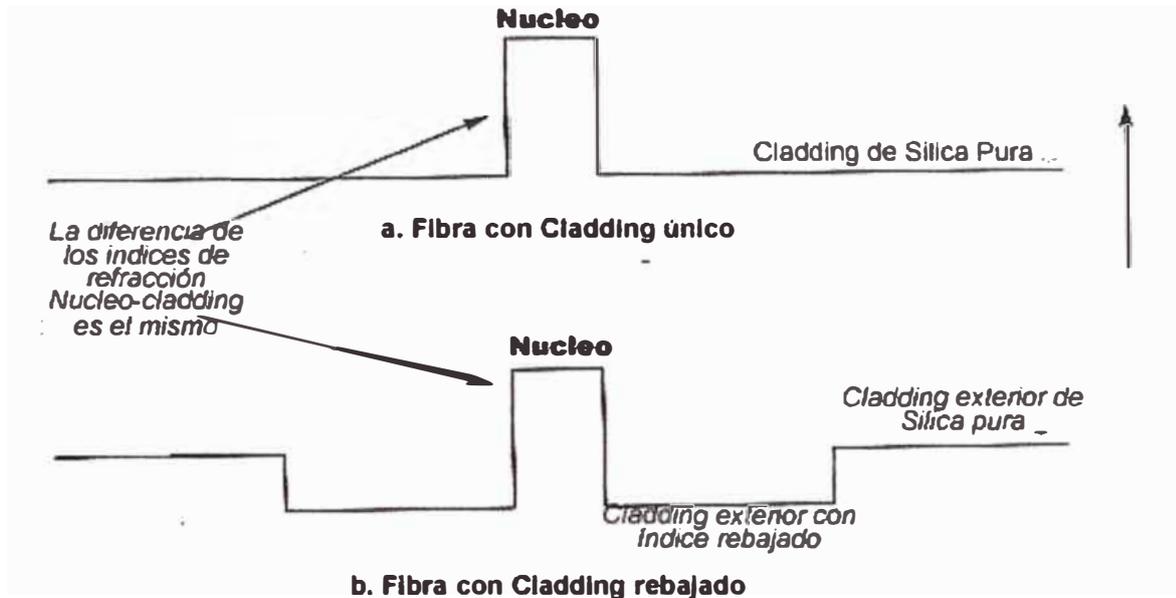


Figura. 2.21 muestra de dos tipos de fibras monomodo del tipo índice escalón. La diferencia entre los índices de refracción del núcleo y del cladding es el mismo, pero en la fibra de la parte inferior, el cladding interior es dopado con flúor para reducir el índice de refracción

El diseño más simple es el de una fibra con un cladding único como se muestra en la parte superior de la figura. El cladding es de sílica 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 sílica 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 sílica pura. Ambos diseños son típicos de fibras usadas en transmisiones de $1.3 \mu\text{m}$, con un núcleo de $9 \mu\text{m}$.

2.3.5 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, 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 λ_c , que estará dado por:

$$\lambda_c = \frac{\pi D \sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2}}{2.4}$$

Una fibra con diámetro D es del tipo monomodo para longitudes de onda mayores a λ_c . Si la longitud de onda decrece, empezará a transmitir 2 modos en λ_c .

Así como el diámetro de 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 solo un solo modo sea transmitido en un sistema de comunicación debemos de estar seguro 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 μm probablemente tendrá un ángulo de corte inferior a los 1.25 μm .

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 μm también será monomodo para 1.5 μm . Sin embargo una fibra de 1.55 μm no será del tipo monomodo para 1.3 μm , y ni las de 1.3 μm y 1.55 μm serán del tipo monomodo para una longitud de onda de 0.85 μm .

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 adicionado nuevos modos. Los modos extras empezarán a interferirse unos con otros y con los modos primarios, causando serios problemas de performance. Así como las fibras multimodos, cualquier perturbación menor puede afectar al modo de propagación, a mas modos será menos predecible las características de la fibra.

Si bien desde mediados de los 60 cuando Charles Kao dio a conocer las ventajas de las fibras monomodos 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 monodo del tipo índice escalón no eran ideales, Su dispersión tiene un mínimo a 1.31 μm , pero su atenuación tiene su mínimo en 1.55 μm .

Los mejores amplificadores disponibles de fibras dopados en Erblio, operan entre los 1.5 y 1.6 μm , 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.

2.3.6 La dispersión en la fibra óptica monomodo.[⁴]

Con la fibra monomodo estándar dejó de tener importancia la dispersión modal, pero pasó a tener una mayor importancia la dispersión espectral o dispersión cromática, causada por la variación de la velocidad de la luz a través de una fibra con una determinada longitud de onda. La dispersión cromática esta formada por la suma de dos componentes: la dispersión inherente al material y la dispersión originada por la estructura de la guía de onda, estos componentes pueden tener signos diferentes dependiendo del incremento o disminución de la velocidad de la luz con la longitud de onda. Ambos componentes se cancelan en un punto cercano a 1.31 μm en una fibra monomodo estándar del tipo índice escalón. Esta es una longitud de onda útil, pero no es ideal. La pérdida de una fibra de vidrio es menor a 1.55 μm , y los amplificadores dopados de Erblio operan en este rango.

La dispersión del material es una característica inherente del material, que no puede ser fácilmente cambiada sin alterar la composición del vidrio y aumentar la atenuación. Sin embargo, es posible desplazar la dispersión modificando la dispersión de guía de onda. La dispersión de guía de onda se origina porque la propagación de la luz en una guía de onda depende de la longitud de onda así como de las dimensiones de la guía. La distribución de la luz entre el núcleo y el cladding cambia con la longitud de onda.

El cambio de la distribución de la luz afecta la velocidad de transmisión de la luz a través de la fibra. El núcleo y el cladding tienen diferentes índices de refracción que determina la velocidad de la luz en ellos. Ya que la luz permanece un tiempo tanto en el núcleo como en el cladding, su velocidad efectiva a través de toda la fibra es un promedio que depende de la distribución de la luz entre ambos. Un cambio en la longitud de onda cambiara la distribución de la luz, y asimismo la velocidad promedio, causando otra dispersión de guía de onda.

Ambas dispersiones dependen del rango de longitud de onda de la señal, afortunadamente la dispersión puede tener diferentes símbolos, dependiendo si la velocidad de la luz en la fibra se incrementa o disminuye con la longitud de onda. De esta manera las dispersiones de guía de onda y del material se cancela una a otra en un punto cercano a $1.31 \mu\text{m}$ en una fibra estándar del tipo índice escalón tal como se muestra en la figura 2.22. Cambiando el diseño de la interfase núcleo-cladding se puede alterar la dispersión de guía de onda y así cancelar la dispersión cromática en otra longitud de onda.

Existen dos tipos de dispersión desplazada, con pequeñas diferencias, que han llegado a tener gran importancia en el desarrollo tecnológico de la fibra

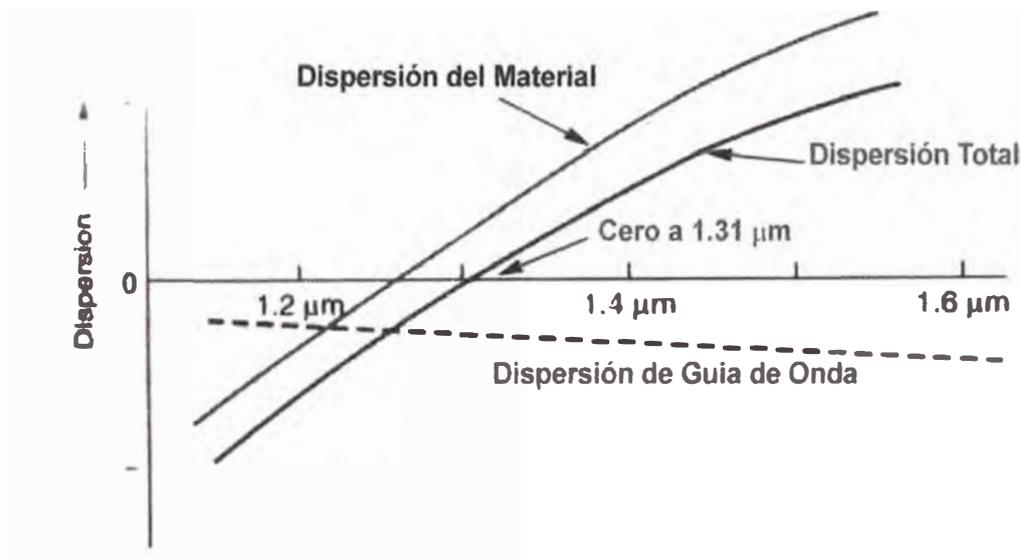


Figura 2.22 La dispersión de guía de onda desplaza la dispersión cromática para producir una dispersión nula a los $1.31 \mu\text{m}$ en una fibra monomodo del tipo índice escalón.

a) La fibra de dispersión desplazada. (ITU-T G.653)[⁵]

La primera fibra con dispersión desplazada fue diseñada para una dispersión cero a una longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$. Esto fue realizado incrementando la magnitud de la dispersión de guía de onda, como se muestra en la figura 2.23. Esta fibra fue introducida en el mercado a mediados de los 80's y permanece en uso, sin embargo nunca ha llegado a ser tan común como la fibra monomodo standard.

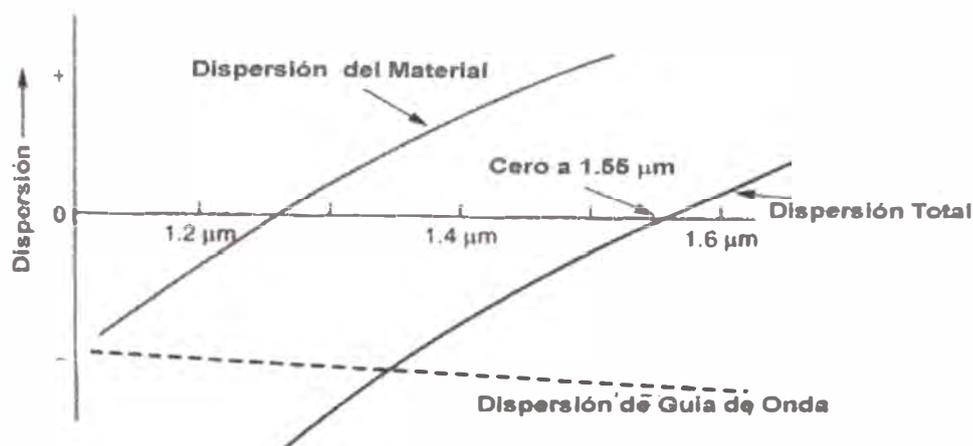


Figura 2.23 Una fibra diseñada con una mayor dispersión de guía de onda, desplaza la longitud de onda de dispersión cero a los $1.55 \mu\text{m}$

En la siguiente figura 2.24 mostramos el diseño comercial de una fibra de dispersión desplazada nula. El núcleo tiene un pico del índice refractivo en el centro, cae gradualmente al mismo valor que el del cladding exterior, se fabrica con sílica pura. Un pequeño cladding interior de sílica pura rodea al núcleo interno, y este a su vez es rodeado por un núcleo exterior. El índice refractivo del núcleo exterior se incrementa con la distancia del núcleo hasta que alcanza un pico a la mitad de camino entre el índice de sílica pura y el pico interior. Luego cae suavemente hasta alcanzar el nivel del cladding exterior de sílica pura. Este diseño incrementa la dispersión de guía de onda. Asimismo también afecta el diámetro de modo de campo, reduciéndolo a aproximadamente $8.1 \mu\text{m}$ en los $1.55 \mu\text{m}$, comparado a los $10.5 \mu\text{m}$ típicos para las fibras monomodo de tipo escalón operando a $1.55 \mu\text{m}$.

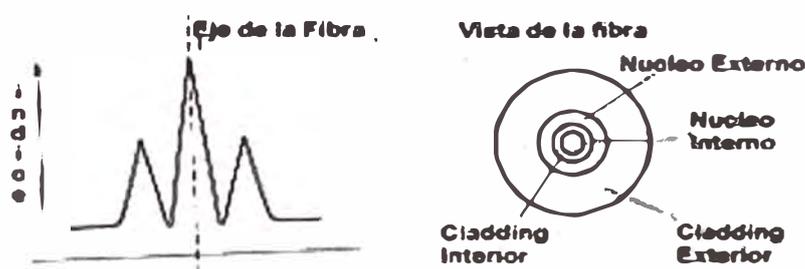


Figura 2.24 Perfil del Índice de una fibra de dispersión nula

Este diseño trabaja muy bien para los sistemas de transmisión de señales únicas. Sin embargo, si la fibra transmite múltiples longitudes de onda en la región de los $1.55 \mu\text{m}$,

las señales en las diferentes longitudes de onda pueden mezclarse unas a otras, generando ruido que degrada la performance de los sistemas.

b) La fibra de dispersión desplazada no nula NZ-DSF. (G.655)[⁶]

El diseño de una fibra de dispersión desplazada puede ser modificada para desplazar la dispersión cero a una longitud de onda mas allá del rango de operación de los amplificadores dopados con erbio, para evitar las mezclas de ondas que causan problema en los sistemas que usan multiplexación de longitudes de onda. Por ejemplo, un pequeño adelanto de la dispersión de guía de onda puede llevar la dispersión cero a una longitud de onda de 1.6 μm . A estas fibras se les denomina fibras de dispersión desplazada no nula ó casi cero porque el rango de dispersión bajo esta desplazado, pero la dispersión cero se encuentra en un punto fuera del rango usado para transmitir la señal.

La diferencia en el diseño es sutil, el perfil del índice de refracción se muestra en la figura 2.25 que es muy semejante al perfil de las fibras de dispersión cero, pero existe una diferencia marcada en la magnitud de los picos en la curva.

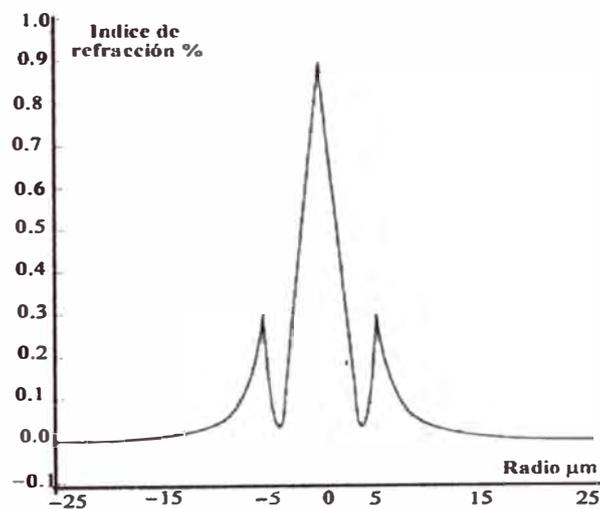


Figura 2.25 Perfil del índice de una fibra de dispersión casi nula

El cambio conjunto en la dispersión es mínimo, pero bastante significativo, la dispersión permanece relativamente baja en la ventana de los 1.55 μm , sin embargo la diferencia entre estos tipos de fibras de dispersión desplazada es sutil, pero puede afectar fuertemente la performance de los sistemas que usan multiplexación de división de ondas.

2.4 Descripción de propiedades de la fibra óptica

2.4.1 Atenuación de la fibra óptica

La figura 2.26 muestra el espectro de la curva de atenuación de una típica fibra óptica hecha de silicio. La curva tiene tres características principales. Una gran tendencia de atenuarse conforme se incrementa la longitud de onda (Dispersión Rayleigh), Atenuación en los picos de absorción asociados con el ión hidroxilo (OH^-) y una tendencia a incrementar la atenuación a las longitudes de onda por arriba de los $1.6 \mu\text{m}$, debidas a las pérdidas inducidas por la absorción del silicio.

Los primeros sistemas de transmisión usaron fibras multimodo, operadas en la primera ventana de longitud de onda cercana a las $0.85 \mu\text{m}$, y después usaron la segunda ventana cerca de $1.3 \mu\text{m}$. Las primeras fibra de modo simple operaron en la segunda ventana, donde la atenuación de la fibra es típicamente menor que 0.35 dB/Km . Hoy en día la región utilizada es la de $1.55 \mu\text{m}$ que es la de menos pérdida (típicamente pérdidas cercanas a las 0.20 dB/Km).

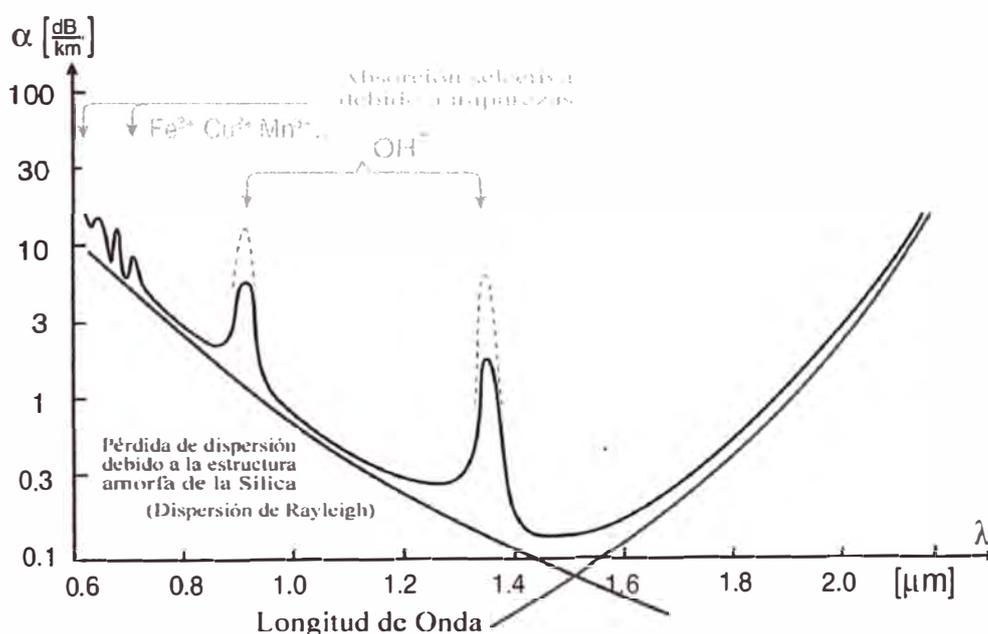


Figura 2.26 Atenuación en una fibra de Silicio

2.4.2 Dispersión

Cuando un pulso de luz está viajando a lo largo de una fibra, la señal no sólo se atenúa sino también se desvía o extiende en el tiempo. Esto es debido a la dispersión. Si se envían varios pulsos en una fibra a una velocidad alta, los pulsos se solaparán debido a la

dispersión: el receptor ya no puede distinguir donde empieza el pulso y donde el otro acaba. En las fibras monomodo de índice escalón, la característica limitante de dispersión se llama dispersión cromática. La dispersión cromática es dependiente del rango de longitudes de onda que son transmitidas por la fibra.

La dispersión cromática es la suma de dos tipos de dispersión: la dispersión material y dispersión de guía de onda. La dispersión material es dependiente de las diferentes índices de refracción dentro de la fibra, mientras la dispersión de la longitud de onda es dependiente en la cantidad de luz distribuida entre el centro de la fibra y el cladding. La dispersión material depende de la composición intrínseca de la fibra óptica y no puede manipularse, por lo que la dispersión de guía de onda es el parámetro importante en fibras en el diseño de las fibras con diferentes características dispersivas. Afortunadamente, la dispersión puede ser positiva o negativa porque mide los cambios en el índice refractivo con longitud de onda. Por lo que, la dispersión del material y la de guía de onda pueden ser de signos opuestos, lo que permite a los fabricantes de fibra diseñar fibras con dispersión mínima en una longitud de onda particular en la que opera

Otro tipo de Dispersión es del modo de Polarización PMD: la polarización es la propiedad de la luz relacionada con la dirección de sus vibraciones, el viaje de la luz en una fibra típica vibra en dos modos de polarización perpendiculares. El modo en el eje X es arbitrariamente etiquetado con un modo lento, mientras que en el eje Y es etiquetado en el modo rápido. La diferencia en los tiempos de arribo en los modos de dispersión por polarización (PMD), es típicamente medida en picosegundos. Sino es controlado, la PMD puede producir errores tasa de errores excesivos en la transmisión de los sistemas digitales y pueden distorsionar las señales

Ambos tipos de dispersión serán estudiados con mayor detalle en los siguientes capítulos

2.4.3 Efectos no lineales en la fibra óptica

Conforme la potencia óptica dentro de la fibra óptica es pequeña, la Fibra puede ser tratada como un medio lineal, la pérdida y el índice de refracción de la fibra son independientes de la potencia de la señal. Sin embargo, cuando el nivel de potencia sea lo suficientemente

fuerte en el sistema, tendremos que preocuparnos del impacto de los efectos no lineales, con lo dicho, tanto las pérdidas como el índice dependen de la potencia óptica en la fibra.

Para incrementar los márgenes del sistema se requieren mayores potencias ópticas de transmisión o pérdidas mínimas en la fibra. Sin embargo, todos los intentos realizados para utilizar las capacidades de las fibras ópticas se encontrarán limitados por las interacciones no lineales que se producen entre las portadoras ópticas que transportan la información y el medio de transmisión. Estas no linealidades de la fibra producen interferencia, distorsión y atenuación adicional sobre las señales que se propagan, conduciendo finalmente a degradaciones en el sistema.

Básicamente, los procesos no lineales que ocurren en los dispositivos fotónicos se clasifican atendiendo a su naturaleza y características. Las que se producen debido a la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo aplicado, que a su vez es proporcional al cuadrado de la amplitud:

- Automodulación de fase (self-phase modulation, SPM),
- Modulación de fase cruzada (cross-phase modulation, XPM),
- Mezclado de cuatro ondas (four-wave mixing, FWM),

Las que se producen por efectos de la dispersión en la fibra, debido a la interacción de las ondas de luz con los fonones (vibraciones moleculares) en el silicio:

- Dispersión estimulada de Raman (stimulated Raman scattering, SRS),
- Dispersión estimulada de Brillouin (stimulated Brillouin scattering, SBS),

Dispersión estimulada de Raman

Si dos o más señales de diferentes longitudes de ondas son inyectadas en la fibra, el SRS causa que la potencia se transfiera desde los canales bajos a los canales de longitudes de onda mayores. SRS no es un problema significativo en los sistemas con un número pequeño de canales, será un problema en sistemas con un gran número de longitudes de onda.

En los canales WDM, se manifiesta como que los canales con longitudes de onda menores pierden potencia óptica, la misma que es transferida hacia la zona del espectro donde se encuentran las señales que tienen longitudes de onda mas largas, la potencia óptica transferida se percibe como un ruido de diafonía.

Esta anomalía se debe a que la potencia óptica total de las señales que se están viajando por el núcleo de la fibra, interacciona con la estructura molecular de la fibra. Este impone un límite: A mayor cantidad de canales, utilizar menor potencia de transmisión (en los enlaces metropolitanos se pueden utilizar hasta 128 canales); Para enlaces de larga distancia, donde se requiere el empleo de mayor nivel de potencia, se utilizará un menor número de canales (hasta 80 canales).

Dispersión estimulada de Brillouin SBS

SBS produce una ganancia en la dirección opuesta a la dirección de propagación de la señal, y ocurre sobre anchos espectrales menores a 20 MHz.

Este proceso no lineal es similar al SRS, salvo que el SBS depende de ondas sonoras en lugar de vibraciones moleculares.

Four Wave Mixing (Mezcla de cuatro ondas)

Es la generación de producto de intermodulación entre las portadoras de una multiplexación. En una fibra que porte dos o tres canales de WDM, la FWM puede crear frecuencias adicionales (conocidas como producto de intermodulación). Si los canales de WDM están igualmente separados, las longitudes de ondas de los productos de intermodulación coinciden con las longitudes de onda de otros canales, creando así una indeseable diafonía dentro de la banda.

Se origina por el comportamiento no lineal del coeficiente de refracción de la fibra óptica cuando la potencia óptica total es elevada. La fibra monomodo convencional ofrece el medio de transporte con menor efecto de Mezcla de portadoras.

En los enlaces de WDM, para asegurar una buena calidad, la relación de señal a ruido debe ser mayor o igual que 20 dB, medidos en un ancho de banda de 0.1 nm, lo cual asegura una tasa de error de 10^{-15} .

La automodulación de fase (SPM)

La fase óptica de un canal se modula proporcionalmente a su propia potencia instantánea. La SPM aparece como un ensanche del espectro del canal, ya que se genera nuevas frecuencias ópticas.

Afecta individualmente a cada canal del WDM, la señal óptica se modula con el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, lo cual genera una modulación parásita de fase de la señal original y origina la aparición de señales ópticas como si fueran las “bandas laterales” de la señal original, que aumentan el efecto de dispersión de la fibra en ese canal, incrementando la interferencia entre símbolos en el receptor y por consiguiente degradando la calidad del enlace.

La modulación de fase cruzada (XPM)

Al igual que el anterior es una alteración de la fase óptica de un canal, la cual se traduce en distorsión de la intensidad, en contraste con la SPM, es un efecto multicanal, por el cual la modulación de fase de un canal se induce mediante la intensidad de la señal en el canal o canales vecinos.

Afecta individualmente a cada canal del WDM, la señal óptica se modula con el índice de refracción del núcleo de la fibra a causa de las fluctuaciones de la potencia óptica total dentro de la fibra, depende de la potencia de los otros canales y varía al ritmo binario de los otros canales. La modulación cruzada origina la aparición de “bandas laterales” en la portadora óptica de cada canal, aumentando el ancho de banda de cada canal, por lo que incrementa la dispersión y la interferencia entre símbolos.

2.5 Concepto de ruido y señal a ruido óptico(OSNR)

EL OSNR (dB) de un canal se define como el ratio absoluto de la potencia de una señal óptica sin ruido S a la potencia de ruido N. La unidad de medición es el dB.

$$OSNR = 10dB \cdot \text{Log}_{10}\left(\frac{S}{N}\right)$$

El OSNR es generalmente es medido con un OSA (Optical Spectrum Analyzer).

El OSNR es importante porque nos da el grado de degradación de una señal cuando es transmitido por un sistema óptico que incluye amplificadores ópticos. La señal es típicamente afectada por la dispersión y la atenuación. Con el amplificador hay una degradación adicional debido a la presencia de la emisión espontánea estimulada (ASE - Amplified Spontaneous Emission).

CAPITULO III

PRUEBAS EN REDES DE LARGA DISTANCIA

3.1 Las redes ópticas de Larga Distancia o Long Haul

Las redes de larga distancia (Long Haul en Inglés) conectan las redes de área Metropolitana u otra red Long Haul a una conexión global entre dominios regionales.

Las redes de larga distancia son útiles para la transmisión masiva de información en las redes terrestres, los sistemas de larga distancia típicamente van desde 300 a 2500 kilómetros y se encargan de unir ciudades. Además estas redes hoy están migrando hacia velocidades de 10 Gbps y basado en la multiplexación densa de longitud de onda (DWDM) instalando sistemas que poseen 32 canales o más. Estas distancias y velocidad de bits requieren que la fibra óptica controle tanto la gran cantidad de dispersión que se acumula y las penalidades de las no linealidades que pueden limitar su performance. Además, la fibra óptica debe ayudar a los portadores en los costos, permitiendo disminuir la necesidad de amplificadores y asimismo permitir soportar los futuros sistemas, incluida la migración a los 40 Gbps, basado en sistemas de alta eficiencia espectral.

En el Perú, Telefónica tiene una red de Larga distancia Terrestre de 3,400 Kms de cable que recorre toda la costa Peruana y une las tres fronteras principales del País, por el Norte con Ecuador, por el sur con Chile y por el Este con Bolivia.

Esta red soporta todo el tráfico de voz y datos de todas las ciudades del país y actualmente sirve de transporte de sistemas DWDM con velocidades de 2.5 Gbps por canal (1 STM16). En la figura 3.1 mostramos gráficamente el esquemático de esta red.

3.1.1 Alcance de las redes de larga distancia.

Con la tecnología convencional actual las redes de largo alcance (basados en el uso de los EDFAs), puede alcanzar hasta 500 Km. sin necesidad de regenerar la señal y superar la distorsión de la señal causada por la dispersión y los efectos no lineales así como los ruidos



Figura 3.1: Esquemático de red de larga distancia Óptica Terrestre – Telefónica del Perú

generados dentro de los EDFA's. Esta regeneración esta acompañada de una conversión Óptica-Eléctrica-Óptica (O-E-O), la señal es regenerada durante la fase eléctrica. El equipo de regeneración es requerido por cada canal básico, lo que lo hace costoso. Sin embargo, usando una combinación de amplificadores híbridos Raman y EDFA permiten la regeneración, permitiendo extender los espacios entre 500 a 2000 kilómetros. Esta aplicación de ultra larga distancia, introduce ahorros de costos significativos, reduce el costo por kilómetro de la capacidad de transmisión. Los cables submarinos pueden transportar algunos Tbps sobre más de 6000 Km.

Las redes de largo alcance o larga distancia transportan mucho mas data que cualquier tipo de red. Desde el punto de vista óptico, estas redes requieren de un mayor número de pruebas en el proceso de instalación y el mantenimiento, se tiene que tomar en cuenta la acumulación de problemas de transmisión, resultantes de la Dispersión Cromática (CD) y la Dispersión en el modo de polarización (PMD), así como los efectos no lineales (NLE), las pérdidas dependientes de la Polarización (PDL), así como las características de los amplificadores y filtros que conforman la red.

3.1.2 Velocidades típicas en redes Long Haul

La mayoría de operadores de redes de larga distancia operan ya sea a 2.5 Gbps ó 10 Gbps, algunas operadoras ya se encuentran implementando los 40 Gbps, para poder soportar la necesidad de ancho de banda extra que se requiere para el despliegue de las FTTx.

3.2 La tecnología Giga-Ethernet y las redes Core

A pesar que el presente estudio no tiene intenciones de abundar sobre esta tecnología es importante mencionarlo teniendo en cuenta que sobre todo el Giga-Ethernet es una aplicación que actualmente se encuentra en claro desarrollo

La red Core o núcleo y en otros casos la red backbone se refieren típicamente a las instalaciones de comunicación de alta capacidad que conectan nodos primarios. La red de Core/backbone proporciona la ruta para el intercambio de información entre varias sub-redes. Para el mundo empresarial, el backbone es el término es utilizado, mientras que para los proveedores de servicios, la red Core es el término utilizado.

En algunos países como Estados Unidos las redes Core unen varias redes de empresas competidoras; Hoy en día la red Core se extiende hasta los límites nacionales.

La red de Core/backbone tiene generalmente una topología del tipo Malla que proporciona conexiones entre todos los puntos y dispositivos de la red. Muchos de los principales proveedores de servicio en el mundo tienen sus propias redes del tipo core/backbone, que se interconectan. Algunas empresas grandes tienen su propia red de core/backbone, que están conectadas típicamente con las redes públicas.

Las redes Ethernet han seguido un camino totalmente opuesto al de las redes ATM. Ethernet nació para el acceso y actualmente se está haciendo un hueco importante en las redes Core debido a que su implantación suele ser sencilla y con un precio bajo. Muchos de los Core de Internet están compuestos por enlaces Giga-Ethernet e incluso por grupos de estos enlaces.

Curiosamente hubo un momento en el que se intentó usar ATM para tecnologías LAN, pero finalmente Ethernet ganó esa batalla y otras muchas, ya que también se está introduciendo en la Core.

Los dispositivos y facilidades de las redes Core/Backbone son los Swicht y routers. La tendencia es empujar la inteligencia y la toma de decisión a los dispositivos de acceso y al edge y reservar a los dispositivos Core para la descarga y reenvío rápido. Consecuentemente, los swicht se utilizan más a menudo en las instalaciones de red Core/Backbone. Las tecnologías usadas en el Core y las instalaciones backbone son tecnologías de la capa de transmisión de datos y de la capa de red tales como SONET/SDH, DWDM, ATM, IP, etc. Para la red backbone de la empresa, las tecnologías Giga-Ethernet ó 10 Giga-Ethernet también es utilizado a menudo.

3.3 Requerimiento de pruebas en las redes Long Haul

3.3.1 Las pruebas en las redes Long Haul

Las herramientas convencionales para realizar las pruebas de perfomance de las redes son el OTDR y el medidor de potencia. Pero la complejidad actual de las redes hace que se requieran de otras pruebas. Todos los administradores de la red deberían poseer los equipos de pruebas necesarios para medir las pérdidas de inserción (IL) para 1310 y 1550 nm., pruebas de OTDR, y pruebas ópticas de retorno (ORL). Estos equipos son usados

generalmente en sistemas convencionales de una sola longitud de onda, y velocidades de transmisión menores a OC-48

Los métodos para caracterizar completamente la fibra cambian pero se tiene un grupo de pruebas convencionales que se requieren realizar obligatoriamente y las enumeramos en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Pruebas requeridas en los cables de fibra óptica

Todos los enlaces (pruebas convencionales)	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de Inserción (IL) • Pérdida de retorno óptico (ORL) • OTDR
Enlaces Long Haul >565 Mbps	<ul style="list-style-type: none"> • Dispersión Cromática (CD) • Dispersión por el modo de Polarización (PMD) • Atenuación Espectral

En este capítulo analizaremos las pruebas especiales que se recomiendan para los enlaces Long Haul. Debe quedar entendido que las pruebas convencionales necesariamente se realizan en todos los cables de fibra óptica de todo tipos de redes y las mismas serán explicadas en detalle en los siguientes capítulos, ya que aquí nos dedicaremos a explicar en detalle las pruebas especiales indicadas para las redes Long Haul.

3.4 La dispersión cromática

El término Dispersión Cromática se refiere al retardo (deformación) espectral de un pulso óptico conforme se propaga por la fibra. La fibra óptica convencional tiene un coeficiente de dispersión positivo; Esto quiere decir que a longitudes de ondas mayores Se tiene un mayor tiempo de tránsito a través de la fibra comparado con las longitudes de ondas cortas. Este diferencial de retardo hace que el pulso se deforme.

La fuente láser que produce el pulso óptico, emite un rango de frecuencia. Por ejemplo la salida de un láser de realimentación distribuida puede tener un ancho espectral de 40 a 50 Megahertz, mientras que el ancho de un Fabry-Perot puede tener varios nanómetros de ancho. A un mayor ancho espectral la deformación del pulso transmitido será mayor. Esta

deformación es continua a lo largo de todo el enlace de fibra, por lo cual a una mayor longitud se presentará una deformación mayor.

En la transmisión digital, un pulso está formado de una serie de longitudes de ondas, cada uno de ellas viajando a diferentes velocidades dependiendo de las propiedades del vidrio. En tramos largos de fibra la dispersión cromática puede dar por resultado pulsos que se deforman de tal manera que se superponen, causando interferencia intersimbólica, y en el receptor se verá incrementado la tasa de error.

La sensibilidad a la dispersión se incrementa linealmente con la distancia y hace que se incremente de manera cuadrática con la velocidad, eso quiere decir que cuando incrementemos la velocidad de bits desde 2.5 Gbps a 10 Gbps, la dispersión cromática se incrementa en un factor de 16, nuestras fibras estándar están optimizadas para poder transmitir a 1310 nm donde la dispersión es mínima; pero transmitimos a 1550 nm, donde la atenuación es mínima, en este punto se genera una dispersión que va desde los 16-20 ps/nm-km.

La respuesta inicial de la industria a este problema de la dispersión cromática fue el desarrollo de la Fibra de dispersión desplazada que reduce la dispersión en la región de los 1550nm.

La dispersión cromática no era un problema en los primeros sistemas de transmisión por una variedad de razones:

- Las velocidades de transmisión no eran lo suficiente rápida como para que los pulsos puedan extenderse lo suficiente para que interfieran con pulsos adyacentes.
- La única longitud de onda de transmisión se localizó cerca de la longitud de onda de dispersión mínima que significativamente disminuyó la distorsión del pulso en una distancia dada.
- Antes que la potencia de la señal óptica llegue por debajo de un nivel crítico, la señal atraviesa un regenerador. Aunque la función primaria del regenerador es de aumentar la potencia de la señal, también sincroniza y reformaba la señal original y elimina los efectos de dispersión cromática cada 60 o 70 km.

La dispersión cromática es el resultado combinado de dos efectos diferentes: la dispersión del material y la dispersión de guía de onda.

- En el vidrio de sílice, la velocidad de la luz (ó el índice refractivo) es dependiente de la longitud de onda de la señal. La dispersión del material explica el ensanchamiento de un pulso óptico debido a las velocidades diferentes de las frecuencias ópticas que constituyen un pulso.
- La dispersión de guía de onda se refiere a las diferencias en la velocidad de la señal que dependen de la distribución de la potencia óptica sobre el núcleo y el cladding de la fibra óptica. Conforme la frecuencia de la señal óptica disminuye, la mayoría de la señal óptica es transportada en el cladding que tiene un índice refractivo diferente que el núcleo de la fibra.

La dispersión material y dispersión de guía de onda tienden efectos opuestos (ver figura 3.2). Los fabricantes de fibra pueden manipular estos efectos para cambiar la situación y obtener curvas suaves de dispersión cromática.

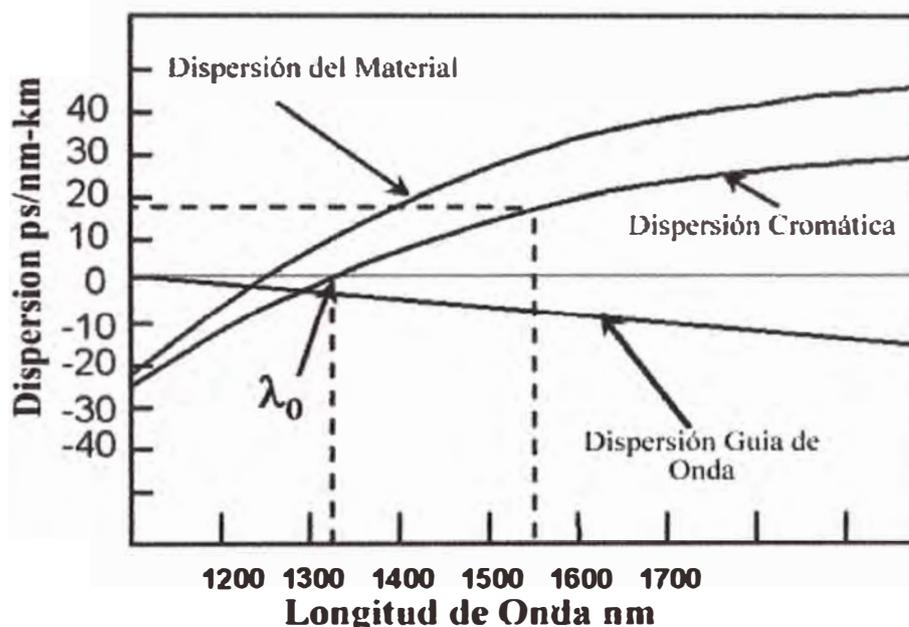


Figura 3.2 La dispersión cromática es el resultado combinado de la dispersión del material y la dispersión de la guía de onda que tienden a tener efectos opuestos.

La unidad de medida para la dispersión cromática es del ps/(nm-km) que indica que un pulso con una anchura espectral de un nanómetro se ensanchara por un picosegundo por cada kilómetro que viaja. Por ejemplo^[7], para calcular la dispersión de un pulso de 1550 nm con 20-pm (0.02 nm) de anchura espectral (FWHM) cuando viaja hasta 10 km longitud en una fibra que tiene una dispersión de 17 ps/nm-km a 1550nm, se calculara un retardo de:

$$(17 \text{ ps/nm-km}) \times (0.02 \text{ nm}) \times (10 \text{ km}) = 3.4 \text{ ps}$$

Si se conoce la longitud de onda de dispersión cero, λ_0 , y la pendiente de la dispersión cromática a esa longitud de onda, S_0 , se puede aproximar la dispersión cromática como una función de la longitud de onda $D(\lambda)$, usando la formula:

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right)$$

Esta formula da la dispersión cromática sobre un rango de operación de una fibra normal, típicamente entre 1.2 a 1.6 μm para μm fibra estándar, 1.5 a 1.6 μm para una fibra de dispersión desplazada, y 0.75 a 1.45 μm para la fibra multimodo de índice gradual.

El ensanchamiento total del pulso a causa de la dispersión cromática en un sistema de comunicaciones depende del rango de la variación de la longitud de onda $\Delta\lambda$, así como de la cantidad de dispersión.

$$\Delta t_{\text{ensanchamiento}} = \Delta\lambda \times \Delta t_{\text{cromática}} \times \text{dispersión}$$

Este resultado significa que los efectos de la dispersión cromática dependen no solamente de la fibra, sino también del rango de la longitud de onda de la fuente.

Dispersión cromática en fibras monomodo estándar

Inicialmente en las fibras monomodo se uso una señal de 1310 nm, para estas fibras se tenía la longitud de onda de dispersión cero (λ_0) a 1310 nm. A esta longitud de onda la dispersión cromática se minimizaba.

En estas fibras, conocidas como fibras estándar, la dispersión cromática aumenta gradualmente arriba de los 1310 hasta que alcance aproximadamente 17 ps/(nm-km) a los 1550 nm.

Dispersión cromática en fibras de dispersión desplazada

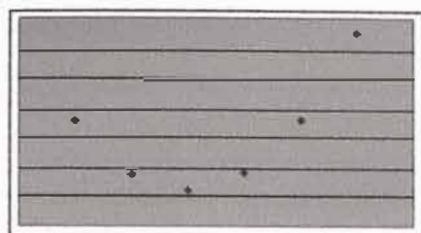
El aumento en la dispersión era un problema para los proveedores de red de fibra que quisieron usar la atenuación baja de la ventana de los 1550 nm para la transmisión de gran velocidad en los tramos largos. La Fibra de dispersión desplazada (DSF) es un esfuerzo por perfeccionar esa longitud de onda para la transmisión de gran velocidad desplazando λ_0 a

los 1550 nm. DSF trabaja bien, con tal, que sólo una longitud de onda se transmita en la fibra. Sin embargo, cuando se intento usar en DSF la DWDM, los problemas se elevaron porque el índice refractivo es parcialmente dependiente de la intensidad de la señal, las longitudes de onda adyacentes con la misma fase pueden interactuar recíprocamente para producir señales espurias que disminuyen las potencias de las señales y producen ruido. Este fenómeno es conocido como la mezcla de cuatro ondas. En la ausencia de dispersión cromática, los canales ópticos con fases estrechamente cercanas pueden interactuar recíprocamente sobre distancias largas dentro de la fibra.

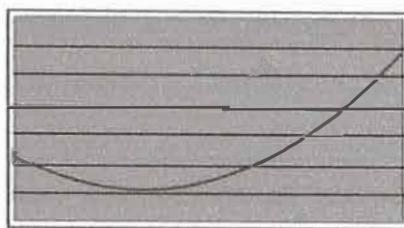
Para prevenir la mezcla de la cuarta onda, los fabricantes de fibra cambiaron λ_0 fuera del rango de DWDM. Este cambio fue hecho para proporcionar una cantidad mínima de dispersión cromática en el rango de DWDM y reducir la longitud sobre la cual las longitudes de onda puedan entrar en fase y minimizar la mezcla de la cuarta onda. Sin embargo, cuando el rango de DWDM se continúa extendiendo, el λ_0 que ha mantenido una dispersión cromática suficiente para los primeros sistemas de DWDM llega a ser un problema en los sistemas nuevos, motivo por el cual las DSF perdieron el interés que despertaron inicialmente

3.4.1 Prueba de la dispersión cromática

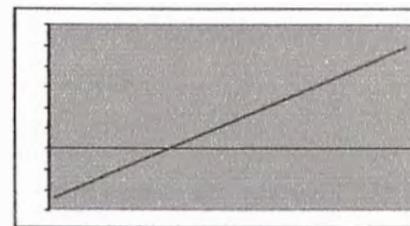
En la mayoría de métodos de medición de la dispersión cromática, el equipo se inicia midiendo el retardo de pulso (en Picosegundo), como una función de la longitud de onda. La dispersión cromática es actualmente el ratio de variación de este retardo De aquí, que para obtener el valor del CD, se debe de obtener el diferencial de la curva de retardo, Sin embargo, debido a que solamente se puede obtener una cantidad limitada de puntos, y ya que no se puede diferenciar una curva con unos cuantos puntos, se plotea una curva de aproximación a partir de los puntos obtenidos de la muestra, y sobre esta curva se realiza la diferenciación. Por supuesto a una mayor cantidad de puntos obtenidos en el proceso de adquisición mejor será la aproximación y se tendrá una mayor exactitud de lo resultados. En la figura 3.3 mostramos los pasos típicos para calcular la dispersión cromática



a.-Adquisición de puntos
(ps vs nm)



b. Se aproxima una curva
(ps vs nm)



c. Por diferenciación se
obtiene el valor de la
dispersión (en ps/nm vs
nm)

Figura 3.3 Pasos típicos para calcular la dispersión cromática

Hay tres métodos para determinar la dispersión cromática: por el método del pulso, por el método del OTDR y por el método de cambio de fase:

a) El método del pulso mide el diferencial de retraso entre los pulsos ópticos de varias longitudes de onda y usa un transmisor de múltiples longitudes de onda en un extremo de la fibra y un receptor al otro extremo.

Un modo simple de implementar este método es tener un banco de cuatro u ocho láser, que pueden ser activados desde un simple generador. La primera longitud de onda láser es tomado como referencia del retardo de tiempo. Los otros tiempos de transmisión son comparados con el tiempo de referencia. La adquisición de estos puntos de retardo son ploteados sobre un gráfico, y se realizan una curva de aproximación tomado como referencia los puntos hallados y se usa esta traza como la curva de dispersión cromática

b) El método del OTDR, ha sido desarrollado inicialmente por Anritsu. Necesita acceder sólo a un extremo de la fibra para realizar la medición, el método de OTDR usa cuatro láseres de diferentes longitudes de onda. El software simula el tiempo de viaje de cada uno de las cuatro longitudes de onda en una localización designada en el enlace de fibra para calcular el retraso de grupo.

Una de las principales desventajas de usar el método del OTDR para este tipo de pruebas es que se introducen errores cuando se obtienen los tiempos de arribo de los pulsos sobre la grafica, particularmente por el ensanchamiento de los pulsos debido a los efectos de la propia dispersión cromática. Además los OTDR no muestran una alta precisión de longitud de onda (típicamente +/- 3 nm). Por lo tanto se ven afectados el retardo y la precisión de la

longitud de onda. Además generalmente los OTDR dan un máximo de 4 puntos gráficos de retardo, esto limita el número de puntos y también limita la precisión

c) **El método de cambio de fase** proporciona un método muy exacto de medida de dispersión cromática. La idea principal de este método es medir los cambios de fase relativos (relativo a una referencia fija) en la señal detectada así como la alteración de la longitud de onda. Esto puede realizarse ya sea usando una referencia de fase local eléctrica, que requiere comunicación entre la fuente y el receptor; o usando una de las longitudes de onda de transmisión como referencia, esto elimina la necesidad de comunicación, pero induce otras limitaciones.

Por variación de la longitud de onda, se reúne varias informaciones de fase y se comparan con la fase de referencia. Desde que todos los valores son comparados a una referencia fija, los datos obtenidos pueden ser mayores que cualquier otro método. Esto es de importancia crítica, a más punto tenemos mayor precisión. En la figura 3.4 mostramos gráficamente el método de cambio de fase y en la figura 3.5 mostramos un analizador de CD de Campo

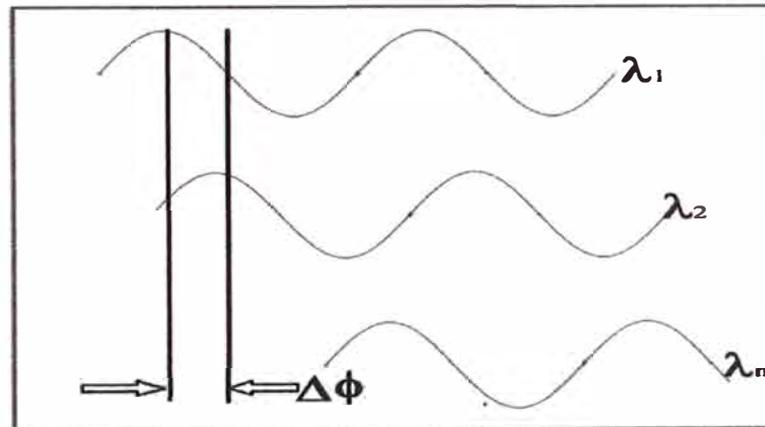
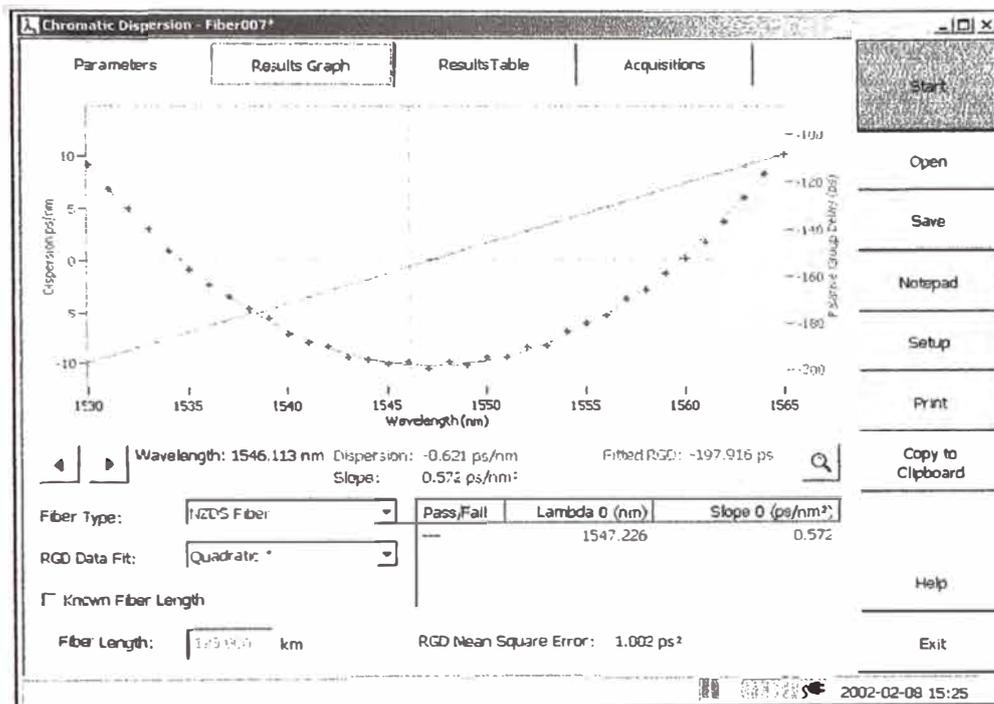


Figura 3.4 Las longitudes de onda distintas poseen cambios de fase distintos

Desde que la CD afecta la capacidad del ancho de banda de la fibra, hay un máximo nivel aceptable de CD sobre un enlace, y esto depende de la velocidad de transmisión

De manera práctica se deben de tomar los siguientes datos prácticos:

Velocidad (Gb/s)	Máximo CD (ps/nm)
2.5	18 817
10	1176
40	73.5



(a)



(b)

Figura 3.5 El analizador de Dispersión Cromática (EXFO-FTB-5800) usa el método de desplazamiento de fase (a) Pantalla con resultados (b) Equipo Modular

3.5 Dispersión de modo de polarización - PMD

Cuando se realizaron las primeras discusiones sobre la Dispersión de Modo de polarización en el año 1986^[8], solo unos cuantos investigadores consideraron que este efecto llegaría a formar parte de las restricciones del negocio de las comunicaciones por fibra óptica.

La PMD puede distorsionar la señal, hasta hacer inmanejables los bits, destruyendo la integridad de una red. El problema principal es que el núcleo de la fibra no es perfectamente redondo, lo que origina dispersión a un grado tal que puede dejar a la señal en un estado que difícilmente pueda ser leído

Cuando la luz viaja en una fibra monomodo hacia el receptor, tiene dos modos de polarización que viajan en dos ejes, y se mueven formando un ángulo recto uno del otro. En una fibra ideal las dos polarizaciones se propagarían a la misma velocidad de fase pero en realidad cualquier asimetría, curvatura o torsión hace que las dos polarizaciones se propaguen a diferente velocidad.

La causa de la PMD^[9] es una pequeña diferencia en el índice de refracción en una pareja particular de estados de polarización ortogonal, a esta propiedad se denomina birrefringencia⁴. Esto quiere decir que la velocidad de la luz depende de la ruta que toma a lo largo de la fibra. La figura 3.6 muestra las causas de la birrefringencia.

⁴ Birrefringencia: La 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.

La birrefringencia está cuantificada por la relación:

$$\Delta n = n_e - n_o$$

donde n_o es el índice de refracción del rayo ordinario y n_e es el índice de refracción del rayo extraordinario. (Obtenido de "<http://es.wikipedia.org/wiki/Birrefringencia>")

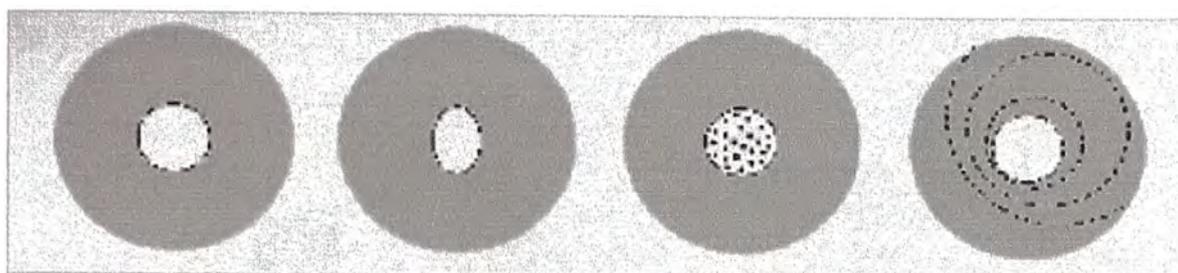


Figura 3.6 Sección transversal de fibra ópticas ilustrando las causas de birrefringencia

En contraste a la fibra ideal, mostrado en lado izquierdo de la figura 3.1, una fibra real exhibe diferentes tipos de imperfecciones; de derecha a izquierda: torsión o curvatura, impurezas en la fibra, y asimetría de la fibra.

Las imperfecciones son parte inherente del proceso de fabricación de la fibra y son en parte causado por las condiciones ambientales y la calidad del despliegue ó instalación de la fibra. La curvatura y tensión de la fibra puede variar en el tiempo debido a los cambios de la temperatura y aún mostrar fluctuaciones diurnas y nocturnas de la torsión y causar variaciones de la PMD. Las vibraciones pueden causar cambios dinámicos en la curvatura, y como resultado variar la PMD en fibras que se instalan cerca de líneas de un tren y asimismo las fibras aéreas pueden mostrar un cambio en la tensión y curvatura debido al movimiento causado por el viento. Todos estos efectos contribuyen a que la PMD no sea constante, por lo que el máximo PMD que puede ocurrir solamente puede ser aproximado.

Con respecto a la Dispersión del Modo de Polarización es importante entender que la causa real de la degradación de la señal es el retardo diferencial de grupo (también denominado la PMD instantánea) y que el termino PMD es realmente la media del valor de la DGD (Differential group delay) a una longitud de onda y en un tiempo determinado.

Cuando la luz es acoplada en una fibra, toma diferentes rutas conforme viaja a través de ella, la figura 3.7 muestra como el retardo diferencial de grupo es la diferencia en el tiempo de los componentes del pulso de luz que viaja a través de la fibra dependiendo de las rutas que tomen.

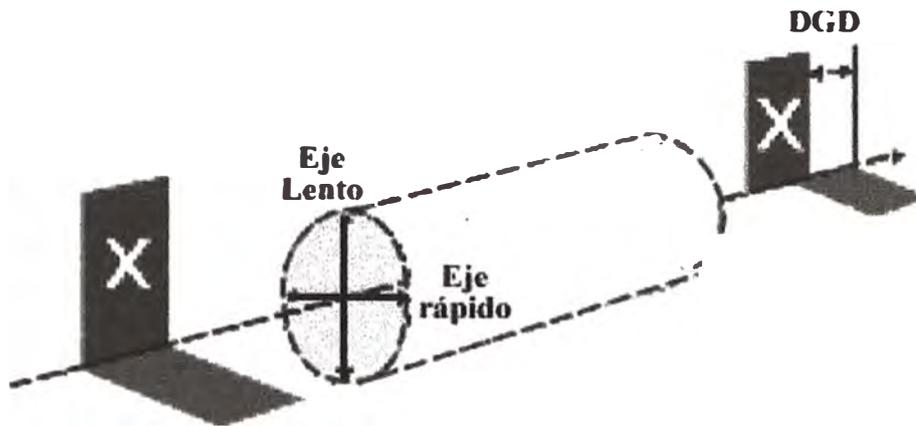


Figura .3.7 Elementos de la fibra con eje rápido y lento y DGD de pulsos de luz rápidos y lentos

La parte del pulso de luz marcado con una X viaja en el eje lento y la otra parte del pulso viaja en el eje rápido de la fibra. En el punto final de la fibra se presentará una diferencia de tiempo de las dos partes del pulso de luz, a esto se denomina el retraso diferencial de grupo (DGD). En un tipo especial de fibra denominado fibra mantenedora de polarización (PMF polarization maintainig fiber), las diferentes partes de los pulsos de luz viajan por diferentes rutas, pero no cambian esta ruta durante todo su recorrido por la fibra. Este tipo de fibra puede ser fácilmente compensada en su DGD (PMD) mediante el uso de un polarizador para filtrar una parte del pulso de luz, ya sea la parte marcada con X o la otra parte representada en la figura 3.7 (La figura 3.7 representa un tramo de fibra siempre y cuando la fibra fuera PMF). Una fibra de telecomunicaciones real puede representarse como una serie de elementos de fibras birrefringentes del tipo ilustrado en la figura 3.7, concatenados con una orientación aleatoria de sus ejes, tal como se muestra en la figura 3.8



Figura 3.8. Concatenación aleatoria de elementos birrefringentes como representación de una fibra real.

Cada sección de la fibra exhibe un eje rápido y otro lento que son rotados aleatoriamente en relación uno del otro. Entre secciones, la luz es acoplada desde una pareja de ejes rápido y lento a otra pareja de ejes, a través de un proceso denominado modo de acoplamiento. Debido al modo aleatorio de la orientación de los ejes rápidos y lentos y del modo de acoplamiento para los diferentes elementos de la fibra, la PMD es de naturaleza estadística, y no es posible tener un modo simple de compensación, La PMD y el DGD se miden en picosegundos, Debido a la naturaleza estadística de la PMD, la PMD no es linealmente proporcional a la longitud de la fibra pero si lo es a su raíz cuadrada. El coeficiente de la PMD está dado en $\text{ps/km}^{1/2}$,

Para ilustrar el comportamiento temporal de la PMD y DGD, la figura 3.9 muestra las mediciones durante un periodo largo de la DGD/PMD en una fibra de dispersión desplazada en un periodo de 36 días. En la figura 3.9, el retardo diferencial de grupo se le da un código de colores. El color azul oscuro corresponde a DGD bajos < 0.5 ps, y el rojo oscuro corresponde a DGD elevados > 5.5 ps. La PMD puede ser obtenida tomando el promedio de la DGD en un punto particular de longitud de onda en un periodo de tiempo. Sin embargo, las mediciones tienen que ser tomadas sobre un periodo lo suficientemente largo para obtener resultados precisos de los promedios. Los cambios de la PMD en el tiempo (promediada en una longitud de onda o promedio de DGD) es solamente cercano al $\pm 10\%$, además los cambios de la DGD en el tiempo a una longitud de onda particular es mucho mayor. Esto muestra que para cualquier punto dado en el tiempo un sistema de transmisión puede tener un alto retardo causado por un alta tasa de error de bits a una longitud de onda mientras muestra una baja tasa de errores de bits en otras longitudes de onda.

Debido a que los cambios de la DGD con las longitudes de onda y el tiempo, se tiene que tomar en cuenta la estadística para describir el valor de la DGD y conocer la performance de un sistema. La probabilidad que la DGD de una sección de fibra tenga un cierto valor en un tiempo particular sigue una distribución de Maxwell .

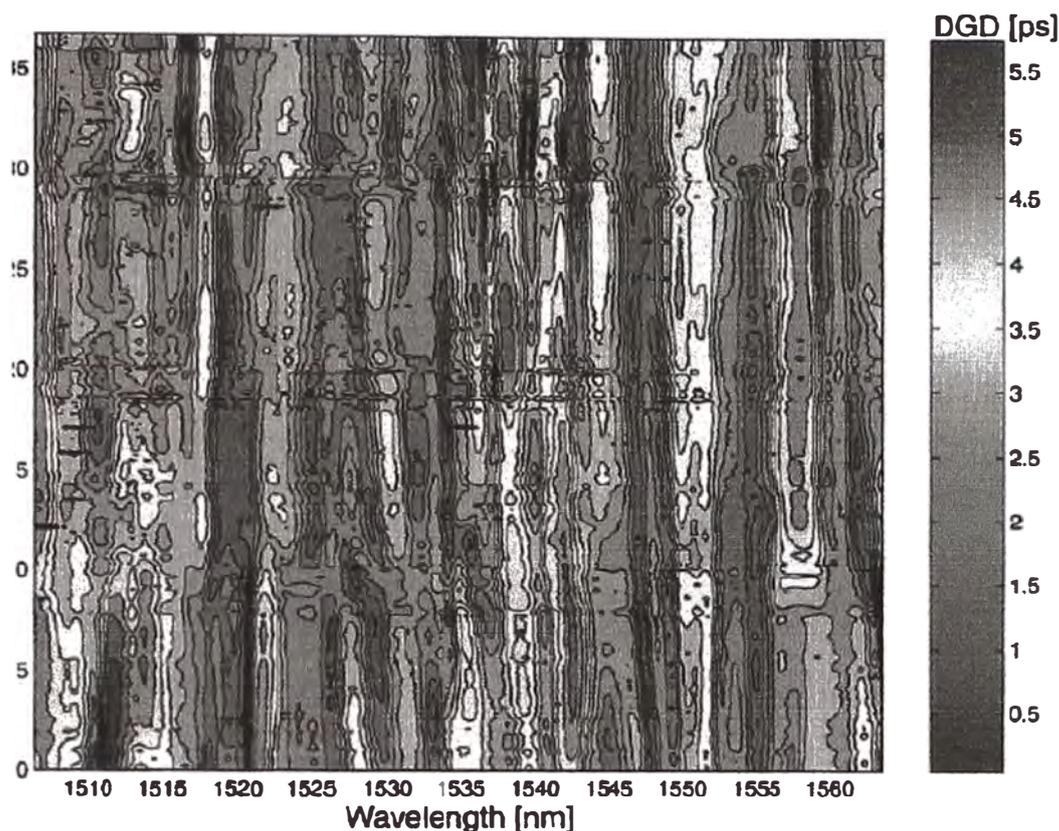


Figure 3.9 Medición de PMD en fibra durante un periodo largo de tiempo, sobre un tramo de 127 KM de fibra de dispersión desplazada: from *Karlsson¹⁰, JLT, 18, 7, 941 (2000)*

Degradación en el Sistema y límites de la PMD

La PMD causa serios disturbios a la capacidad de transmisión. En la Figura 3.10, se muestra el modelo de pulso en el tiempo y el diagrama del ojo para una señal sin retardo de diferencial de grupo (sin ningún PMD). El patrón de pulso tiene buena forma, y el diagrama de ojo está bien abierto, dando por resultado una baja " tasa de error de bits". La figura 3.11 muestra la señal bajo la influencia de 100 ps de DGD con una potencia distribuida uniformemente en los ejes rápido y lento.

De ambas figuras queda claro que la DGD, y la PMD, influye en el funcionamiento de sistema.

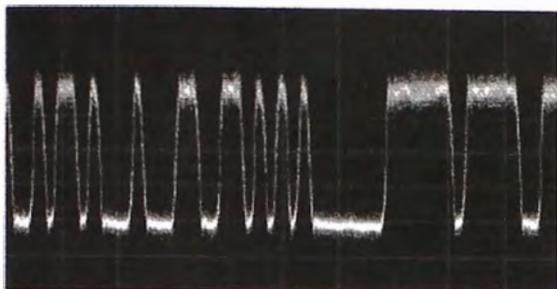


Figura 3.10 (a)

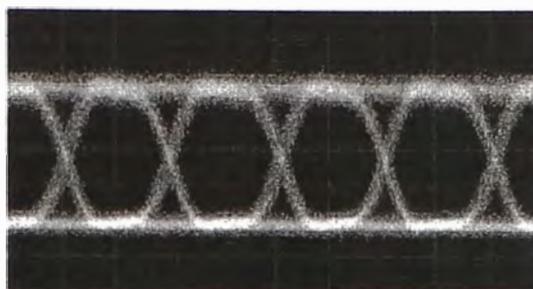


Figura 3.10 (b)

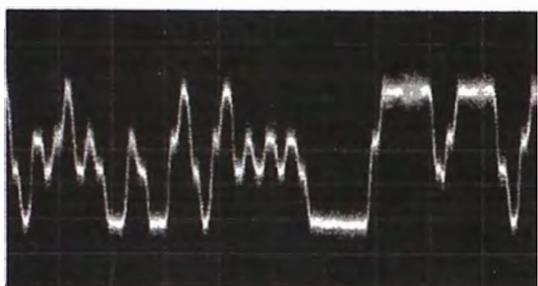
Figura 3.10 Señal sin retardo

Figura 3.11 (a)

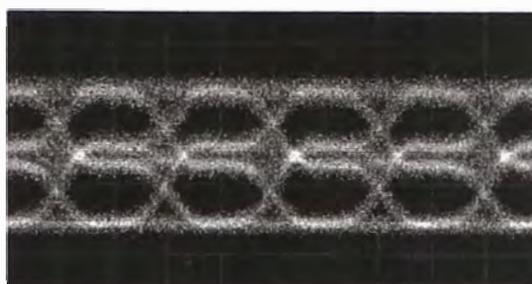


Figura 3.11 (b)

Figura 3.11 Señal con retardo

Las tolerancias de los sistemas a la PMD tiene que ver mucho con las diferentes velocidades de bits, un método intuitivo para limitar los efectos de la PMD se da en la tabla 3.2

Tabla 3.2 Límites de la PMD

SDH	Nivel Óptico	Velocidad Transmisión	Tiempo del Bit	Límite de la PMD*
	OC-1	51.48 Mb/s	19.29 ns	2 ns
STM-1	OC-3	155.52 Mb/s	6.43 ns	640 ps
STM-4	OC-12	622.08 Mb/s	1.61 ns	160 ps
	OC-24	1,244.16 Mb/s (1.2 Gbps)	803.76 ps	80 ps
STM-16	OC-48	2,488.32 Mb/s (2.5 Gbps)	401.88 ps	40 ps
STM-64	OC-192	9,953.28 Mb/s (10 Gbps)	100.47 ps	10 ps
STM-256	OC-768	39,318.12 Mb/s (40 Gbps)	25.12 ps	2.5 ps

* La dispersión es limitada al 10% del tiempo de duración de un bit

También es conveniente considerar la calidad de fibra que sido instalado. Las investigaciones sobre fibras instaladas muestran grandes diferencias de calidad entre las fibras que han sido instaladas antes y después de los primeros años de los 90's

En la referencia [11], el autor indica que solamente el 13% de las fibras que fueron instaladas después de 1994 tienen un coeficiente de PMD mayor a 0.2 ps/km. Para las fibras que han estado instaladas antes de 1994, el 30% tienen un coeficiente de PMD más grande que: 0.2 ps/km. La Tabla 3.3 resume algunas de las medidas obtenidas en diferentes plantas externas.

Para el caso de Perú y de acuerdo a las mediciones obtenidas en cables instalados en el año 1994 de manera directamente enterrado notamos que el coeficiente de PMD esta por encima de los 0.2 y debajo de 1 ps/km (Ver Tabla 3.4)

Tabla 3.3 Resumen de mediciones realizadas a cables Instalados en USA, Brasil y Alemania

Resumen de mediciones de PMD en cables			
Región	año Instalación	Porcentaje de fibras	Coefficiente PMD
US	pre-1991	31%	1 ps/km
US	pre-1994	30%	> 0,2 ps/km
US	pre-1997	20%	> 1 ps/km
US	post-1994	13%	> 0,2 ps/km
Brazil	1998 - 2002	11%	> 0,5 ps/km
Germany	pre-1991	<i>Media de todas lasfibras</i>	0,32 ps/km
Germany	1992 - 1998	<i>Media de todas lasfibras</i>	0,13 ps/km
Germany	post-1999	<i>Media de todas lasfibras</i>	0,05 ps/km

Tabla 3.4 Mediciones en cables instalados en el Perú en el año 1994

Mediciones PMD –Fibra Óptica Nacional desde Cañete a Chala			
Tramo	Longitud	Delay (ps)	Coefficiente PMD
Cañete-Chincha	57.2 Km	2.77	0.371
Chincha-Pisco	42.8 Km	5.11	0.78
Pisco-Ica	81.3 Km	4.43	0.491
Ica-Palpa	91.8 Km	7.23	0.753
Palpa-Nazca	51.7 Km	6.56	0.912
Nazca-Lomas	93.3 Km	3.17	0.328
Lomas-Chala	89.9 Km	4.44	0.467

Cada sistema de transmisión tiene tolerancia distinta con respecto al retardo diferencial de grupo. Para tener una idea del grado al cual las fibras de hoy pueden ver afectado su funcionamiento, los límites de PMD para diversas velocidades de bits se enumeran en la tabla 3.4, si se asume que en general el valor de PMD en picosegundos no debe exceder al 10% del periodo de bit (velocidad de bit referido a velocidades de un canal simple).

En la tabla 3.4, los coeficientes tolerables de PMD y los límites del PMD se traducen a longitudes de la fibra. Puede verse que para 2.5 Gbps de velocidad de transmisión, los tramos largos de fibras pueden utilizarse incluso con fibras tan pobres de 1 ps/km de PMD. Para sistemas de 10Gb/s, la PMD tiene que ser tomado más seriamente porque las fibras que excedan una PMD de 1 ps/km, tendrán una alta tasa de error causadas por la PMD.

Se debe de medir la PMD de la fibra cuando se instalen sistemas de 2.5 Gbps para asegurarse que las fibras pobres (de alto PMD) sean utilizadas para los sistemas de velocidad de transmisión bajos, y las fibras buenas (PMD bajo) se reserven para los sistemas de velocidad de transmisión elevados que se pudieran instalarse a futuro.

Tabla 3.5 Tolerancia de la PMD para diferentes Velocidades

Velocidad	SDH/ SONET	Máximo PMD	Máxima Longitud de enlace		
			0.05 ps/(km) ^{1/2}	0.2 ps/(km) ^{1/2}	1 ps/(km) ^{1/2}
2.5 Gbit/s	STM-16/OC-48	40 ps	250000 km	40000 km	1600 km
10 Gbit/s	STM-64/OC-192	10 ps	15000 km	2500 km	100 km
40 Gbit/s	STM-256/OC-768	2.5 ps	1000 km	160 km	6 km

3.5.1 Los métodos de medición de la PMD

La medición de la PMD en fibras instaladas tiene principalmente dos objetivos:

a) Certificación de la fibra

- Medir la planta de fibra sin equipos en la red (amplificadores ópticos, por ejemplo)
- Determinar el potencial de ancho de banda de las fibras.
- Diseño de la red (por ejemplo., obtener el espaciamiento entre regeneradores)

b) Verificación para el Upgrade/Diseño de la Red

- Medición de la planta de fibra con o sin el equipo de la red.
- Determinar el potencial de ancho de banda y la capacidad de upgrade del enlace.

- Verificar el diseño de enlaces (espaciamiento de regeneradores).

Para una medición precisa de la PMD se requiere contar con equipos especiales que se instalan en ambas terminaciones del enlace bajo prueba. Un Probador de PMD esta formado por un equipo emisor de luz y un receptor del PMD.

Estos equipos pueden medir la PMD y la DGD en campo utilizando alguno de los métodos estándar:

- El Método del Analizador Fijo ó Barrido de longitudes de Onda
- El Método Interferométrico
- El Método de la Matrices de Jones

En la tabla 3.6 mostramos un resumen de las ventajas y desventajas de los tres métodos:

Tabla 3.6 Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de Medición de la PMD

Métodos de Medición de la PMD			
	Interferométrico	Barrido de Longitud de Onda/Analizador fijo	Análisis de las Matrices de Jones
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • De poco costo • Cálculo directo de la PMD promedio • Es más rápido • Insensible a las variaciones en la fibra • No requiere comunicaciones extremo a extremo • Rango hasta 100 os. • Rango dinámico relativamente amplio 	<ul style="list-style-type: none"> • Rápido • Multi-instrumento 	<ul style="list-style-type: none"> • Medida directa • Una medida mas robusta • Detalla cada estado • Estadística detallada sobre la PMD • Menor retraso (0,03 ps)
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Resolución limitada por el ancho espectral de la fuente • Polarización fija • Un solo instrumento dedicado 	<ul style="list-style-type: none"> • Indirecto • Compromiso entre el rango dinámico (amplio rango espectral) y un valor elevado (estrecho rango espectral) • Sensible a las vibraciones de la fibra (laboratorio) • Un solo estado de polarización fijo • Comunicación extremo a extremo • Es costoso 	<ul style="list-style-type: none"> • Es lento • Sensible a las vibraciones en la fibra (laboratorio). • Comunicación extremo a extremo • Muy costoso

Los equipos comerciales de campo deben de ser insensible a las vibraciones, motivo por el cual los equipos comerciales de hoy usan el método interferométrico.

El método interferométrico.- En el dominio del tiempo este método usa el principio de interferometría de baja coherencia en la cual una fuente de luz de gran ancho banda no coherente (tal como un diodo LED) envía todas las longitudes de onda a la vez dentro de la fibra. Al otro lado, un interferómetro Michelson escanea el rayo transmitido y extrae su función de autocorrelación. El rayo es espliteado en dos rutas ópticas y un espejo móvil del interferómetro introduce una variable de retardo entre ellos; luego son recombinados y la intensidad resultante es medida. Un esquema típico del equipo usado se muestra en la figura 3.12

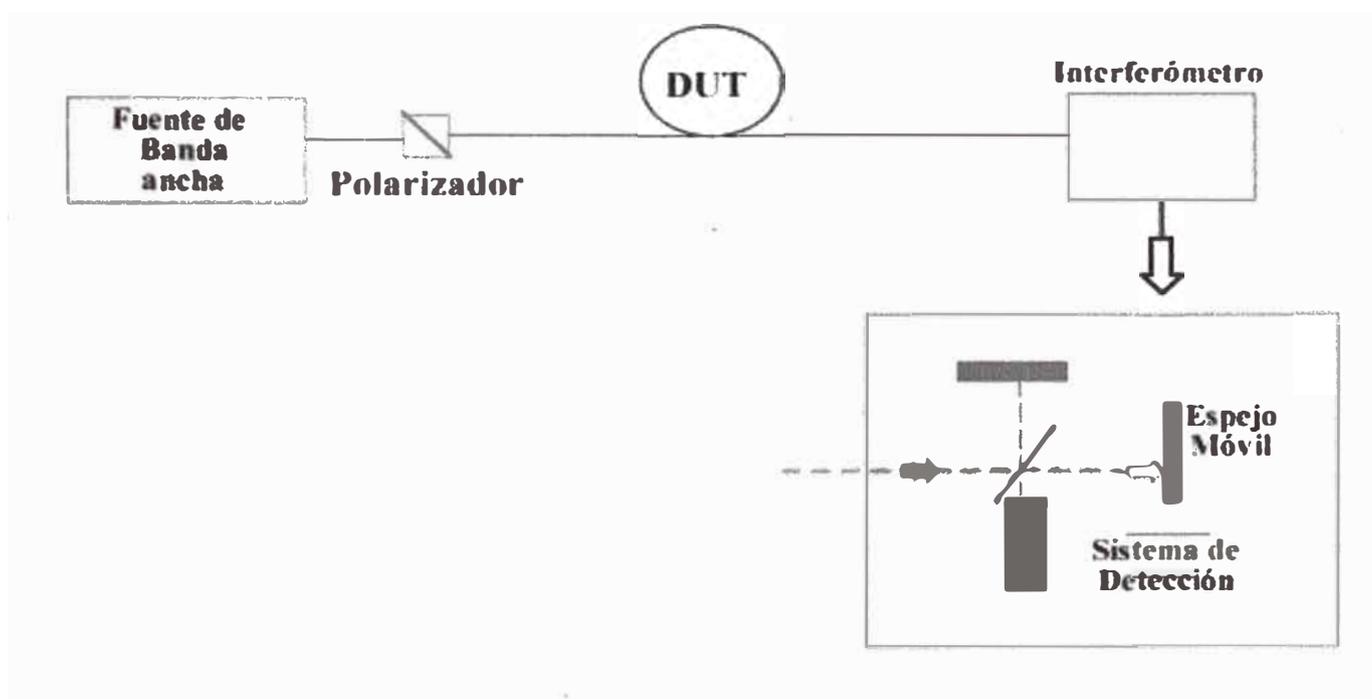


Figura 3.12 Esquemático de un interferómetro

La autocorrelación de la luz entrante al interferómetro puede ser calculada por el ploteo de Intensidad Versus el retardo introducido. En ausencia de la PMD, esta será la autocorrelación de la función de la fuente. La PMD causa un ensanchamiento, como resultado de la interferencia (o cross correlación) de los dos principales estados de polarización que pasan a través de la fibra bajo prueba, y el nivel de PMD puede ser calculado a partir de la magnitud de este ensanchamiento.

Algunas de las características de este método son:

- La medición de grandes PMD, requieren de manera proporcional de grandes desplazamiento de los espejos, Los PMD típicos tiene un retardo que va desde los 0.06 a los 100 ps.
- Una variante del método usa fibra hifi (de alta birrefringencia) entre dos controladores de polarización para localizar el desplazamiento del pico de manera precisa y así obtener medidas de PMD muy pequeños y con retardos del orden de los 0.004 ps.
- Las mediciones serán rápidas y simple, e insensible a la vibración de la fibra; excelente para una prueba rápida de calidad que permita la toma de decisiones a un buen costo beneficio.
- No se requiere comunicación entre la entrada y la salida de la fibra, es ideal para el uso de campo.
- Gran rango dinámico (0.004 a 100 ps).

Los equipos de hoy son transportables, (ver figura 3.13)



Figura 3.13 Analizador de PMD comercial — (Equipo Exfo FTB-5500B)

CAPITULO IV

REDES DE AREA METROPOLITANA

4.1. Las redes metropolitanas

Introducción

Una red de Área Metropolitana no es de fácil definición. No es ni acceso ni de larga distancia. Se encargan de unir a las dos y generalmente combina sus funciones. Eso quiere decir que una Red Metro soporta un mayor número de servicios, protocolos y tráfico en comparación a las redes de acceso y larga distancia. Esto también significa que las Metro requiere de una administración con mayor flexibilidad y escalabilidad que cualquier otra parte de la red.

Dicho esto existen diferentes definiciones para explicar lo que hoy en día significa una Metro en la práctica. En términos generales, una red Metro es un sistema de red que puede proveer facilidades de conmutación (switching) a alta velocidad a distancias típicas dentro de un área metropolitana (por ejemplo, una ciudad y su vecindad inmediata). Pudiera pensarse que la Metro es simplemente una LAN extendida para cubrir una superficie del tamaño de una ciudad. Esto no es exactamente así, pero algunos conceptos y técnicas desarrollados para las LANs se aplican también en las Metro y a medida que la red Metropolitana se aproxime a los usuarios, los servicios y los formatos de trama se hacen muy variados y con mayor interfaces de telecomunicaciones, lo que lo hace diferente de otras redes de Telecomunicaciones.

4.2 Tecnología en las redes metro

4.2.1 Infraestructura

En el marco de la Red Telefónica Pública Conmutada, las redes de larga distancia transportaron inicialmente poco tráfico; la mayoría del tráfico, particularmente las

llamadas telefónicas, han sido siempre locales dentro de la red Metropolitana. El Internet basada en el contenido, cambio todo el entorno. Primeramente las redes de Larga distancia crecieron y se volvieron dominantes en término de infraestructura, (en el Perú se construyó la Red Nacional de fibra óptica entre los años 1994 y 1995). Hoy en día los contenidos se están volviendo locales, lo que han convertido a las redes Metropolitanas y de Acceso en verdaderos cuellos de botella, y hoy son la parte de la infraestructura en la cual han puesto su atención los operadores, con lo cual hoy en día la infraestructura de las redes Metro y de Acceso representan los segmentos de mas rápido crecimiento, y es aquí donde se utilizan los términos mas complejos tanto por la variedad de protocolos como arquitectura utilizada.

4.2.2 Consideraciones sobre la fibra

Aunque en la elección de las fibras a utilizar en una red determinada es necesario evaluar numerosos factores, los dos parámetros de mayor importancia son la atenuación y la dispersión [12]. Estos atributos determinan si una fibra es adecuada para su utilización en una configuración dada.

La Figura 4.1 muestra las fibras disponibles para las redes Metropolitanas. La fibra que predomina en las redes Metropolitanas actuales es la monomodo estándar (SMF), que tiene un mínimo de dispersión a 1310 nm y un mínimo de atenuación en la región de 1550 nm. Como se muestra en las Figuras 4.1 y 4.2, la fibra SMF es compatible con las bandas O (Original), S (“Short”, es decir, corta), C (Clásica) y L(Larga). Como muestra la Figura 4.2, su mayor atenuación se encuentra en la región de 1383 nm debido a la absorción de la luz por los iones residuales de agua, lo que hace que la fibra SMF no sea la elección ideal para su uso en la banda E (Extendida).

Para abrir la banda E a la transmisión de la fibra, se ha desarrollado una fibra SMF mejorada (E-SMF) que reduce significativamente el pico de atenuación debido a la absorción del agua, sin afectar a la curva característica de dispersión. Consecuentemente, la fibra E-SMF es compatible con todas las bandas desde 1260 nm a 1625 nm (bandas O, E, S, C y L), lo que permite disponer de un 30 % más de longitudes de onda que las fibras SMF convencional. Esta gama de longitudes de onda más amplia hace que la fibra E-SMF sea la ideal para su utilización en los sistemas de multiplexación del tipo CWDM, ya que permite ofrecer longitudes de onda suplementarias en la banda E.

En las futuras redes donde las longitudes de onda atravesarán todo el anillo metropolitano, los sistemas operarán sobre distancias más largas sin necesidad de regeneración de la señal. Dada la mayor dispersión de ambas fibras SMF y E-SMF, el límite de dispersión para los sistemas de 10 Gbps se encontrará alrededor de los 70 km. Los anillos de mayor distancia necesitarán la utilización de módulos de compensación de dispersión (DCM); estos módulos contienen longitudes largas de fibra con dispersión negativa (fibra compensadora de dispersión, DCF) para reducir la dispersión positiva acumulada. A pesar de que estos módulos aumentan la distancia de operación, sin embargo presentan fuertes pérdidas y afectan negativamente al coste del sistema. Las altas pérdidas pueden aumentar las necesidades de amplificación en el anillo.

La característica de dispersión de la familia de fibras monomodo estándar (SMF) limita su utilización a aplicaciones cuya distancias sean menores de 70 km. Estas fibras no son la elección ideal para distancias superiores debido al mayor coste y a las pérdidas introducidas por los dispositivos DCF. La fibra de dispersión no nula desplazada (NZ-DSF) resulta una mejor alternativa para su utilización en aplicaciones cuyas distancias sean superiores a 70 km. Como muestra la Figura 4.1, el punto de dispersión cero de la fibra NZ-DSF se encuentra en una longitud de onda que es mayor que la correspondiente para las fibras de la familia SMF. La Figura 4.2 muestra que la característica de atenuación de la fibra NZ-DSF es similar a la de la fibra SMF. La fibra NZ-DSF está optimizada para obtener unas prestaciones mejores en la región de 1550 nm, donde tanto la atenuación como la dispersión muestran un comportamiento óptimo. Aunque la fibra NZ-DSF se optimizó inicialmente para aplicaciones de larga distancia, las más recientes generaciones de dicha fibra presentan también unas prestaciones muy interesante para las redes metropolitanas.

La Figura 4.1 muestra los dos tipos de fibra NZ-DSF disponible para su aplicación en redes metropolitanas. Una tiene una dispersión positiva de $8 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ a 1550 nm y la otra tiene una dispersión negativa de $-8 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$. Ambos productos presentan unos niveles moderados de dispersión en la región de 1550 nm y proporcionan una mejor compatibilidad con la multiplexación DWDM, cuyo espaciado entre longitudes de onda es estrecho. La fibra NZ-DSF metropolitana proporciona compatibilidad con las bandas S, C y L desde 1440 nm a 1625 nm, lo que permite disponer de una banda de transmisión suplementaria. Puesto que la fibra NZ-DSF metropolitana tiene una dispersión que es

menor de la mitad de la que tienen las fibras de la familia SMF, se puede utilizar sobre una distancia mayor antes de que la dispersión llegue a ser un factor limitativo y se requiera compensación. En los futuros sistemas, estas fibras NZ-DSF alcanzarán hasta 200 km, sin necesidad de compensación de la dispersión, eliminándose, de esta manera, los módulos DCM y los amplificadores adicionales que son requeridos por las fibras de la familia SMF. Ambas fibras NZ-DSF con dispersión positiva y negativa son adecuadas para los sistemas cuyas distancias de transmisión son de hasta 200 km, operando en la banda C. No obstante, se recomienda la fibra de dispersión positiva puesto que ofrece mayores distancias de funcionamiento, la posibilidad de poder ser utilizada con los futuros sistemas que operan a 40Gbit/s y la compatibilidad con las aplicaciones de acceso y con las generaciones de sistemas precedentes.

Los sistemas de 10 Gbps y de 40 Gbps requieren una fibra cuya dispersión pueda ser compensada mediante dispositivos estándar. Puesto que los módulos DCM actuales contienen fibra con dispersión negativa, obviamente estos no pueden ser utilizados con las fibras NZ-DSF de dispersión negativa porque no compensarían dicha dispersión. Para compensar la dispersión de las fibras NZ-DSF de dispersión negativa se debe utilizar bobinas de fibra SMF con una alta dispersión positiva. Desgraciadamente se necesita una gran cantidad de fibra de dicho tipo: se requiere un kilómetro de fibra SMF para compensar dos kilómetros de fibra NZ-DSF de dispersión negativa. Esto produce un aumento significativo de las pérdidas en la red, lo que hace que no sea una solución realmente práctica. Adicionalmente, aunque la fibra SMF puede compensar la dispersión de la fibra NS-DSF de dispersión negativa, no puede compensar la pendiente de la dispersión y, de esta manera, se puede llegar a una situación en la cual algunas longitudes de onda excedan las tolerancias de dispersión del sistema, debido a que se aumentan las diferencias de dispersión residual acumulada en el recorrido extremo a extremo.

Como los futuros sistemas a 40 Gbps tienen unas tolerancias de dispersión significativamente más ajustadas, la totalidad de la dispersión acumulada de la fibra deberá ser virtualmente compensada. A la vista de los más altos requisitos de compensación de dispersión en los sistemas de 40 Gbps, la fibra NZ-DSF de dispersión negativa no se considera compatible con tales sistemas. Por su parte, se recomienda una fibra NZ-DSF de dispersión positiva, diseñada para aplicaciones metropolitanas, con una moderada dispersión de $8 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ operando a 1550 nm. La Figura 4.1 muestra que, puesto que el

punto de dispersión cero de la fibra NZ-DSF de dispersión negativa corresponde a una longitud de onda que se encuentra después de la región de la banda L a 1620nm, su dispersión es muy baja en esta banda y muy alta a 1310 nm. La baja dispersión en la banda L aumenta la no linealidad entre los canales, restringiendo en esta región las capacidades de multiplexación DWDM de la fibra NZ-DSF de dispersión negativa. La alta dispersión a 1310 nm también limita su compatibilidad en esta región. Debido a que la fibra NZ-DSF de dispersión positiva para aplicaciones metropolitanas tiene una longitud de onda de dispersión cero alrededor de 1400 nm, su dispersión es moderadamente baja (típicamente 6 ps/nm*km) a 1310 nm lo que le hace ser compatible con los sistemas de canal único que operan a 1310 nm. Esta dispersión representa aproximadamente una cuarta parte de la dispersión de la fibra NZ-DSF de dispersión negativa, dando como resultado que el alcance de dispersión de los sistemas a 1310 nm se cuadruple. Aunque una fibra NZ-DSF de dispersión positiva ofrece unas buenas prestaciones a 1310 nm, el mayor alcance se consigue con fibra E-SMF o con fibra SMF que tiene su longitud de onda de dispersión cero en la región de los 1310 nm.

Tanto la tecnología CWDM como DWDM tienen su lugar en la reciente infraestructura de la Red-Metro. Cuando estas tecnologías se utilizan en combinación con las fibras ópticas apropiadas, los beneficios económicos son significativos. Las fibras de aplicación específica, tales como las fibra de pico de agua cero (ZWPF- Zero water peak fiber) ó E-SMF, y las fibra de dispersión no nula desplazada (NZ-DSF) que pueden aumentar los beneficios del WDM.

Inicialmente, las soluciones de DWDM se consideraron para el mercado del Metro porque esta tecnología estaba ya disponible en las redes de larga distancia (Long Haul). Desde que LH requirió del uso de amplificadores dopados con Erblio (EDFAs) para vencer la atenuación, el objetivo fue transmitir el mayor número de canales posible en el espectro en el cual trabajan los EDFA. Esto requiere de filtros ópticos de multiplexación/demultiplexación precisos para proporcionar espaciamentos de 200 GHz ó menos y láseres controlados con longitudes de ondas estables a una temperatura constante para no permitir el deslizamiento de la señal fuera del canal. Los gastos para lograr este control preciso de la longitud de onda resulta prohibitivo para las redes de distancias cortas como las Metro.

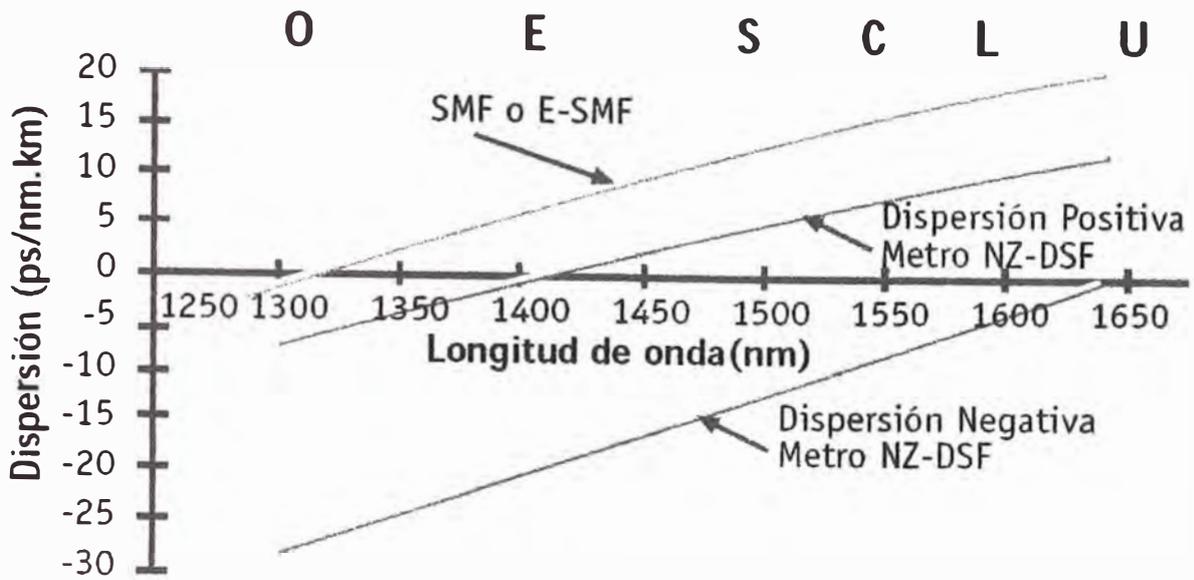


Figura 4.1 Características de dispersión de las fibras ópticas disponibles para su uso en redes Metropolitanas.

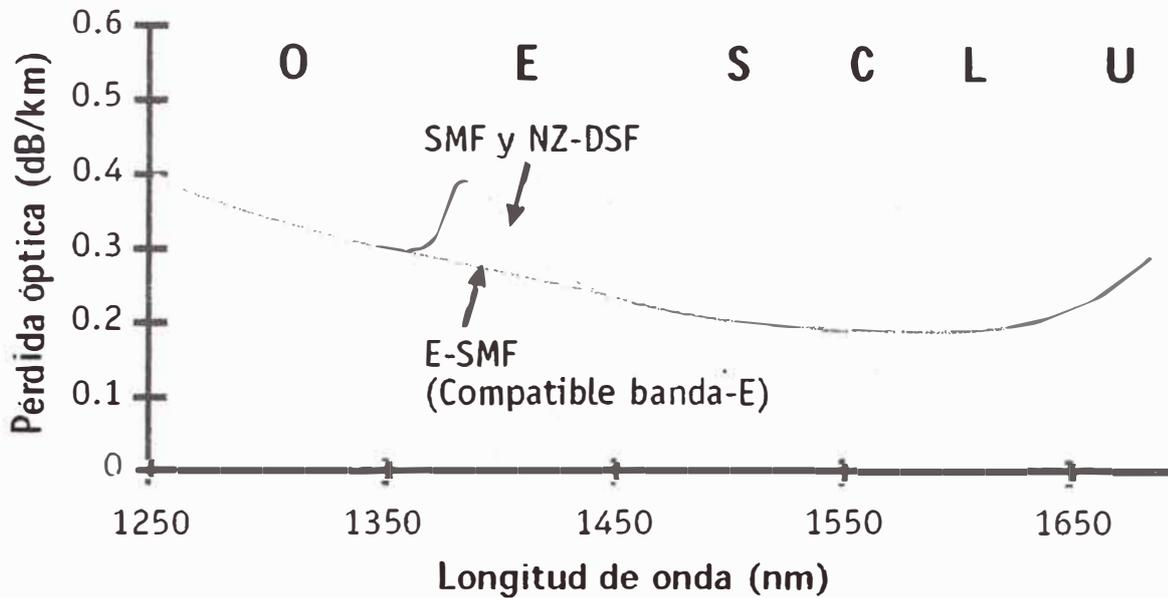


Figura 4.2. Características de atenuación de las fibras SMF y NZ-DSF para uso en redes Metro

En las metro, no se requieren amplificadores ópticos para distancias cortas, así que los canales de WDM no son limitados a una sola banda espectral. Tal libertad de uso del ancho de banda permite tener canales con mayor espaciamento, estas características se encuentran en los sistemas CWDM con espaciamento de 20 nm entre canal, basado en la recomendación ITU-T G.694.2.

La rentabilidad de CWDM se relaciona directamente con el espaciamento de los canales. Los sistemas DWDM, requieren pequeños espaciamento entre canales por lo que requiere componentes más costosos. Desde que el desplazamiento de las longitudes de ondas del láser es proporcional al incremento de la temperatura, los sistemas DWDM requieren emplear láser refrigerados para mantener la longitud de onda dentro de las ventanas ópticas estrechas reconocidas por los filtros del multiplexor/demultiplexor. Los ahorros por usar CWDM van desde el 30% hasta el 65%

4.2.3 Los nuevos estándares de fibra y multiplexación

Tal como hemos mencionado líneas arriba, la fibra ZWPF surgen como un nuevo estándar de fibra debido a que consideran criterios mencionados que traen como resultado el despliegue de redes a un precio competitivo comparado con las SMF convencional.

En el año 2002 se aprobó la norma UIT-T G.694.2 la cual 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 4.3 las fibras monomodo G.652 convencionales presentan una atenuación significativa de 1350 nm a 1450 nm 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.

Canales estandarizados por la ITU-T para CWDM

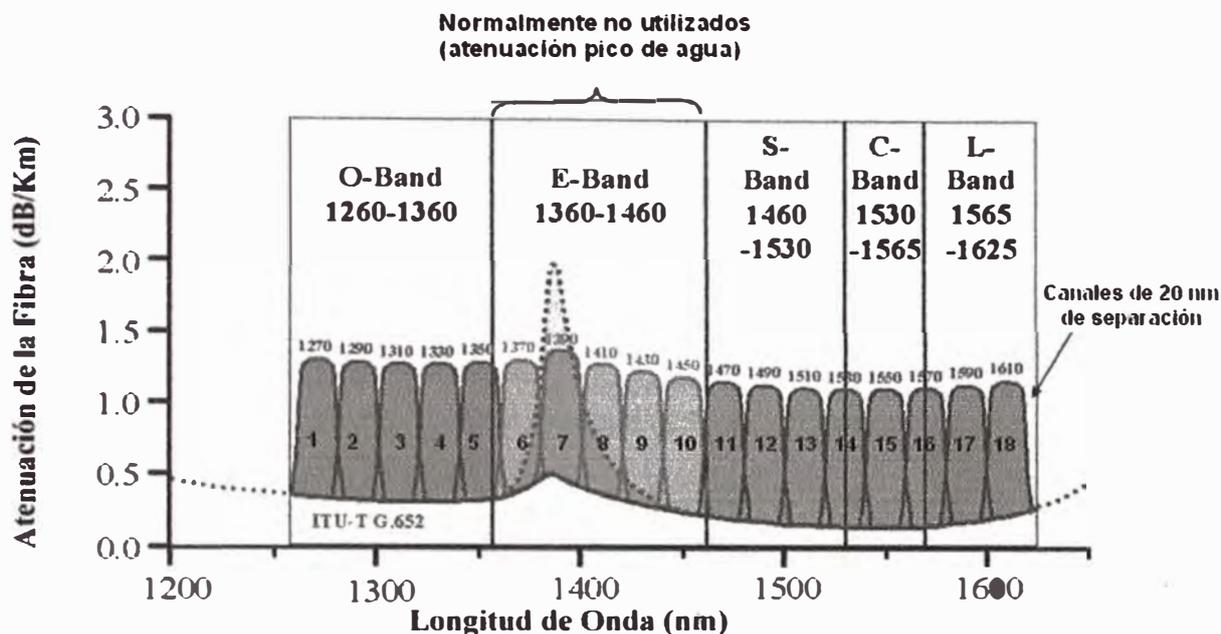


Figura 4.3 Longitud de Onda de CDWM-Metro, con rejillas de acuerdo a lo especificado por la ITU G.694.2

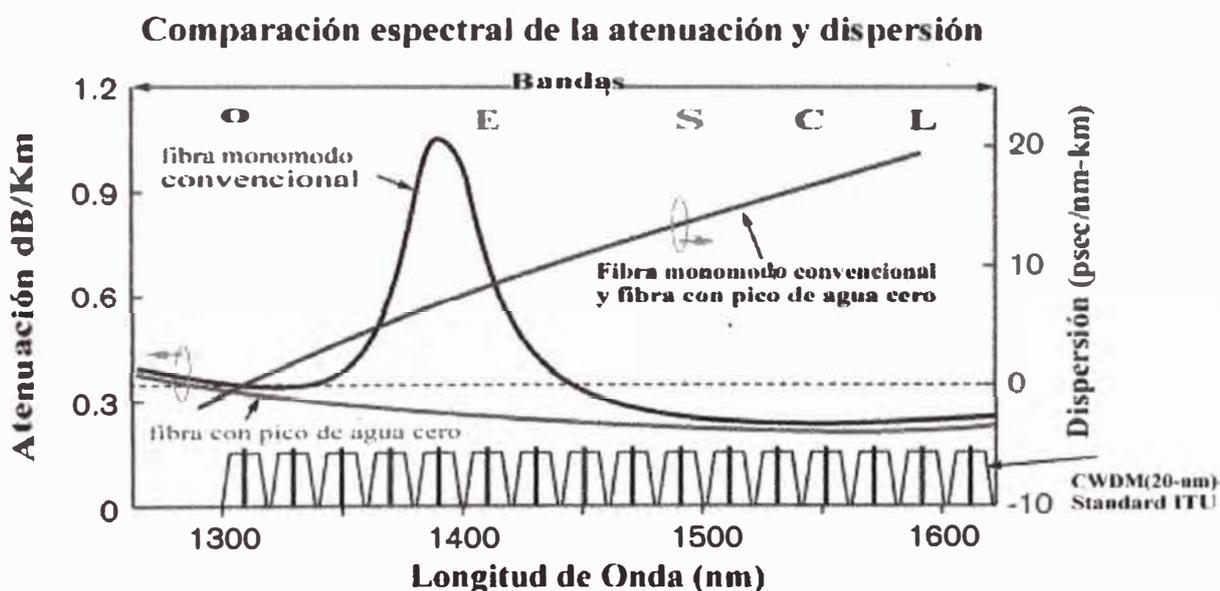


Figura 4.4 La fibra G.652.C/D de pico de agua cero remueve la atenuación alta asociada con el pico de "agua", permitiendo la transmisión de señales en la Banda-E. La fibra G.652.C/D tiene la misma dispersión que la fibra convencional monomodo. En la figura se muestran los canales CWDM - ITU G.694.2 ; los de color oscuro (rojo) indican los canales ganados por utilizar fibra G.652.C/D.

Considerando un espaciado entre canales de 20 nm, se pueden transmitir hasta 16 canales CWDM cubriendo la banda de 1310 nm a 1610 nm sobre una fibra ZWPF. 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 1310 nm, 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 802.3ae⁵.

4.2.4 La DWDM en las redes metro [13]

Mientras que las fibras ZWPF combinadas con el CWDM permite una solución de bajo costo para las redes Metro de distancias cortas y velocidades de 2,5 Gbps (OC-48); ante la necesidad de soportar mayores tráfico se hace de necesidad migrar a 10 Gbps (OC-192). Los portadores esperan que la infraestructura de DWDM cubra la necesidad de aumentar la capacidad requeridas para distancias más largas.

El reto de las empresas de Telecomunicaciones es crear una red metro que pueda soportar múltiples servicios de manera transparente con velocidades hasta de 10 Gbps y protocolos que incluyan formatos diversos tales como SONET/SDH, IP, ATM, servicios de conexión de empresas (Escon), Y Gigabit Ethernet, al manejar múltiples protocolos y velocidades variadas, la red será mas eficiente y podrá aportar ganancias adicionales.

4.3 Requerimiento de pruebas en la red metro

Para afrontar la demanda creciente de ancho de banda de las redes Metro, las redes actuales se están repotenciando y para lograrlo lo están realizando a través de una combinación del incremento de velocidad de transmisión, el uso de Multiplexores de agregación y extracción (OADM), y Multiplexación por división de longitud de onda densa). Cada una

⁵ IEEE 802.3 es el nombre de un comité de estandarización del IEEE y por extensión se denominan así los estándares por el producidos. La primera versión fue un intento de estandarizar ethernet aunque hubo un campo de la cabecera que se definió de forma diferente. Posteriormente ha habido ampliaciones sucesivas al estándar que cubrieron las ampliaciones de velocidad (Fast Ethernet, Gigabit Ethernet y el de 10 Gigabits), redes virtuales, hubs, conmutadores y distintos tipos de medios, tanto de fibra óptica como de cables de cobre (tanto par trenzado como coaxial). Los estándares de este grupo no reflejan necesariamente lo que se usa en la práctica, aunque a diferencia de otros grupos este suele estar cerca de la realidad.

La versión 802.3ae es un Grupo de trabajo del IEEE 802.3, para ampliar el protocolo 802.3 a una velocidad de operación de 10Gb/s y para expandir el espacio de la aplicación Ethernet de modo que incluya compatibilidad mejorada con los vínculos de Red de área amplia (WAN). El estándar resultante ofreció un importante aumento en el ancho de banda y la administración opcional de redes compatibles con WAN, además de mantener compatibilidad máxima con el estándar IEEE 802.3 Ethernet.

de estas técnicas presenta nuevos desafíos en el campo de la Ingeniería del mantenimiento, para lo cual se requieren nuevas técnicas y equipos para probar las nuevas características de estas redes.

Los cables de fibra óptica de estas redes requieren de diversas pruebas y equipos de medida para la instalación y el mantenimiento. Se requieren típicamente el uso de equipos de prueba óptica tal como un OTDR (Reflectómetro Óptico en el dominio de tiempo), Conjunto de Prueba de Pérdida óptica OLTS, Pruebas de Retorno óptico (ORL), Dispersión Cromática (CD) e Instrumentos de medida de la dispersión del modo de polarización (PMD), y un OSA (Analizador de espectro óptico)

4.3.1 Prueba durante la instalación

Durante la fase de la instalación los objetivos primarios del instalador son medir y verificar la pérdida y reflexión bidireccional dentro de los enlaces de la METRO. Esto se logra usando un buen OTDR y OLTS.

La prueba bidireccional del OTDR es requerida para obtener las medidas exactas de la pérdida del empalme, debido a variaciones de los tipos de la fibra y del tamaño del núcleo, los empalmes o los conectores pueden aparecer como ganancia de energía en una dirección y como una pérdida en la dirección opuesta, ni uno ni otro de las cuales es exacto. El tomar el promedio de las pérdidas en ambas direcciones dará lugar a la pérdida verdadera del evento.

Siendo el OTDR el principal equipo de prueba, es crítico que este equipo tenga una funcionalidad apropiada. La siguiente guía se debe utilizar para escoger el OTDR apropiado:

- **Equipo de plataforma modular.**- proporciona una máxima flexibilidad y permite usar una serie de módulos de pruebas en la misma plataforma, proporcionando mayor compatibilidad de los resultados de las pruebas así como una reducción de costo de los equipos.
- **Módulos OTDR de múltiples longitud de onda.**- Módulos con 2, 3 o 4 longitudes de onda deben de estar disponible para probar y documentar correctamente la red.
- **Modos de prueba especializadas.**- Diseñados para que con un solo Setup, permita realizar pruebas bidireccionales de manera repetitiva en cables de gran capacidad.

Esto permite eliminar errores y mano de obra operador, reduciendo costos de las mediciones durante la instalación y el mantenimiento.

- **Modo metro.-** permitir que el OTDR cuente con un alto rango dinámico, para asegurar una completa evaluación de los enlaces y poder ver todas las características críticas de la red.
- **Software de emulación de datos.-** un software de la emulación de los datos debe estar disponible para permitir ver, imprimir y realizar el análisis bidireccional de los datos de prueba adquiridos. Las capacidades de generar reportes es también requerido para la documentación apropiada del sistema de mantenimiento

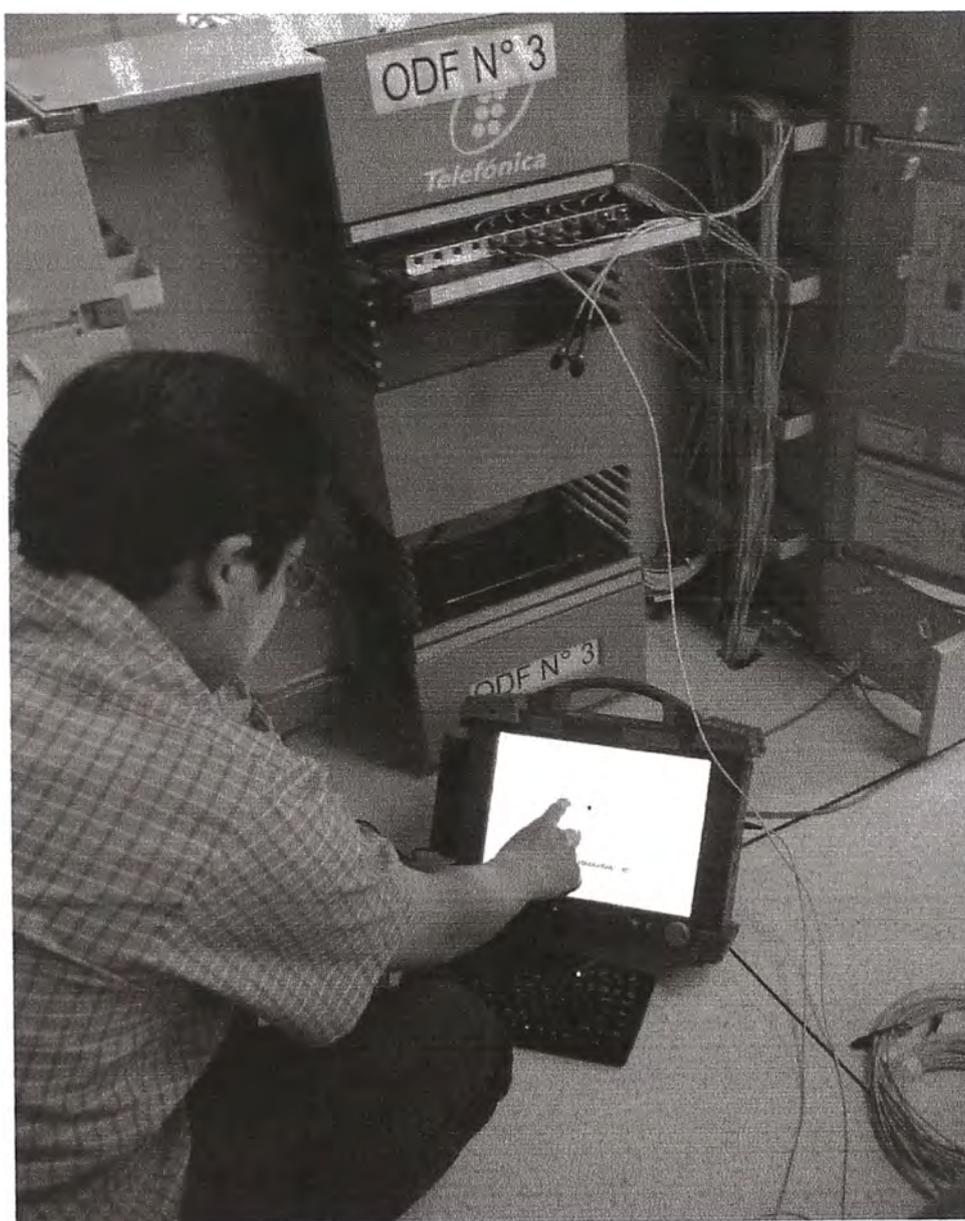


Figura 4.5 Mediciones con un OTDR en ODF

Aunque el OTDR proporcionará la atenuación total punto a punto, un método más exacto para obtener la pérdida es mediante el uso de un sistema de prueba formado por una fuente de luz y un medidor de potencia. La fuente de luz inyecta un nivel conocido de señal en una fibra y el medidor mide la cantidad de luz en el extremo opuesto de la fibra, midiendo de manera directa la pérdida de extremo a extremo.

Las medidas de OLTS deben también ser bidireccionales e incluir los conectores a ambos extremos y ayudar a detectar fibras transpuestas.

La siguiente guía debe de tomarse en cuenta para escoger un apropiado conjunto de OLTS con ORL:

- **Medidor de potencia óptica.**- calibrados a 1310, 1550. y 1625 nm con detección automática de longitud de onda, auto conmutable, y permita el almacenaje de datos. Se recomienda una sensibilidad mayor a los - 45 dBm.
- **Fuente de luz estabilizada.**- Debe incluir fuentes con transmisión a 1310, 1550 y 1625 nm con una salida mínima del -10 dBm y de gran estabilidad para resultados exactos.
- **Medidor de ORL.**- se requiere la funcionalidad de ORL para documentar exactamente el nivel de la señal de retorno de todo el enlace de fibra. Nota: el ORL se define como el cociente de la energía reflejada a la energía del incidente.

La tabla 4.1 proporciona las pautas generales de las características usuales de pérdida en el cable y conectores.

Tabla 4.1 Características de las pérdidas en los cables de fibra y conectores

Características	Especificaciones Típicas
Pérdida de empalmes (Promedio bidireccional)	< 0.15 dB
Pérdida de los conectores mecánicos (Promedio bidireccional)	< 0.50 dB
Reflectancia de un conector mecánico	< -45 dB (Super Pulido) < -50 dB (Ultra Pulido) < -55 dB (Pulido Angular)
Atenuación de la fibra	< -0.25 dB/Km 1550 nm < 0.25 dB/Km a 1625 nm

Hoy las redes Metro funciona generalmente a 2.5 Gbps y por lo tanto la prueba del CD y de PMD no son usualmente requeridas. Sin embargo, pensando en las futuras redes que utilizaran más canales DWDM y mayores velocidades, es recomendable realizar las mediciones tanto del CD como el PMD, las cuales actualmente se están considerando en los tramos de redes de larga Distancia. Esto se realiza con el objetivo de garantizar el funcionamiento óptimo del sistema con velocidades mayores o iguales a los 10 Gb/s. En resumen, la tabla 4.2 lista alguna de las mediciones estándar que deben de realizarse para documentar el proceso de instalación:

Tabla 4.2 .- Mediciones estándar durante la instalación

Medidas durante la Instalación	OTDR	OLTS/ORL	CD y PMD
Atenuación Extremo a Extremo (Bidireccional)	•	•	
longitud del enlace	•		
Localización y pérdida de los empalmes y conectores (Bidireccional)	•		
Localización de Add/Dropp	•		
ORL Total (pérdida de retorno óptico)		•	
Reflectancia del conector	•		
Dispersión			≥ 10 Gb/s

4.3.2 Provisión y mantenimiento de las redes metropolitanas

Una vez que la instalación de la fibra ha sido completada, para la provisión de los servicios así como para el mantenimiento es esencial verificar el funcionamiento de la red. Esto se logra efectuando muchas de las medidas que fueron realizadas durante la fase de la instalación, a la cual hay que agregar el análisis de las características del sistema de DWDM ó CWDM según sea el caso, que este ya este instalado en la red. De ser así pues, el analizador de espectro óptico (OSA) se convierte una herramienta esencial para documentar y verificar el funcionamiento de los canales individuales (longitudes de onda) en el sistema de DWDM. Para obtener el funcionamiento óptimo del sistema, cada canal se mide para obtener la longitud de onda central, energía, el cociente óptico de la señal/ruido (OSNR) y TILT del sistema. La falta de estos parámetros en el sistema puede afectar la pérdida de canales o incrementar el BER (Bit Error Rate). En adición al rango espectral, el OSA debe tener una buena resolución, para poder medir los canales con espaciamiento ajustado, y proveer exactitud sobre todo el espectro.

Medición del espectro

El mayor desafío de los nuevos requerimientos para las pruebas y monitoreo de los sistemas DWDM es la necesidad de caracterizar los componentes y enlaces como una función de la longitud de onda. El instrumento que permite realizar esto es el analizador de espectro óptico (OSA)

Parámetros a ser medidos en el campo

- **Potencia de un canal:** Se debe de ser capaz de medir la potencia óptica en cada canal para verificar la distribución equitativa de la potencia sobre el ancho de banda del amplificador EDFA usado en el enlace.
- **Centrado de las longitudes de onda de un canal y su espaciamento:** El valor exacto del centrado de las longitudes de onda de cada canal debe de ser medido para detectar corrimientos inaceptables de las fuentes láser.
- **Ratio señal a ruido (OSNR):** Este es uno de los parámetros más importantes que puede ser medido por cada canal en un sistema DWDM, y es el mejor indicador de la performance global del canal.
- **Crosstalk:** Este parámetro revela el nivel de señal indeseable (El ruido mas la contribución de los otros canales), en la banda del canal bajo prueba.

4.4 Descripción de los principales equipos de pruebas requeridos para las redes metro.

En el presente capítulo realizaremos una descripción del OTRD y el OSA, la descripción de los otros equipos no menos importantes como los medidores OLTS y ORL, lo describiremos en el próximo capítulo.

4.4.1 OTDR - Teoría y práctica

Como su nombre lo indica, el reflectómetro permite la evaluación de la fibra óptica en función del tiempo. El método consiste en medir la luz reflejada hacia el transmisor a partir del momento en que una señal es enviada a lo largo de la fibra, parte de esta señal regresa al transmisor como consecuencia de la retrodispersión que resulta de la dispersión de Reyleigh y las reflexiones de Fresnel. La dispersión de Reyleigh resulta de la imperfecciones en la fibra (diferencias de densidad y de composición). Puede decirse que

la luz se dispersa homogéneamente en toda la longitud de una fibra de buena calidad. Las reflexiones de Fresnel se deben a cambios del índice de refracción a nivel de conectores, empalmes y finales de fibras. Una porción de luz dispersada y reflejada regresa a la entrada como luz retrodispersada.

Para simplificar la explicación, puede hacerse una analogía entre el OTDR y un radar, el OTDR envía una señal y analiza y evalúa la señal que regresa, lo que permite efectuar la pruebas a partir de un solo extremo de la fibra, la información aparece en forma de curva de potencia en función de la distancia. UM esquema básico del OTDR se muestra en la figura 4.6

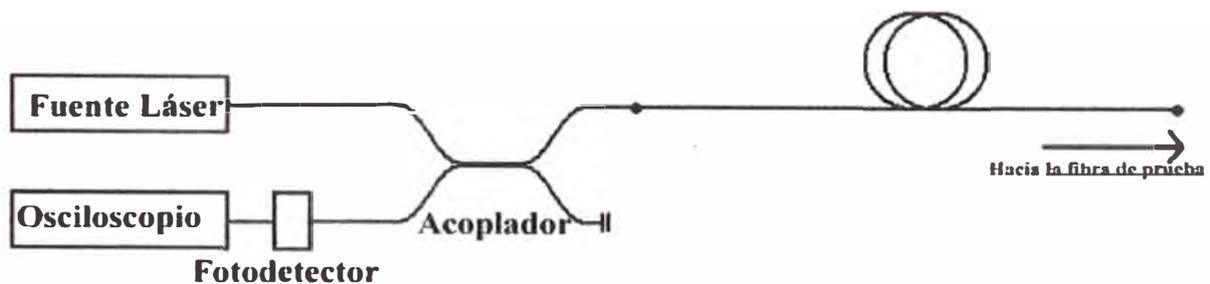


Figura 4.6. Principales componentes de un OTDR estándar

Los componentes principales de un OTDR son la fuente láser, el divisor de haz, el fotodetector y el osciloscopio. Un pulso corto de alta potencia es enviado a través del divisor de haz e inyectado en la fibra. La luz que viaja a lo largo de la fibra es reflejada hacia el transmisor. El fotodetector, de tipo avalancha, detecta la luz que regresa al OTDR. La salida amplificada del detector sirve de entrada vertical al osciloscopio. Debido a que la potencia en el detector es muy pequeña, el OTDR toma varias medidas para obtener el promedio de la señal-ruido. El tiempo que le toma a la señal en ir y venir determina los cálculos de distancia. La ecuación siguiente muestra la relación que existe entre la distancia, el tiempo y el índice de refracción de la fibra.

$$D = \frac{(c.t)}{2n}$$

Donde :
 D = distancia calculada
 c = Velocidad de la luz en el vacío = 2.998×10^8 m/s
 t = tiempo transcurrido entre el lanzamiento y la recepción
 n = índice de refracción de la fibra bajo prueba

El índice de refracción es un parámetro que determina el fabricante y que debe ser especificado antes de iniciar las pruebas. La pantalla de OTDR indica el tiempo en el eje x y la potencia en el eje y. La atenuación aparece como una pendiente negativa. Debido a que la luz dispersada y reflejada atenúa la señal, ésta es cada vez más pequeña en función del tiempo.

Mediciones con un OTDR

Una curva OTDR permite medir:

- el total de la pérdida en la fibra
- la pérdida de cada evento (empalme por fusión, empalme mecánico, conector)
- la reflectancia de cada evento reflectivo (conector y empalme mecánico)
- la reflectancia total del sistema

Además de localizar los eventos antes mencionados, un OTDR también puede localizar con precisión:

- una ruptura en la fibra
- el final de una fibra

Los ecos y los eventos positivos, que explicaremos más adelante, son otros eventos que el OTDR puede localizar y caracterizar.

Dispersión de Rayleigh

Como lo muestra la figura 4.7, la dispersión de Reyleigh tiene su origen en cada punto de la fibra. La pendiente negativa de la curva indica que la señal retrodispersada disminuye debido a que ambas, la señal enviada y la señal recibida se atenúan con la distancia. el nivel de dispersión de Reyleigh también depende de la longitud de onda de la señal enviada por el OTDR, el nivel de retrodispersión es más elevado (aumento proporcional a λ^4) conforme la longitud de onda es más pequeña. Por ejemplo, el nivel de retrodispersión de una curva generada 1310 nm es más elevado que en una curva generada a una longitud de onda de 1500 nm. La diferencia entre el nivel de entrada y el nivel al final de la curva permite calcular la atenuación total o pérdida de extremo a extremo.

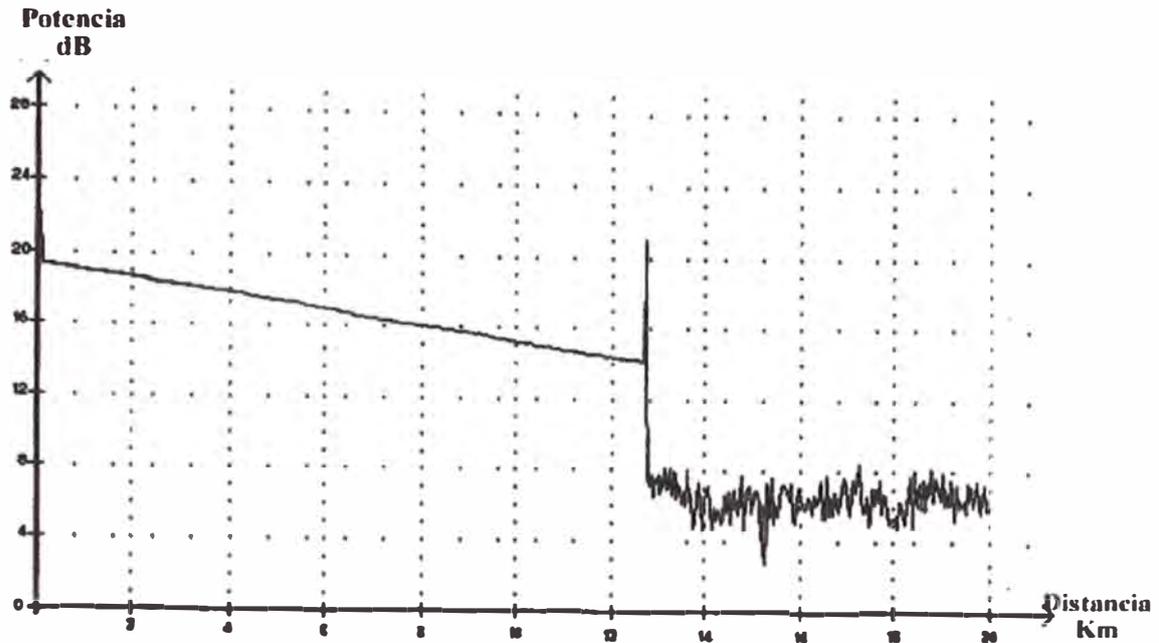


Figura 4.7. Señal de dispersión de Rayleigh

Reflexiones de Fresnel

La luz puede regresar al OTDR debido a las reflexiones de Fresnel, a consecuencia de rupturas en la fibra, empalmes mecánicos, conectores y finales de fibra, donde hay interfaces vidrio-aire, estos cambios aparecen en la curva como picos (ver figura 4.8). Cabe notar que las reflexiones de Fresnel generan señales de mayor potencia con respecto a la dispersión de Rayleigh.

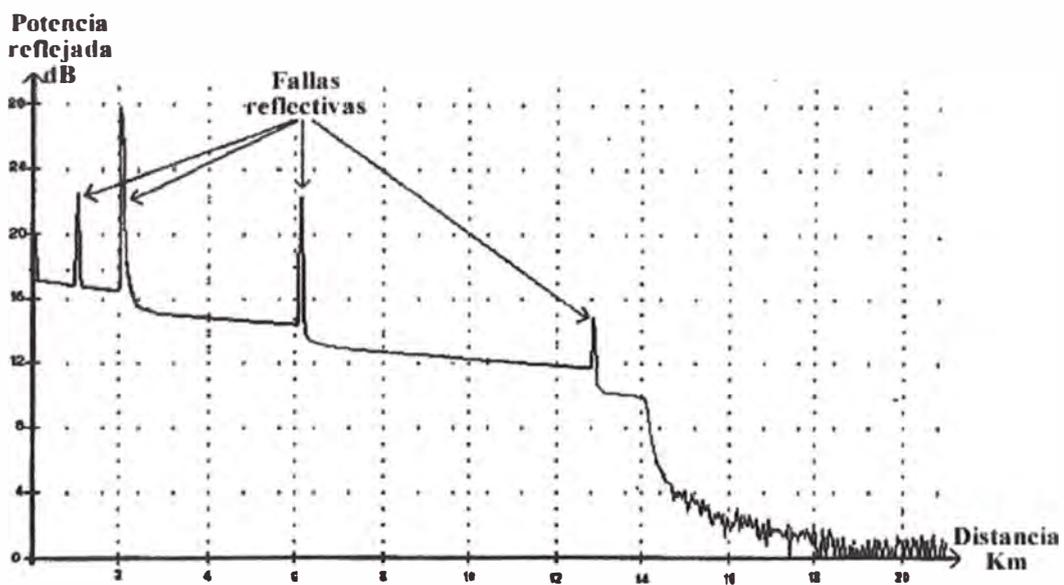


Figura 4.8. Reflexión de Fresnel

Ganancia

Una ganancia aparece en la curva como un escalón. Este fenómeno ocurre cuando un empalme une dos fibras con diferentes coeficientes de dispersión. Este coeficiente varía con la geometría de la fibra (apertura numérica, tamaño del núcleo, etc.). La tabla de eventos de OTDR denomina estos eventos como fallas positivas (ver figura 4.9).

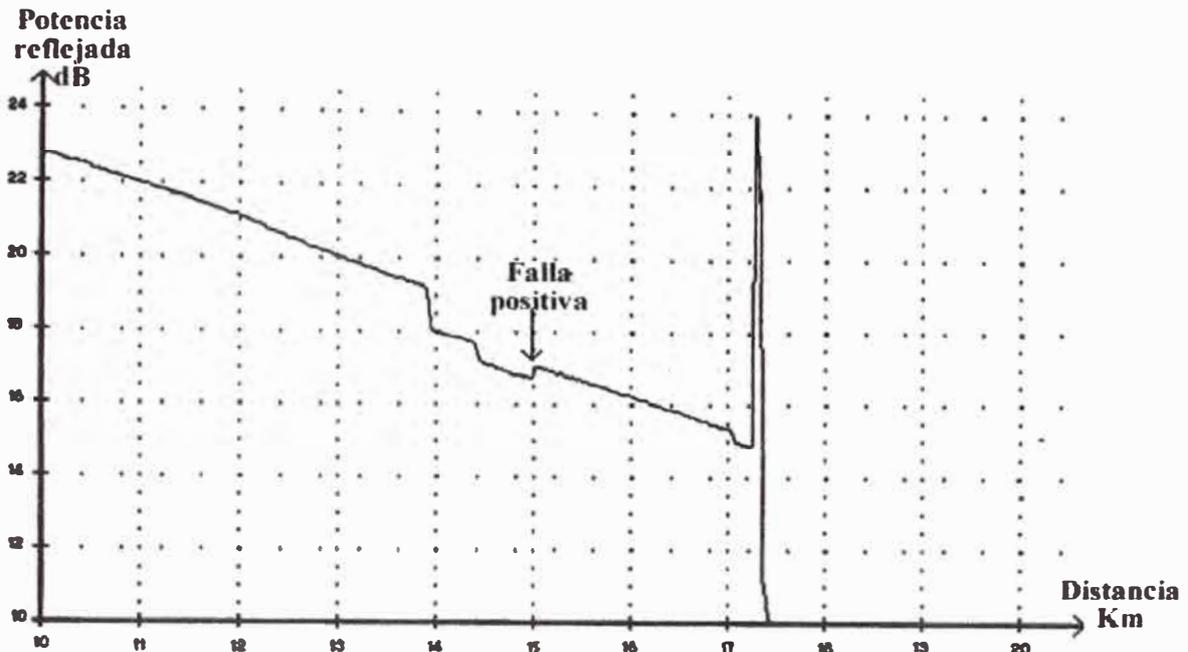


Figura 4.9. Falla positiva en una curva OTDR

Fantasma ó Ecos

Un fantasma, o eco, es un fenómeno óptico normal que ocurre cuando se prueban cortos segmentos de fibra, como una red multimodo, y se envía una señal con suficiente potencia como para que la luz reflejada vuelva a ingresar en la fibra.

Especificaciones del OTDR

Rango dinámico

Los dos métodos más conocidos para medir el rango dinámico son Bellcore 98% y SNR=1. El rango dinámico depende también de la longitud de onda. Por lo general, el rango dinámico a 1310 nm es 2 dB más elevado que a 1550 nm debido que a 1550 nm el coeficiente de dispersión es menor.

- **Método Bellcore 98% (figura 4.10)**

El método de medición del rango dinámico conocido como Bellcore 98%, representa la diferencia entre el nivel de inyección y el nivel de referencia de ruido a "98%". Este nivel es el punto en la zona de ruido a partir de la cual 98% de los puntos están por debajo del límite.

- **Método SNR=1 (figura 4.11)**

El método para medir el rango dinámico SNR=1 calcula la diferencia entre el nivel de entrada y el nivel donde la tasa señal-ruido es igual a 1.

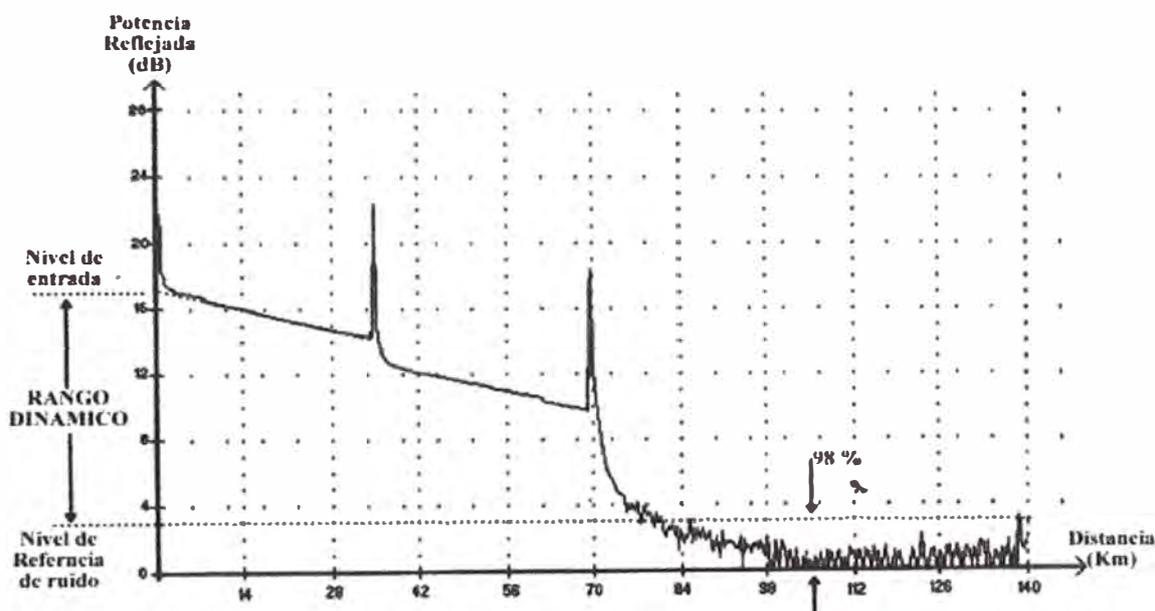


Figura 4.10. Medición de rango dinámico según el método Bellcore 98%

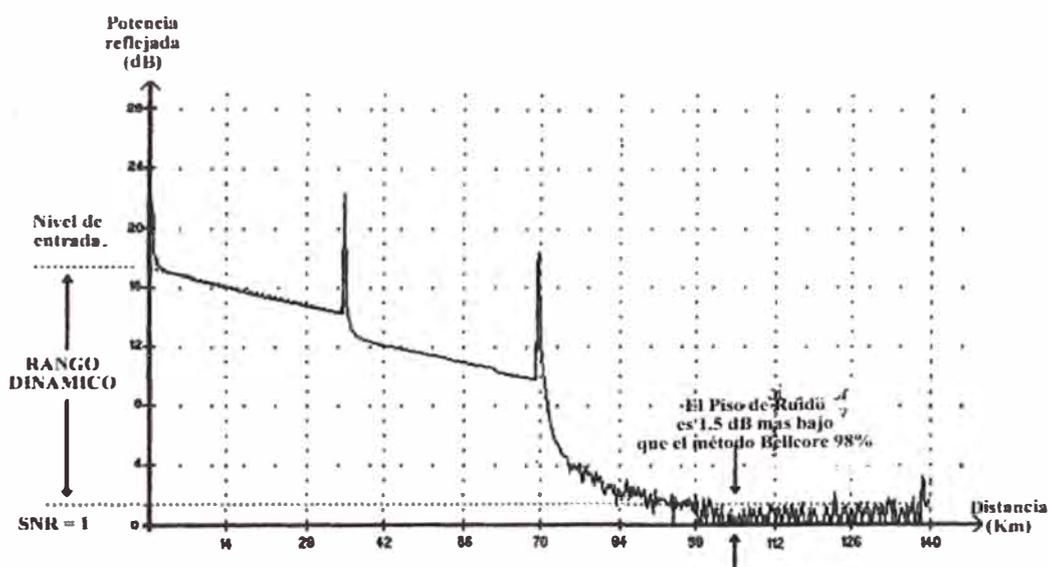


Figura 4.11 Medición de rango dinámico según el método SNR= 1

Ancho de pulso

El ancho de pulso cambia la cantidad de energía que se inyecta en la fibra. Por lo tanto, constituye un factor esencial para determinar el rango dinámico y la distancia de un mini OTDR en otras palabras, el ancho de pulso tiene un impacto directo en el rango dinámico. sin embargo, el rango de detección aumenta con la longitud del pulso hasta cierto punto a partir del cual ocurre lo contrario porque el análisis emplea los cambios en la pendiente para detectar los eventos. Si se analiza un empalme con un ancho de pulso de $2,5 \mu\text{s}$, la pendiente resultante es más pronunciada y más fácil de detectar que un empalme analizado con un ancho de pulso de $10 \mu\text{s}$.

Zona muerta

Las zonas muertas son fenómeno que ocurren cuando el detector queda saturado debido a fuertes reflexiones. Esta especificación se aplicaba sobre todo los OTDR, al igual que el rango dinámico

Resolución de la muestra (figura 4.12)

La resolución de la muestra es la distancia entre los puntos de adquisición y es una especificación física del OTDR. si el OTDR emplea 16.000 puntos para realizar una adquisición de 80 km, la resolución de muestra entre cada punto ($80 \text{ km}/16.000 \text{ puntos}$).

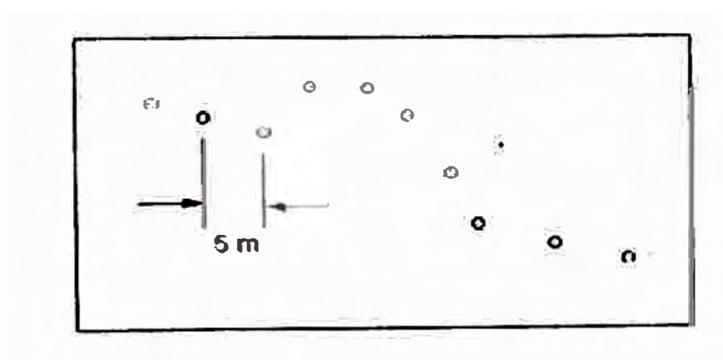


Figura 4.12 Resolución de la muestra en un rango de 80 km

Preparación para las pruebas

a) Índice de refracción

La determinación de la distancia que realiza el OTDR depende fundamentalmente del índice de refracción. Este valor lo proporciona el fabricante de fibras ópticas y debe ser verificado antes de iniciar cada prueba. El índice de refracción influye el cálculo de la

distancia debido a la velocidad de propagación de la luz en la fibra. Para cifras en la fórmula dada anteriormente y que repetimos aquí:

$$D = \frac{(c.t)}{2n}$$

Si : c = Velocidad de la luz en el vacío = 2.998×10^8 m/s
 t = tiempo transcurrido entre el lanzamiento y la recepción = 22,3 ms
 n = índice de refracción de la fibra bajo prueba = 1,500

Obtenemos una distancia de 3,327 km. Si el índice de refracción varía en una décima, es decir, a 1,400, la distancia que se obtiene es de 3,565 km. La diferencia es de 238 metros.

b) Longitud de onda

La longitud de onda de prueba debe concordar con la longitud de onda del sistema de transmisión. Las fibras monomodo tienen una pérdida por kilómetro de 0,35 dB a 1310 nm. Este valor varía dependiendo del fabricante. A 1550 nm, la pérdida por kilómetro es de 0,15 dB.

Cabe anotar que las macro y micro curvaturas son puntos de pérdida potenciales en la fibra y se detectan más fácilmente a 1550 nm que 1310 nm porque la mayor longitud de onda es más sensible a este tipo de pérdida.

c) Ancho de pulso

Uno de los parámetros más importantes de OTDR es el ancho del pulso. El ancho de pulso equivale al tiempo que el láser permanece encendido para inyectar una señal en la fibra. Mientras más tiempo está encendido, mayor es el ancho del pulso puede darse en tiempo o en distancia. El pulso más corto es de 10 ns o 1 metro y se emplea en aplicaciones multimodo. Las aplicaciones monomodo requieren de un ancho de pulso de 10 μ s o 1 km. La tabla 4.3 se da una equivalencia entre el tiempo y la distancia de los anchos de pulso más utilizados.

Un pulso largo posee más energía y llega más lejos. Sin embargo, la resolución es menor que un pulso corto porque, siendo más largo, no diferencia entre dos eventos que estén muy cerca el uno del otro. Si, por ejemplo, dos eventos están a cinco metros de distancia el uno del otro, un ancho de pulso de 100 ns (10 metros) no permite ver el segundo evento

porque el pulso es demasiado ancho. Este pulso llegará al segundo evento antes de haber pasado completamente el primero. Para ser ambos eventos es necesario elegir un ancho de pulso más pequeño, por el orden de los 30 ns. Sin embargo, si se desea llegar lejos, un ancho de pulso de 1 ms, cubre más distancia que un pulso de 10 ns.

Tabla 4.3 Equivalencia del tiempo y la distancia de anchos de pulso

Ancho del pulso (tiempo)	Equivalente en distancia
10 ns	1 m
30 ns	3 m
100 ns	10 m
275 ns	27 m
1 μ s	100 m
2,5 μ s	250 m
4 μ s	400 m
10 μ s	1 km

d) Distancia

Antes de iniciar las pruebas es importante ajustar la distancia. Esta distancia equivale a la distancia más corta posible que sobrepase la longitud de la fibra bajo prueba.

Relación entre el ancho de pulso y la distancia

No todos los anchos de pulso son compatibles con todas las distancias. Por falta de energía, un pulso corto puede quedar totalmente atenuado antes de llegar al final de la fibra si la distancia elegida es muy larga. Por otra parte, un pulso largo combinado con una distancia corta puede ocasionar la saturación de la fibra. La longitud total del pulso puede cubrir toda la distancia.

e)Tiempo de adquisición

Otro parámetro importante que debe ajustarse antes de iniciar la adquisición es el tiempo. Por lo general, mientras más largo el tiempo de adquisición, más nítida la curva, sobre todo en largos enlaces ópticos. El tiempo de adquisición determina el número de veces que una señal va a ser promediada para eliminar los picos de ruido y dar una imagen más clara de la calidad y de desempeño real de la fibra.

f) Tabla de eventos (figura 4.13)

Una vez realizada la adquisición, el programa analiza los datos y crea una tabla de eventos que describe la curva en forma detallada y organizada. La tabla de eventos indica los tipos de eventos detectados, la distancia de cada evento, la atenuación, la pérdida de retorno óptico, la pérdida por empalme, si la pérdida está dentro de los límites aceptables y los parámetros de la adquisición. También pueden determinarse límites de potencia para la detección de eventos y marcar aquellos que sobrepasen el límite.

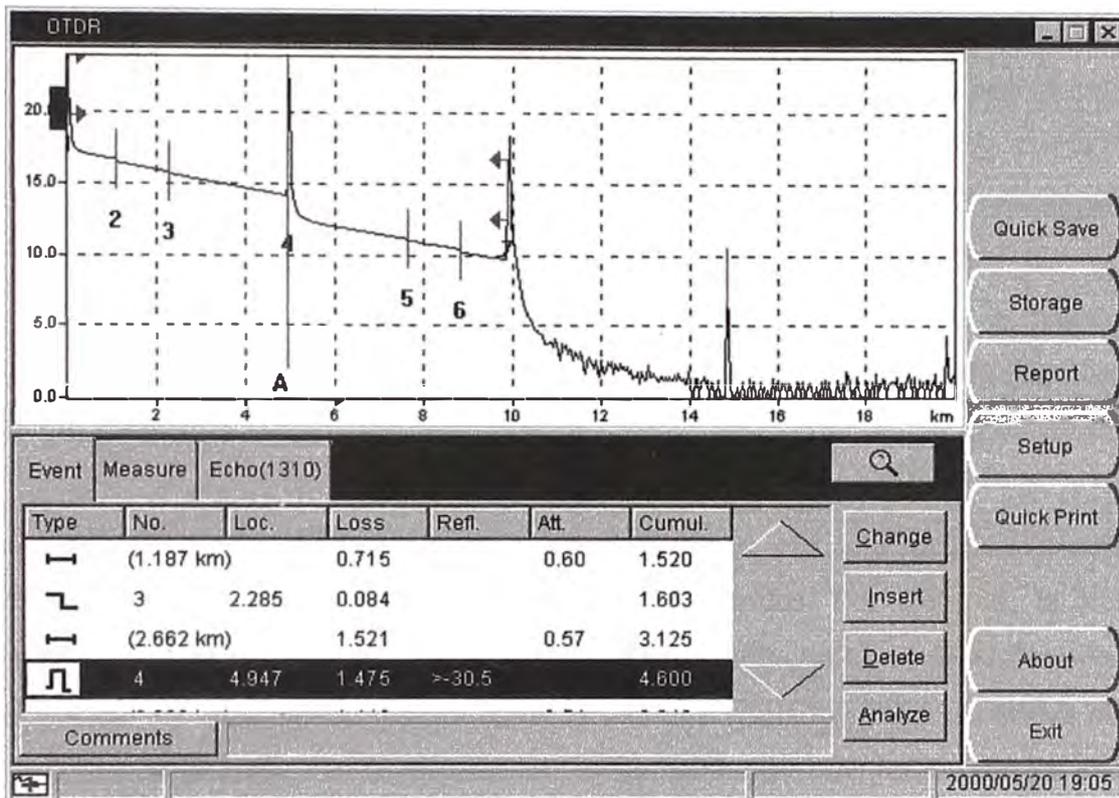


Figura 4.13 Curva y Tabla de eventos obtenidas por un OTDR

4.4.2 Nuevos instrumentos de campo necesarios para probar y supervisar los sistemas DWDM:

Con la DWDM, los ya tradicionales equipos de prueba de pérdida y los OTDR no son capaces de realizar todas las pruebas necesarias para el control de una red. Hoy en día, cada componente y cada red DWDM tiene que ser caracterizada espectralmente (en función de la longitud de onda).

Existen dos instrumentos en el mercado capaces de realizar las pruebas requeridas en el campo para los sistemas DWDM: el analizador de espectro óptico (OSA: Optical Spectrum

Analyzer) y el medidor de potencia multi-longitud de onda (MWM: Multi-Wavelength Meter). Las pruebas que estos instrumentos deben realizar son:

- a. **Potencia por canal:** que debe ser medida en los equipos de transmisión y recepción, y en los amplificadores EDFA.
- b. **Longitud de onda central y espacio entre canales:** para supervisar la estabilidad de los láseres DFB de transmisión
- c. **Tasa señal-ruido (SNR):** Un indicador de la eficiencia del sistema para cada canal de transmisión; una eficiencia que está directamente relacionada con el ruido entre canales.
- d. **Intermodulación o interferencia (Cross talk):** como ya fue mencionado, es el aumento del ruido en una señal causada por las señales adyacentes.
- e. **Potencia total:** Debido a los efectos no lineales en la fibra, la potencia total transmitida está directamente relacionada con el nivel de pérdida introducida por los diferentes fenómenos de la fibra.

Los equipos de pruebas y mediciones de los sistemas de una sola longitud de onda están diseñados para monitorear unos parámetros bien definidos. Por ejemplo, la atenuación óptica ó pérdida de potencia óptica, que siempre será un factor clave en el funcionamiento de los enlaces de fibra óptica, y para estos se han desarrollado juegos portátiles de campo para medir esta pérdida. Los instrumentos con capacidades reflectométricas en el dominio de tiempo óptico han sido desarrollados para localizar elementos defectuosos en un enlace. Conforme la sofisticación de los sistemas creció, llegó a tener importancia la pérdida de retorno óptico, sobre todo en el campo de los servicios de CATV, donde la inestabilidad de la fuente de láser causada por la energía reflejada puede tener efectos serios sobre la calidad de señal. La instrumentación se ha desarrollada para supervisar los parámetros mencionados anteriormente. En los Sistema DWDM todos estos instrumentos siguen siendo importantes pero con características adaptadas a las nuevas necesidades, las cuales son mucho más rigurosas.

En la fibra misma, tanto el ensanchamiento de los pulsos debido a la dispersión cromática como la dispersión por el modo de polarización limitan la capacidad de transmisión, y sus efectos pueden ser severos sobre la integridad de señal de transmisión. Nuevas capacidades

de instrumentación llegan a ser necesarias para identificar las fuentes de estas influencias negativas y asegurar que no afecten desfavorablemente el funcionamiento, dentro de estos equipos sobresale el Analizador de espectro óptico, comúnmente conocido como OSA que pasaremos a describir a continuación.

El analizador de espectro óptico (OSA)

De manera sencilla el mecanismo óptico del OSA dirige la señal estudiada a un elemento dispersivo que desvía cada longitud de onda con un ángulo específico. Los espejos del módulo reflejan cada longitud de onda a una zona concreta en el módulo. Esta zona es estudiada por un detector que se desplaza linealmente (cada posición en X correspondiendo a una longitud de onda específica) midiendo así la potencia de cada canal (ver figura 4.14)

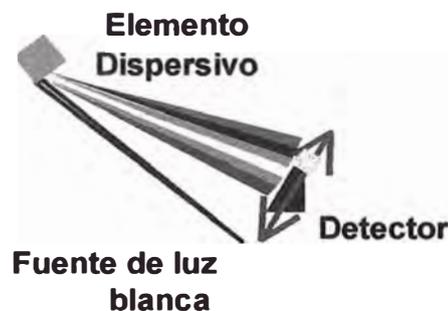


Figura 4.14. Ilustración del mecanismo del OSA

La ventaja del OSA es su diseño basado en el principio de un medidor de potencia, lo que le permite medir la potencia óptica (y todas las características asociadas) con una precisión de hasta 0,5 dB. Por ello, el OSA es el mejor instrumento para medir características como la potencia total transmitida, potencia por canal, SNR, intermodulación (crosstalk) y generación espontánea de señales laterales (Four-Wave Mixing).

Medidor multi-longitud de onda (MWM)

Junto con el OSA, el medidor multi-longitud de onda (MWM: Multi-Wavelength meter) ayuda a medir con precisión la longitud de onda central de cada canal.

Su método de medida, basado en el interferómetro de Michelson, crea un patrón de interferencia propio a la señal transmitida por la fibra que permite medir la longitud de onda de cada canal. Para aumentar la exactitud de la medida, el MWM utiliza un láser de referencia (de longitud de onda conocida) cuyo patrón de interferencia se compara con el

de la señal, para así obtener una precisión de hasta 0,005 nm en las medidas espectrales, (Ver figura 4.15).

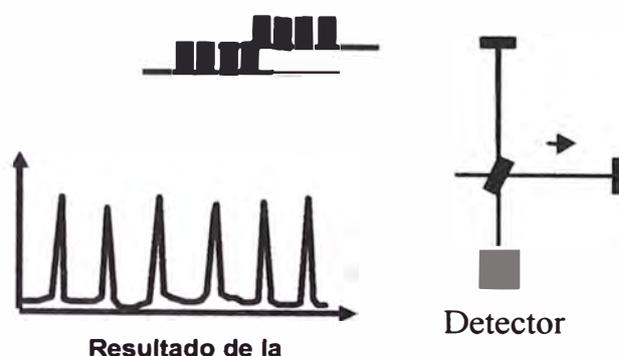


Figura 4.15 Ilustración del mecanismo del MWM

El OSA y del MWM tienen un rol complementario en la caracterización de una red DWDM. El OSA se utiliza para medir con gran precisión las características relacionadas con la potencia. Cuando se trabaja con redes que transmiten un gran número de canales, la precisión de medida de un OSA no es suficiente para caracterizar la longitud de onda central de cada canal; por ello, se hace necesario de utilizar un MWM cuya característica es la precisión espectral. La tabla 4.4 presenta un resumen de las ventajas de cada instrumento.

Tabla 4.4. Características del OSA y del MWM

	Analizador de espectro óptico	Medidor de potencia multi-longitud de onda
Longitud de onda central	Aceptable	Ideal
Potencia por canal	Ideal	Aceptable
Potencia total del sistema	Ideal	Aceptable
Relación señal-ruido	Ideal	Insuficiente
Señales laterales	Ideal	Insuficiente
Variación de la longitud de onda central	Aceptable	Ideal
Amplificación por canal	Ideal	Insuficiente
Respuesta de frecuencia del amplificador	Ideal	Aceptable

4.4.3 Descripción de un OSA

Hoy en día los analizadores de espectros ópticos pueden medir la mayoría de los parámetros de un sistema DWDM. Este instrumento es usado durante la instalación, mantenimiento y reparación.

Un OSA es un equipo que permite dividir la señal de luz en sus longitudes de ondas constituyentes. Esto quiere decir que es posible ver el perfil espectral de una señal sobre un rango de longitudes de onda. Este perfil se muestra gráficamente, con la longitud de onda en la horizontal y la potencia en la vertical, de este modo las múltiples señales combinadas en un fibra con sistema DWDM pueden ser divididas para poderse estudiar. En los Analizadores de campo el método favorito para dividir las señales es el de rejillas de difracción. Por definición una rejilla de difracción (diffraction grating) es un elemento dispersivo que, debido a múltiples líneas finas y paralela sobre su superficie, rompe o difracta una señal de luz en su espectro óptico. Una vez que la señal es difractada, es posible medir la potencia de cualquier longitud de onda dada debido al alineamiento de un detector con una específica longitud de onda. Para medir otra longitud de onda el detector debe de realinearse con otra longitud de onda.

La figura 4.16 muestra un OSA simple usando un detector simple. Hoy los fabricante de OSA tienden a mejorar este diseño básico con nuevos arreglos de rejillas dispersivas múltiples, esquemas de rutas e impresionante métodos de detección de potencia.

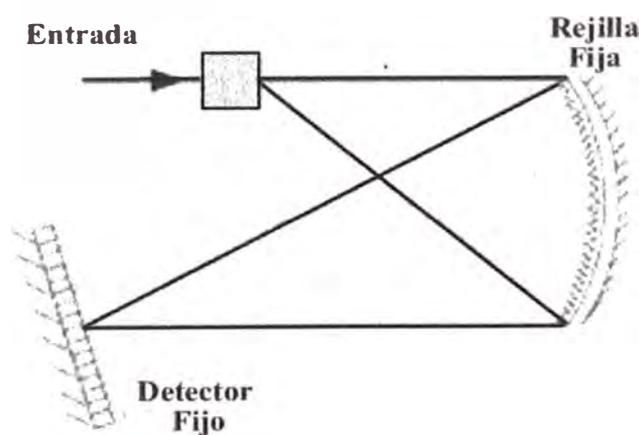


Figura 4.16 Diseño simple de un OSA

Especificaciones Principales de un OSA

Optical rejection ratio (ORR)

Es una de las especificaciones más importantes de un OSA, y es el máximo ratio de señal a ruido óptico que se puede medir a una distancia del pico de la portadora.

La figura 4.17 (a) muestra la traza de dos OSA, el de la parte superior es la traza de un OSA con un pobre ORR y el inferior tiene uno mejor. Cuando muchos canales están cercanos (ejemplo 50 GHz), la importancia de un buen ORR es obvio.

En la figura 4.17 (b), es claro que la limitación del ORR del trazo superior que esconde la mayor parte del detalle de espectro de la señal DWDM

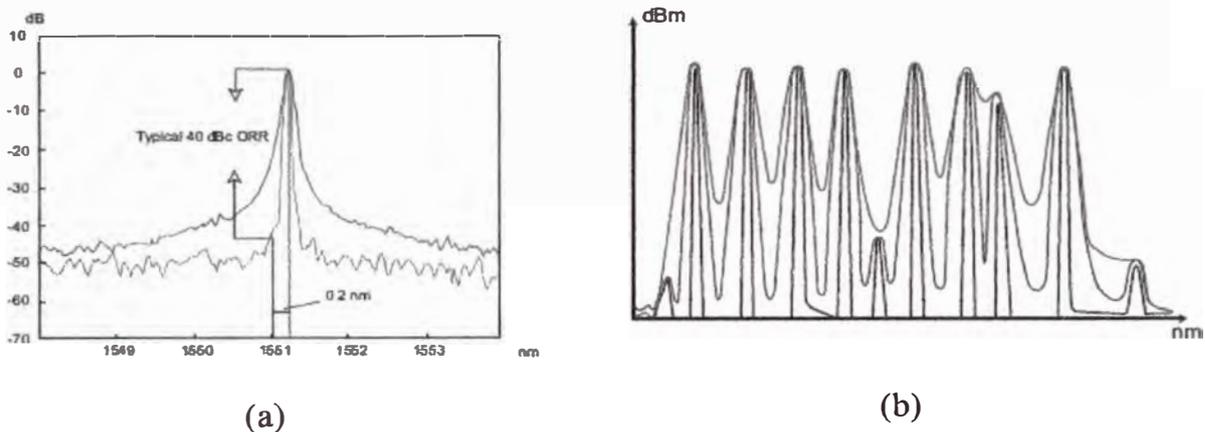


Figura 4.17 El ORR y el Impacto del ORR en la identificación de los sistemas

La principal preocupación del usuario del OSA es tener un claro display del perfil del espectro. Si el OOR del equipo no es mayor al ratio señal a ruido óptico (OSNR), el usuario no podrá obtener una clara característica de la señal.

Rango dinámico

Esta especificación refleja la capacidad del detector óptico del OSA de efectivamente medir todo los diferentes niveles de potencia requeridos por la aplicación WDM. Un instrumento con un gran rango dinámico puede medir con precisión valores de alta potencia y de bajo piso de ruido durante la misma adquisición, dando por resultado una clara imagen del espectro.

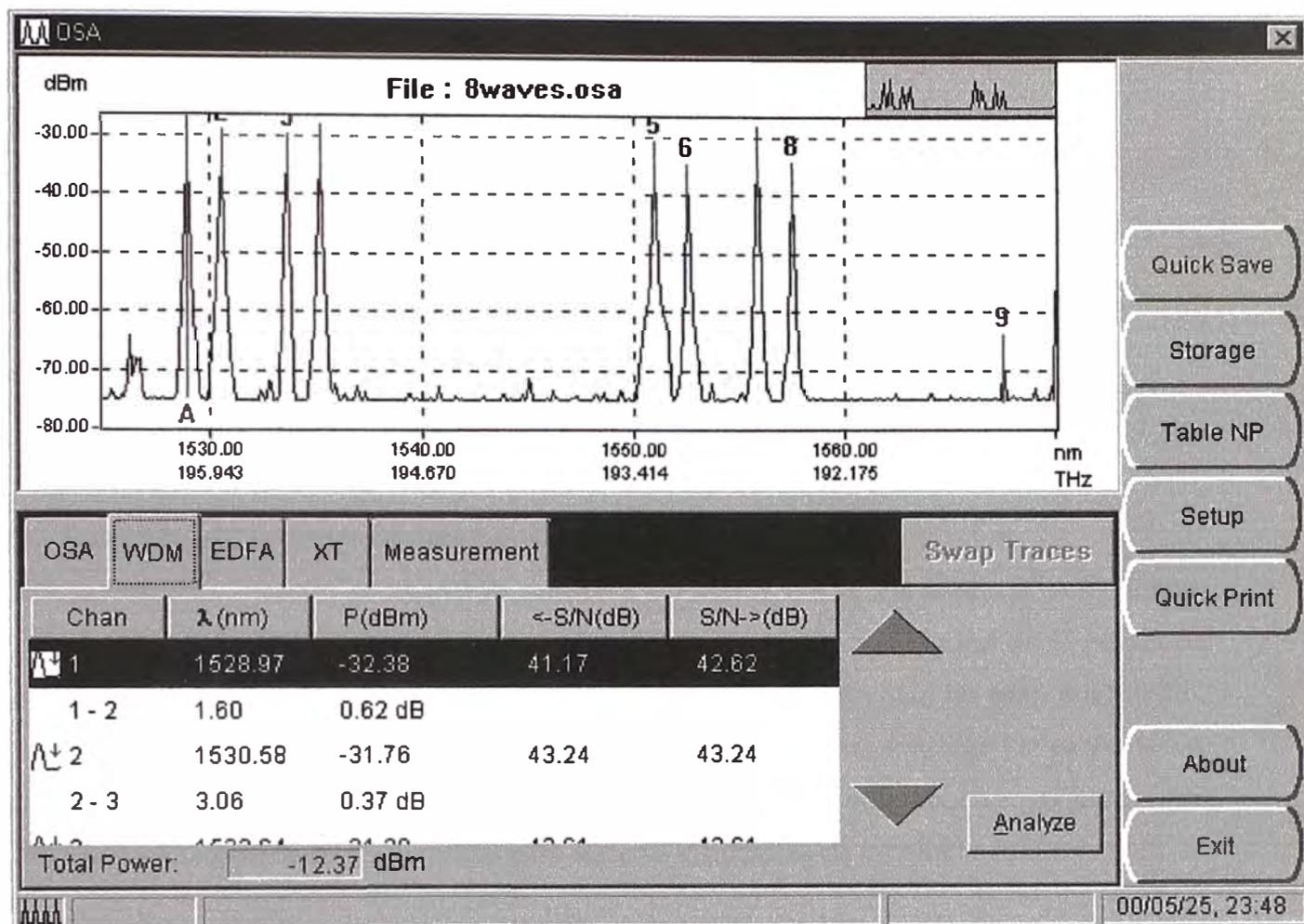


Figura 4.18 Analizador de espectro óptico mostrando una señal de 8 longitudes de onda

CAPITULO V

REDES DE ACCESO

5.1 Las redes de acceso y las redes ópticas pasivas

Los operadores ofrecen actualmente servicios de banda ancha vía DSL, principalmente ADSL. El despliegue de estos sistemas representan una evolución natural de la planta de cobre , pero lo cierto es que estas tecnologías solamente representan un paso intermedio, debido a la limitaciones de transmisión de las líneas de cobre que restringen la gama de los servicios de banda ancha. Un “verdadero” acceso de banda ancha requiere una infraestructura basada en fibra óptica para superar los cuellos de botella.

Con el despliegue del IP y de sus conceptos asociados la idea tradicional de la topología de la red de acceso necesita ser revisada, tanto por el lado de su arquitectura como de sus funciones. La flexibilidad de la red es un aspecto importante, y diferente al pasado, el encaminamiento y/o la conmutación se convertirán en una función más de la red de acceso y habrá nodos activos "inteligentes". Además, las topologías de red, tales como el tipo malla y anillo serán utilizadas en la red de acceso para proporcionar conexiones flexibles y rentables, la fibra es un factor clave que permitirá la evolución de la red de acceso. En resumen, las funciones y las arquitecturas desarrolladas originalmente para las redes Core aparecerán en las redes de acceso de nueva generación. Este proceso será acompañado y apoyado por una reducción de costos.

Esta evolución y cambio significa que las reglas establecidas del diseño y de la ingeniería de red de acceso tienen que ser cambiadas, y nuevos modelos tienen que ser explorados para permitir el despliegue de nuevos conceptos en la red de acceso de la siguiente generación.

5.1.1 Clasificación de las redes de acceso

La Red de acceso la podemos considerar desde dos puntos de vista^[14] (ver figura 2).

- Geográfico, cuando se refiere a toda la infraestructura de comunicaciones que existe entre el domicilio del cliente y la central de conmutación.
- Técnico, cuando se refiere a toda la infraestructura de comunicaciones existente entre el punto de conexión del Terminal de usuario en el domicilio del cliente y el primer equipo que procesa la información en el nivel de red, es decir, en el nivel 3 del modelo de interconexión de sistemas abiertos de la ISO (OSI –Open System Interconnection). Dentro del acceso se tratan, por tanto, los niveles físicos y de enlace (nivel 1 y 2, respectivamente).

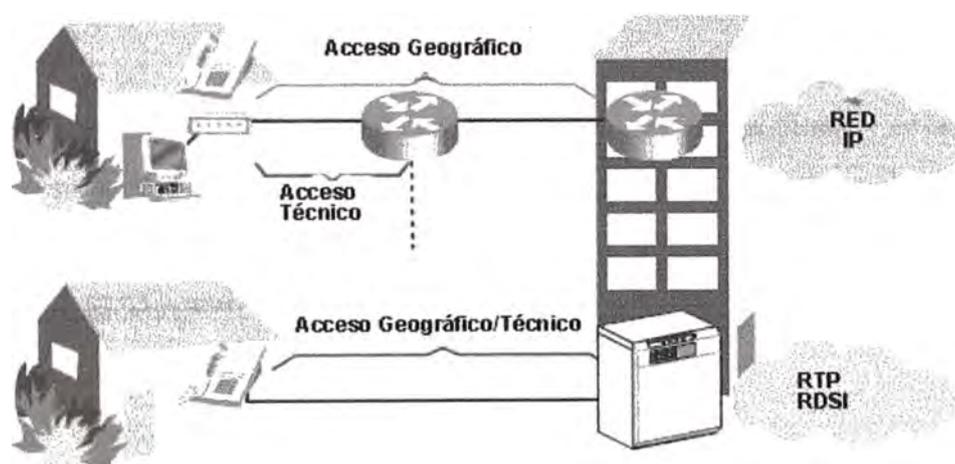


Figura 5.1 Acceso Geográfico Vs. Acceso Técnico

La red de acceso también la podemos distinguir entre tecnología de acceso guiado y tecnología de acceso no guiado.

- El acceso guiado requiere de la presencia de un medio físico de transmisión que soporta en su medio la información entre el usuario y la central, o entre el usuario y el primer punto donde se conecte a la red troncal o backbone. Como ejemplo de este medio físico podemos mencionar los cables de cobre, cable coaxial, el cable de la red eléctrica y los de fibra óptica.

- La tecnología de acceso no guiado emplea como medio de transmisión el aire, por el cual se propagan las ondas electromagnéticas de manera similar a como lo hacen las ondas de radios.

Para el primer caso tenemos dentro de la Banda ancha la tecnología DSL (Línea de Abonado Digital) en todas sus formas simétricas y asimétricas, utiliza la infraestructura de cobre para dar servicios a velocidades de hasta algunos Megabits por segundo; Los sistemas de terminación de módem por cable, emplean el cable coaxial para entregar servicios digitales a muchos usuarios.

Para el segundo caso tenemos la UMTS, que fue concebido para servicios de voz y de datos de tercera generación. El LMDS, los servicios locales de distribución multipunto ofrecen velocidades de banda ancha a usuarios residenciales y a profesionales independientes (SOHO) vía tecnología inalámbrica

A pesar de las enormes diferencias entre estas tecnologías, todas ellas se caracterizan por presentar un aumento de la velocidad de transferencia de datos al usuario final en un orden de magnitud muy superior en comparación con las soluciones de banda estrecha que les precedieron. En consecuencia, todas abren la puerta a un conjunto amplio de nuevos servicios

. La Figura 5.2 muestra algunas de las tecnologías e implementaciones que caen en las categorías anteriores

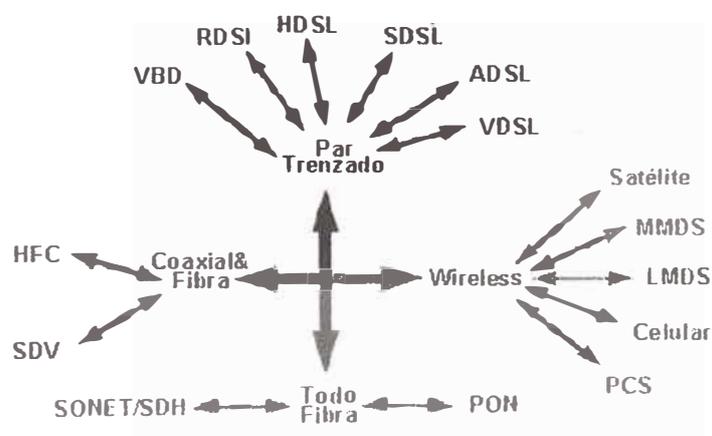


Figura 5.2. Alternativas de Acceso

5.1.2 Las redes de acceso basadas en cable y fibra óptica

Hasta mediados de la década de los 90 había una diferencia clara entre las redes basadas en fibra óptica y las basadas en cable. En las primeras, el operador tradicional de telefonía tenía la posibilidad de tender una infraestructura de fibra óptica entre el edificio de la central y un punto próximo a los terminales de los usuarios, donde instalaba un equipo Terminal. El Terminal realizaba la conversión opto-electrónica y se conectaba con los terminales de los usuarios a través de la acometida convencional de cobre. En las segundas, los operadores de cable, de manera diferente de los operadores tradicionales de telefonía, distribuían canales de televisión a través de un tendido de cable coaxial. Sin embargo, mientras los operadores de telefonía apenas desplegaban fibra en el acceso, debido al elevado costo de los equipos terminales, los de cable disponían ya de una verdadera red de banda ancha, aunque limitada a servicios de difusión de televisión,

En la figura 5-3 se puede ver un esquema de las redes tradicionales de cable. Desde una cabecera se alimentaba un conjunto de canales de televisión a diferentes cables coaxiales. A lo largo de los cables se iban colocando amplificadores, que compensaban las pérdidas de transmisión, y derivadores, que llevaban las señales primero a barrios diferentes, luego a manzanas de casas y finalmente a hogares individuales.

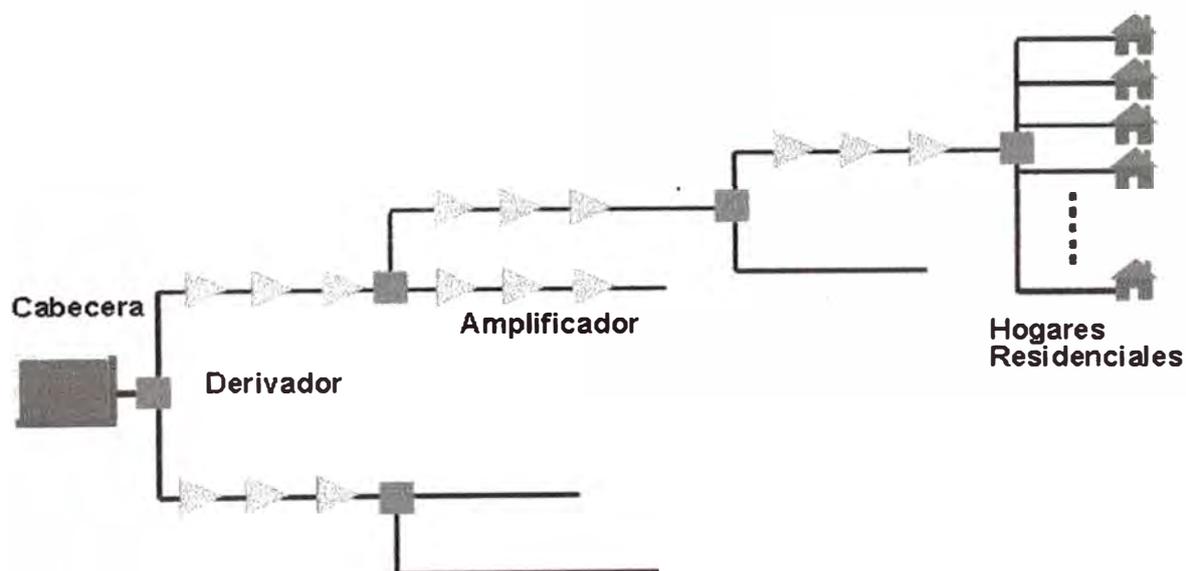


Figura 5.3 Esquema de una red Tradicional para la difusión de señal de CATV

A partir de 1990, los operadores de cable comenzaron a mejorar la calidad de transmisión y a aumentar la capacidad de sus redes mediante la sustitución de tendidos enteros de coaxial, junto con sus amplificadores, por enlaces de fibra óptica. La sustitución fue gradual en sus comienzos y generalizada al final, de forma que en la actualidad únicamente es coaxial la acometida. Por este motivo, y a pesar de sus orígenes diferentes, las redes de acceso de cable y fibra son similares.

5.1.3 Definición de las redes de acceso de fibra óptica

Como marco de referencia la figura 5-4 se muestra lo que se entiende por red de acceso de fibra: un conjunto de equipos e instalaciones que conectan los elementos terminales de la red de transporte con los terminales de los usuarios. Se distinguen las partes siguientes: Terminal de Línea (TLO), Red de distribución de fibra óptica, Terminal de red óptica (TRO) y acometida.

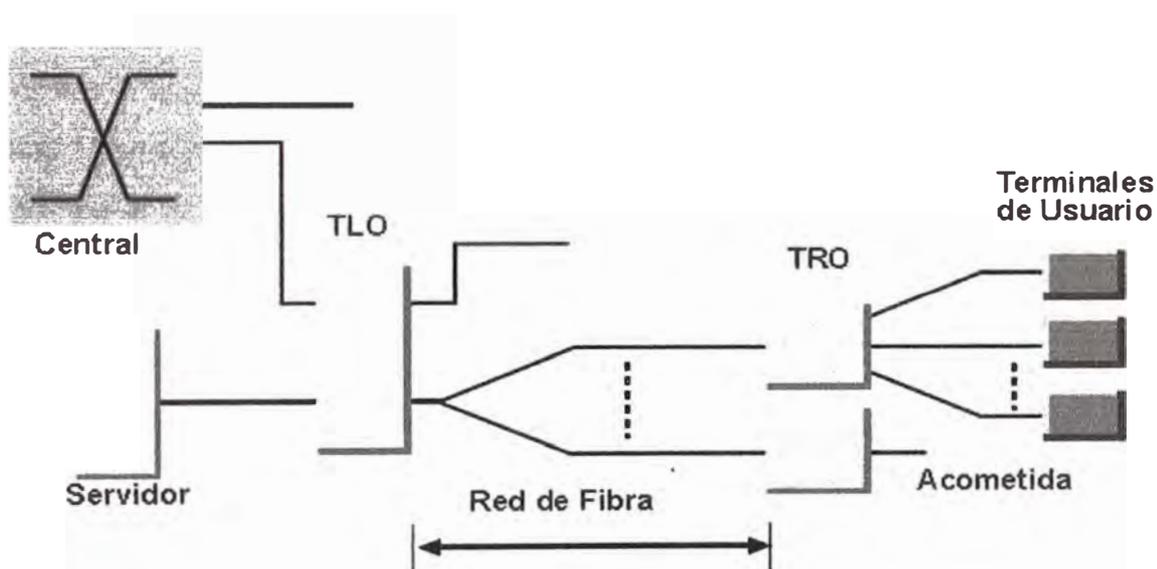


Figura 5.4 Red de Acceso de Fibra Óptica

En las redes tradicionales de telefonía, la frontera entre la red de transporte y la de acceso esta constituida por las centrales de conmutación local. En la actualidad, esta frontera se ha ampliado e incluye también otros tipos de conmutadores: conmutador ATM, Routers IP y servidores locales. Esto es cualquier tipo de concentrador que agrega el tráfico de los clientes finales y lo entrega a al red de transporte.

El terminal de línea es un equipo de transmisión que adapta la interfaz de los conmutadores o servidores al medio portador de la red de acceso. Suele estar instalado con estos últimos en el mismo edificio, el edificio de la central, e incluso en la misma sala. Como ejemplo, es el caso de la transmisión mediante ADSL el Terminal de línea es un módem, mientras que en el de telefonía convencional el Terminal no existe como equipo independiente, al estar su funcionalidad incluida en las tarjetas de línea de la central. La situación es similar en el acceso de fibra: en algunos casos es un equipo separado, mientras que en otros esta incluido en los conmutadores o routers. Es evidente que en las redes que requieren un Terminal de línea como equipo independiente son más caras que aquellas en las que la conmutación local y la transmisión están integradas en un único elemento.

La red de distribución constituye la planta externa propiamente dicha: un conjunto de cables que salen del edificio de la central y se van ramificando hasta llegar a los denominados equipos terminales de red que, normalmente, pero no siempre, constituye el final de la red de fibra. Entre los terminales de red y lo de usuario suele existir un tramo adicional de planta, la acometida, generalmente constituida por cables de pares de cobre o coaxiales, aunque en algunos casos puede ser también de fibra o incluso una interfaz de radio. Dependiendo del lugar donde se instale el Terminal de red, da lugar a una clasificación de las redes de acceso de fibra óptica en función de su punto de terminación

5.1.4 La fibra hasta el punto de terminación.

Tal como se ha descrito anteriormente la red de acceso de fibra no siempre esta constituida únicamente de fibra óptica. Dependiendo del punto donde acabe la fibra óptica, el tipo de red recibe un nombre u otro. Se pueden citar algunos ejemplos que mas adelante serán tratados en detalle:

- Fibra hasta el hogar *Fiber to the home* (FTTH)
- Fibra hasta la acera *Fiber to The Curb* (FTTC)
- Fibra hasta el edificio *Fiber to the Building* (FTTB)
- Fibra hasta al mesa de despacho *Fiber to The Desk* (FTTD)

Par abarcar todas esta situaciones bajo una denominación común se utiliza además otras dos acepciones : *FTTx* que se puede entender como cualquier de las anteriores y la fibra en el acceso, *Fiber In The Loop* (FTTL). Dependiendo de los interlocutores y los escenarios, se emplean unos términos u otros.

5.1.5 Clasificación de las redes de acceso de fibra óptica

Independientemente del nombre que puedan recibir por el lugar donde se encuentra el Terminal de red, las redes de acceso de fibra se clasifican, según los servicios que pueden soportar en:

- Las redes de fibra óptica para Banda Estrecha
- Las redes de fibra óptica para los servicios interactivos de Banda ancha
- Las redes de fibra para los servicios de distribución También conocidas como redes *Híbridas Fibra Coaxial (HFC)*.

Las dos primeras serán tratadas ampliamente en este capítulo.

5.1.6 Las redes ópticas pasiva

PON (Passive optical network) es una tecnología nueva que esta siendo tomada en cuenta por su modo de solucionar los problemas de la última milla, debido a que reduce el número de transmisores ópticos y el despliegue del número de fibras, el componente principal de una PON es el dispositivo divisor óptico (splitter) que, dependiendo de la dirección del haz de luz, divide el haz entrante y lo distribuye hacia múltiples fibras, o los combina en la dirección opuesta dentro de una sola fibra. Una PON es una red punto multipunto, sin elementos activos en la ruta que recorre la señal desde la fuente hasta su destino.

Las ventajas de usar las redes PON son numerosas:

- La PON permite tener mayores distancias entre las oficinas centrales y los usuarios finales. Una PON tranquilamente puede sobrepasar lo 20 Kilómetros, excediendo considerablemente las cobertura máxima del DSL
- Las PON minimizan el despliegue de fibras tanto en el lado de la central como en la planta externa. Solamente se requiere una fibra como troncal y solamente un puerto por cada PON. Esto permite un menor consumo de energía.
- Las PON proveen un gran ancho de banda debido a la penetración de la fibra que puede llegar hasta los hogares (FFTH), hasta los edificios (FTTB), y aún más hasta la misma PC (FTTPC).
- Debido a su característica punto multipunto, las PON permiten a la señal de bajada soportar video broadcast.
- Múltiples longitudes de ondas superpuestas en diferentes canales pueden agregarse a las PON sin modificar las terminaciones electrónicas

- Las PON eliminan la necesidad de instalar multiplexores y demultiplexores. En lugar de estos elementos las PON tienen elementos pasivos que incluso pueden instalarse en la planta subterránea.
- Las PON permiten un fácil upgrade cuando se requiere mayores velocidades o longitudes de onda adicionales.

5.2 Las redes FTTx y su clasificación

5.2.1 ¿Qué es FTTx?

En junio de 1995, un consorcio de más de 20 operadores de telecomunicaciones de todo el mundo acometió el desarrollo de una especificación que definiera un sistema de comunicación capaz de soportar un amplio rango de servicios. Esta iniciativa conocida como FSAN⁶ (Red de Acceso de Servicios Completos ó en Inglés Full service access networks), facilitaría la introducción a larga escala de las redes de acceso de banda ancha, definiendo un conjunto básico de requerimientos comunes. Este modelo de FSAN contiene implícito el despliegue de la Fibra Óptica hasta las proximidades del cliente.

La ITU tomo las especificaciones de la FSAN como recomendaciones. Las especificaciones de FSAN para redes ópticas pasivas basadas en ATM⁷ llevo a ser un estándar internacional en 1998 y ha sido adoptada por la ITU como la recomendación G.983.1

Como resultado de los últimos desarrollos, el interés que ha despertado FTTx ha tenido un crecimiento exponencial, sobretodo en los países desarrollados. Los pequeños negocios y clientes residenciales están demandando una mayor cantidad de ancho de banda y mas servicio. Y con las tecnología maduras en el mercado tales como HDTV, Los juegos en línea, VoIP, etc, hacen que la necesidad de 100 Mbps no sea un lujo, y los diseñadores de red tienen que tener en cuenta estas premisas para el despliegue de las nuevas redes. (Ver Tabla 5.1).

⁶ www.fsanweb.org

⁷ ATM es una tecnología de las redes basado en la transferencia de data en celdas de tamaño fijo

Tabla 5.1 Premisas para el diseño de nuevas redes

Aplicación	Requerimiento
HDTV (3 por hogar a 20 Mbps cada uno) La TV Stándard requiere 4.5 Mbps	60 Mbps
Juego en Línea	2-20 Mbps
VoIP (3 por hogar)	0,3 Mbps
Data/Email etc.	10 Mbps
Total	~ 90 Mbps

La tecnología FTTx ofrece la gran capacidad del ancho de banda de la fibra óptica, así como una gran variedad de servicios a bajo costo debido al número de usuarios finales que pueden compartir el ancho de banda de una sola fibra.

Los nuevos estándares tales como los establecidos por la ITU y la IEEE están facilitando el diseño, capacidad, seguridad y versatilidad de las PON's abriendo la oportunidad para economías de escala y una buena reducción en los costos.

5.2.2 Clasificación de las redes FTTx:[¹⁵]

Dentro de la familia de tecnologías FTTX (Fiber to the X) se agrupan una serie de técnicas de acceso basadas en el empleo de fibra óptica hasta las proximidades del abonado. Los miembros de esta familia se diferencian fundamentalmente en el grado de proximidad alcanzado.

Las tecnologías FTTX se basan, en definitiva, en instalaciones de cable de fibra óptica directo hasta los hogares o edificios (escuela, empresa, oficina, centros tecnológico, etc.). Estas infraestructuras de acceso de alta capacidad, permiten ofrecer a los usuarios servicios de banda ancha tales como video bajo demanda o acceso de alta velocidad a Internet.

Para propósitos prácticos podemos agrupar las redes FTTx en tres clases:

- a) Fibras bidireccionales para clientes residenciales o negocios usando ATM o Ethernet
 - Fibra directa hasta el Hogar FTTH (Fiber to the Home)
 - Fibra hasta el Edificio FTTB (Fiber to the Building).

La diferencia se encuentra en que el primero debe de llegar a un punto terminal óptico ubicado en una casa o departamento mientras el segundo llega a un negocio o edificio multifamiliar.

b) Fibras bidireccionales usando solamente PON.

- Fibra hasta la casa/negocio FTTP (Fiber to the Premises)

c) Redes con uso parcial de fibras :

Redes que usan a la red de cobre desde un punto hasta la casa del cliente:

- Fibra al vecindario FTTN (Fiber to the Neighborhood)
- Fibra hasta el nodo también denominada FTTN (Fiber to the Node)
- Fibra hasta la acera FTTC o también FTTK (Fiber to the curb/ kerb)
- Fibra al gabinete FTTCab (Fiber to the Cabinet)

Fibra parcial significa que la fibra llega hasta un punto cercano al cliente, y desde allí otro mecanismo (usualmente pares de cobre soportando ADSL o VDSL) llega en el último tramo hasta el cliente.

Las dos FTTNs': FTTN al vecindario y FTTN al Nodo , significan básicamente la misma cosa : La fibra es tendida hasta un punto cercano al cliente, típicamente este es un nodo terminal remoto, o a un lugar mas cercano al cliente como una caja crossconet o algo similar. El desarrollo que se esta dando a los FTTN les esta permitiendo tener un nodo que puede manejar 400 o 600 clientes u hogares. Los FTTCab son bastantes similares a los FTTN y los FTTCurb, se refieren a desarrollos de fibra mas cercanos al cliente y usualmente sirven de 8 a 24 clientes alimentados con una línea de bajada de cobre. La figura 5.5 muestra como se diferencian algunas de estas principales variedades de FTTx cuando usan las redes PON.

Cuando en la PON se incluye en una arquitectura FTTH/B, la fibra va desde la CO hasta un dispositivo óptico ubicado dentro de la casa del abonado o negocio. En la arquitectura FTTCab, la fibra va desde la CO hasta el divisor óptico que se ubica en un gabinete en la vecindad ubicado a una distancia de alrededor 300 m del abonado. En la FTTCurb se llega con fibra hasta un gabinete más cercano al abonado, situado alrededor de 20 m de éste.

La PON puede ser común a todas estas arquitecturas. Sin embargo, solo en las configuraciones FTTH/B se eliminan todos los componentes electrónicos activos de la planta exterior, por lo que en ésta PON es más eficiente, al eliminar todos los procesos de procesamiento de señal y codificación.

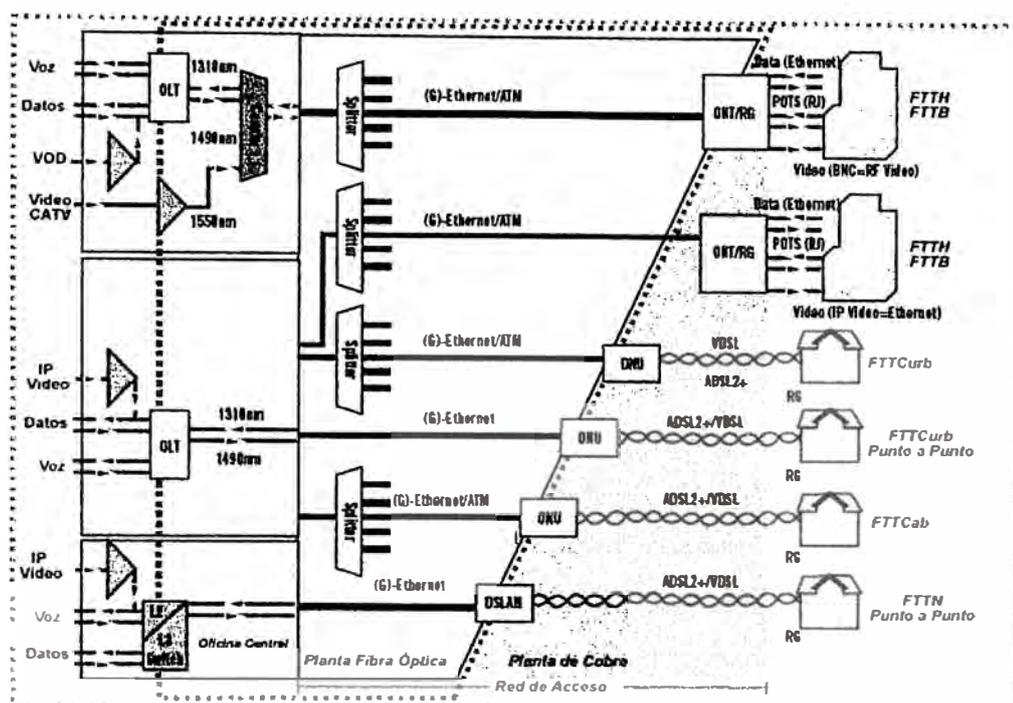


Figura 5.5 Arquitectura de la FTTx.

5.2.3 Conceptos básicos de PON y planta de fibra

Todas las redes del tipo PON (ya sean FTTH ó FTTB ó FTTP) tienen una unidad terminal de línea óptica (OLT), que sirve de interfase con el nodo de servicio que se ubica en la oficina central (CO) perteneciente al carrier y un terminal de red óptica o unidad de red óptica (ONT o ONUs) ubicado para el lado del cliente. En lugar de usar una fibra desde el OLT a cada uno de los clientes, una sola fibra se tiende desde el OLT hacia los clientes y mediante un splitter óptico se alimenta mediante una fibra de acometida a cada uno de los clientes. (ver figura 5.6)

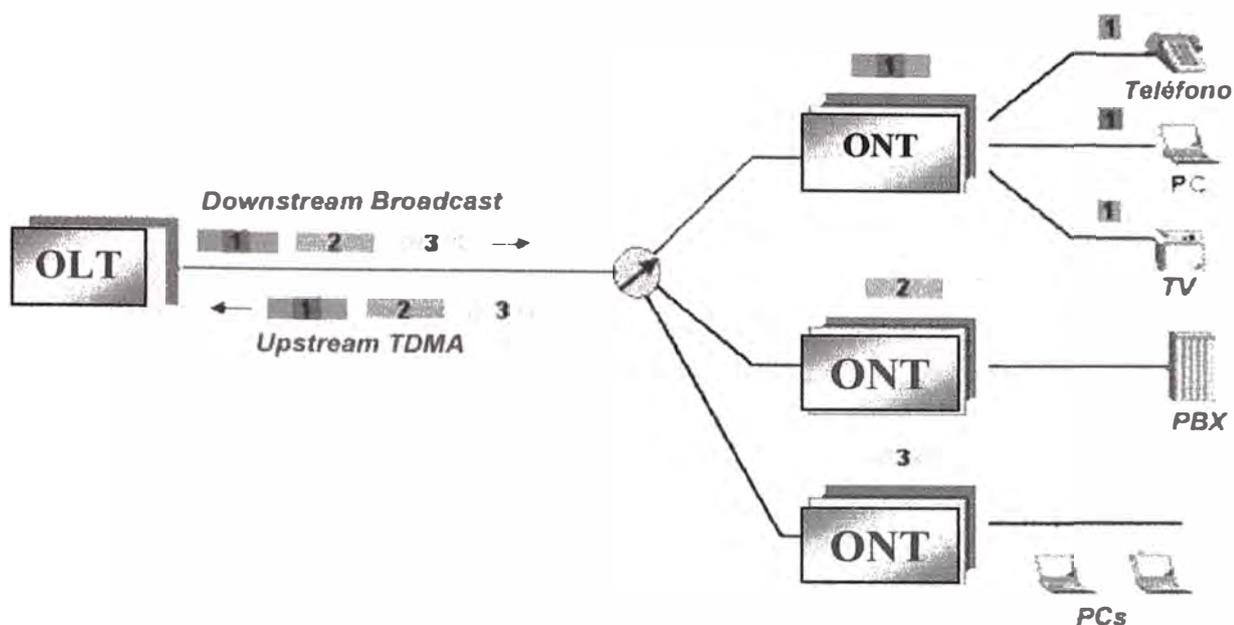


Figura 5.6 : Una Red PON básica

Este tipo de configuración, permite el despliegue de una sola fibra desde la cabecera de red (un solo transreceptor óptico), a partir de la cual se pueden derivar un cierto número de ramificaciones (típicamente hasta 32) para dar servicio a otros tantos abonados. Los elementos básicos de una PON como ya lo hemos mencionado son: el terminal óptico de línea OLT (Optical Line Termination), ubicado en la cabecera de red; los terminales ópticos de red ONT, (Optical Network Termination), situados en las instalaciones del abonado; y la red de distribución óptica ODN, (Optical Distribution Network), compuesta por cables de fibra, divisores pasivos y acopladores.

Las primeras especificaciones para redes ópticas pasivas fueron definidas por el comité FSAN , elaboró el estándar para PONs basado en tecnología ATM, que se ha llegado a conocer como APON (ATM PON). Posteriormente, este mismo organismo, en colaboración con el ITU-T , decidió extender las características de este sistema con objeto de no limitar la oferta de servicios a ATM, dando lugar al estándar BPON (Broadband PON , Recomendación ITU-T G.983.x). Recientemente, dentro de FSAN se ha lanzado una nueva iniciativa para la especificación de un estándar para PONs a velocidades superiores a 1 Gbit/s, denominado GPON (Gigabit PON, Recomendación ITU-T G.984.x).

También es bueno señalar las tareas que ha desarrollado el grupo de trabajo EFM (Ethernet in the First Mile) del IEEE, donde se está trabajando en la definición de una PON

basada en tecnología Ethernet, dando lugar al término EPON (Ethernet PON, Recomendación IEEE802.3ah-2004).

En la tabla 5.2 se muestra las diferencias tecnológicas principales entre las diferentes PON

Tabla 5.2: Comparación de PON's

	GPON	EPON	IEEE EPON
Velocidad (Mbit/s)	descend : 1244, 622, 155 ascen : 622,155	descend : 2488, 1244 ascen : 2488, 1244, 622, 155	descend : 1250 ascend : 1250
Codificación de Línea	NRZ (+ aleatorización)	NRZ(+aleatorización)	8b/10b
División mínima	32	64	16
División máxima	64	128	16
Alcance lógico máximo soportado	20 Km	60 Km	10 Km, 20 Km.
Protocolos de capa 2	ATM	Ethernet TDM sobre GEM (GPONencapsulation Mode), ATM	Ethernet
Documentos Standard	ITU G.983	ITU-T G.984	IEEE 802.3ah
Soporte TDM	TDM sobre ATM	TDM nativo, TDM sobre ATM, TDM sobre paquete	TDM sobre paquete

5.3 Diseño de las redes e Ingeniería⁸

La figura 5.7 muestra la arquitectura general de las redes FTTx. En la oficina Central (CO), a la cual también se le puede denominar Headend, la red pública de telefonía conmutada (PSTN) y los servicios de Internet, mediante interfaces se une con la red de distribución óptica (ODN) en el punto de terminación de línea óptica (OLT). Se usa una longitud de onda de 1490 nm. para la señal de bajada y 1310 para la señal de subida para la transmisión de voz y datos. Las señales de Video se convierten a formato óptico de longitudes de onda de 1550 nm. en el transmisor de video óptico. Las señales de 1550 nm. y 1490 nm. son combinadas por un acoplador WDM y transmitidos en la ruta de bajada de manera conjunta. Hasta la fecha aún no existen planes para la transmisión del video en la ruta de subida [16]. Las redes de longitudes de onda (1310nm, 1490 nm. y 1550 nm.) transportan diferente información de manera simultánea y en diferentes direcciones sobre la misma fibra.

⁸ La ITU ha dado la recomendación G.983.3 para proponer un sistema de acceso óptico, estas recomendaciones son tomadas en cuenta como base del presente estudio. Muchas fabricantes han aceptado la ITU G983.3

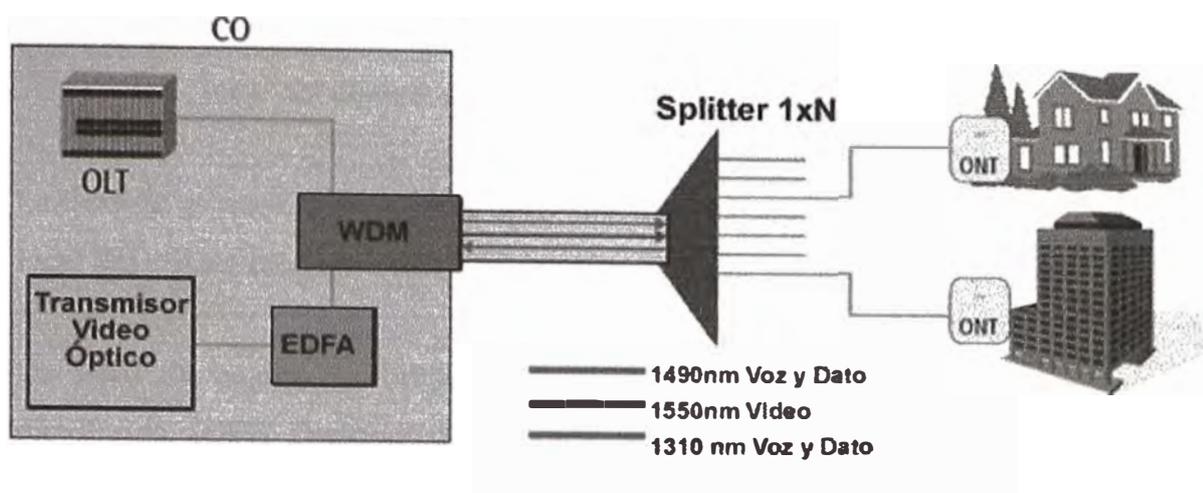


Figura 5.7 Arquitectura general de una FTTx

El cable alimentador transporta la señal entre la OC. y el Splitter, lo que permite que un buen número de ONT's se conecten a la misma fibra alimentadora. Se requiere una ONT para cada abonado, el cual provee conexiones para cada tipo de servicio (POTS, Ethernet, y video).

Desde que las redes FTTx típicas proveen servicios hasta 32 abonados, se requieren muchas de estas configuraciones para poder atender una zona de la ciudad.

5.3.1 Los elementos activos

A pesar que las redes PON en su gran parte esta integrada por elementos pasivos, estas requieren de los siguientes elementos activos:

En la oficina central :

- EL OLT es un equipo digital de voz y datos que usa transmisores láser, uno de 1490 nm para P2MP y otro de 1310 nm, para P2P, así como un receptor de 1310 nm..
- Los equipos de video análogo que usan un transmisor láser de 1550 nm.
- Un amplificador dopado con Erblio (EDFA) usado para amplificar las señales de video antes de transmitirlo a través del acoplador WDM.

En el local del cliente:

- EL ONU u ONT, que requiere de una fuente de alimentación, un transmisor láser de 1310 nm, un receptor de 1490 nm para P2PM , un receptor de 1310 nm para P2P y un receptor de 1550 nm para señal de video.

- Baterías de backup, que pueden ser instaladas en el interior o exterior del local del cliente; pueden estar bajo la responsabilidad del cliente.

La fibra de acometida es llevada al ONT y los servicios son transportados al interior del local del cliente mediante un cable de cobre

La señal de bajada de 1490 nm es transmitida usando un láser de retroalimentación distribuido (DFB Distributed Feedback Bragg). La señal de subida de 1310 nm es transmitida usando la modulación directa no refrigerada de un láser Fabry-Perot.

Los servicios de vídeo son convertidos al formato óptico con una longitud de onda de 1550-nm por el transmisor óptico de vídeo usando un láser estabilizado de frecuencia DFB. Actualmente, no hay ninguno proyecto para la transmisión de video de subida, aunque existan estudios en la ITU-T (una enmienda a la Recomendación G.983.2 incluye una provisión para una ruta de subida de video, que podría ser considerada para la transmisión del video digital IP).

La figura 5.8 muestra el espectro típico de los láseres DFB y Fabry-Perot. Los láser DFB son láser de un único modo longitudinal (SLM) con un ancho espectral mínimo lo que lo hace recomendable para el uso de la transmisión de señal de bajada a altas velocidades de bits, y para un alto nivel de potencia de la señal analógica de video. Los láser Fabry Perot, son de bajo costo pero transmiten sobre un gran ancho espectral. Debido a que el Fabry Perot es de modo multilongitudinal (MLM), su espectro no es monofrecuencia y esta formado por multilíneas periódicas.

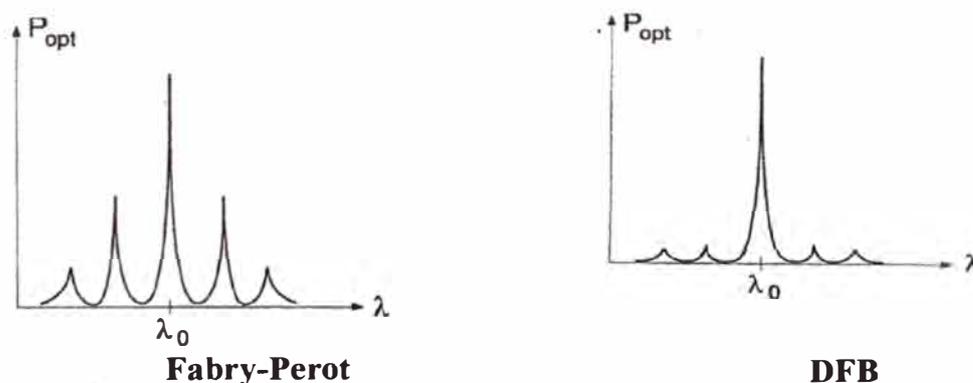


Figura 5.8 Espectro de las longitudes de Ondas de los láser usados en FTTH PON

5.3.2 Componentes pasivos ópticos

Los principales componentes Pasivos Ópticos en una PON son:

- Acoplador 1x2 WWDM⁹
- Splitter 1xN
- Cables de fibra óptica (alimentadores, distribuidores y acometida)
- Conectores y jumper ópticos.
- Sistemas de administración de fibra/ cajas de empalmes

Los dos componentes críticos son el acoplador y el splitter:

a) El acoplador 1x2 WWDM, usado en una P2MP PON es bidireccional y típicamente tiene una pérdida de inserción de 0.7 a 1.0 dB. Este componente es usado en un ambiente controlado dentro la CO y en un ambiente no controlado dentro del ONU.

En la CO, el acoplador tiene una potencia alta de entrada a 1550 nm (después del EDFA se puede tener hasta +21 dB en la entrada).

La función del acoplador WWDM es el siguiente :

- Acoplar la señal de alta potencia de vídeo con la señal de voz/datos del OLT para la transmisión de bajada en la CO.
 - 1550 nm y 1310 nm en P2P sobre una de las dos fibras.
 - 1550 nm y 1310 nm/1490 nm en P2MP sobre una sola fibra
- Acoplar las señales de video con las señales de voz en el ONT
 - 1550 nm y 1310 en P2P sobre la misma fibra.
 - 1550 nm y 1310nm/1490nm en P2MP.
- Acoplar la señal Voz/dato para la transmisión de subida y bajada
- No necesario en P2P
- 1310 nm y 1490 nm en P2PM
- Transmitir las señales de subida de voz/dato hacia el receptor en el OLT.

b) El Splitter: Es el elemento divisor óptico usado en las PON, el mismo tiene una sola entrada y múltiples puertos de salida. La señal de entrada óptica es dividida en una cantidad de puertos de salida, permitiendo que múltiples usuarios compartan una sola fibra y en consecuencia compartan una banda. En la dirección de subida, las señales ópticas son combinadas desde un número determinados de ONT's a una sola fibra.

⁹ Wave wavelength-division multiplexing

Los Splitter son elementos pasivos ya que no requieren ninguna fuente de energía externa, mas que la señal óptica de entrada. Son independientes de la longitud de onda y solamente incorporan una atenuación debido al hecho que divide la potencia de entrada. Esta pérdida usualmente llamado radio de acoplamiento, es usualmente expresado en db y depende del número de puertos de salida, tal como se muestra en la tabla 5.3. Tener en cuenta que contrario a lo que se podría esperar, el splitter agrega aproximadamente la misma pérdida para señales viajando en distinta direcciones.

Tabla 5.3 Atenuación de Splitter

Número de Puertos	Pérdida en dB
2	3
4	6
8	9
16	12
32	15
64	18

5.4 Descripción del equipamiento de la planta externa.

5.4.1. Los elementos de planta externa

Descripción

El equipamiento de la Planta Externa consiste de equipos y componentes localizados entre la central y la casa del cliente. Esto incluye tanto los componentes ópticos y no ópticos en la red. Los componentes ópticos conforman le red de distribución óptica (ODN – optical distribución network) que incluye a los cables de fibra óptica, empalmes, conectores, splitters, atenuadores, y terminales. Los componentes no ópticos incluyen pedestales, cajas de empalmes, pacht panel, y otros misceláneos (ver figura 5.9)

El equipamiento de la Planta Externa incluye lo siguiente:

- La unidad de distribución de fibra ó Pach Panel.
- Los cables de fibra óptica; conformado por los cables alimentadores que van desde el segmento que va de la CO al primer splitter. Los cables de distribución que unen el splitter al terminal de acometida, y la fibra de acometida que conecta el ONT individual al terminal del cliente.

Nota: Debido al backscattering, los cables de fibra óptica se ven atenuados de manera proporcional a su longitud.

- El Centro ó Hub de distribución de fibra (FDH) incluye :

- Cabinas, pedestales, cajas de empalmes (aéreas y subterráneas).
- Splitters, patch panel y
- Elementos de administración de fibra
- Terminales de acometida
- Conectores SC/APC (con 8 grados de corte para evitar la reflexión y con una pérdida típica de 0.5 dB).

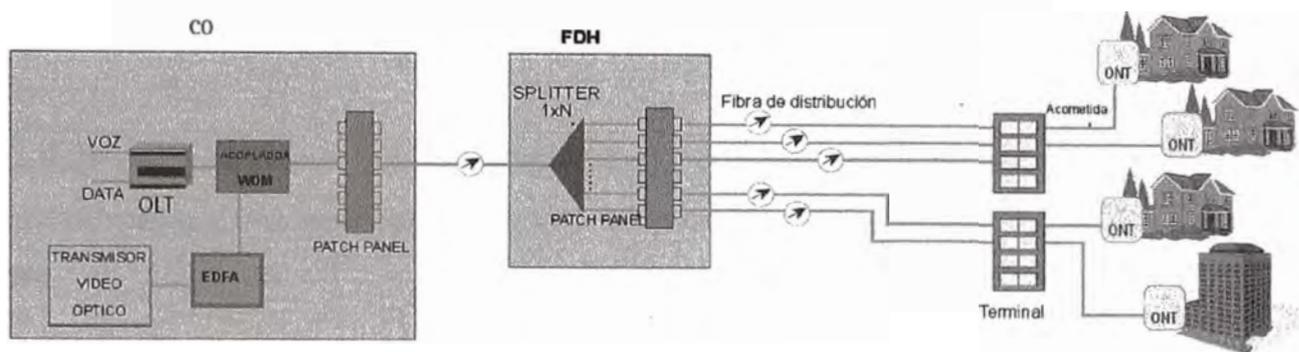


Figura 5.9 Equipos en la Planta Externa

5.5 Pruebas y test sobre la capa física

5.5.1 La capa física

El propósito de cualquier red de fibra óptica es transmitir señales de alta velocidad libre de errores. Realizar una adecuada prueba durante la instalación de una red minimizará los costos y el tiempo perdido en averías debido a empalmes mal realizados o conectores dañados u otra falla de otros componentes que produzcan pérdidas de las comunicaciones.

Uno de los factores más importantes para asegurar una apropiada transmisión es controlar las pérdidas en la red. Esto es realizado estableciendo un tramo de pérdida punto a punto con suficiente margen. Además la reflexión debe de ser reducida al mínimo; esto es particularmente cierto para señales de video análogas de alta potencia debido a que las altas reflexiones pueden dañar los equipos de transmisiones. Finalmente, algunas otras características críticas tales como la dispersión cromática, Dispersión por el modo de polarización PMD¹⁰ y los efectos no lineales (NLE)¹¹ deben de ser tomados en cuenta cuando sean aplicables.

¹⁰ La dispersión cromática para velocidades bajas no es un problema gravitante (< 1.25 Gb/s). La PMD es una característica importante en tramos largos y transmisiones de elevadas velocidades. Los efectos no lineales se hacen sentir sobretodo en transmisiones de video de señal análoga y de alta potencia.

5.5.2 La verificación de la pérdida óptica de retorno (ORL)

Algunos autores lo denomina pérdida de reflexión del sistema esta definido por el ratio entre la potencia incidente sobre la potencia reflejada, y es medido a la entrada del equipo bajo prueba, el cual puede ser una sección de cable, un enlace, ó cualquier otro componente, el ORL es medido en dB y es un número positivo. A un mayor valor del ORL, el sistema tendrá una mejor performance

$$ORL(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{Potencia \text{ Incidente}}{Potencia \text{ _reflejada}} \right)$$

La Reflectancia, por otro lado, es un valor negativo y esta definido como una medida de la reflexión de una interfase simple o evento, tal como una transición de una fibra (vidrio) al aire.

$$reflectancia[dB] = 10 \log_{10} \left[\frac{Potencia \text{ _reflejada _desde _una _Interfase _especifica}}{Potencia \text{ Incidente}} \right]$$

El ORL de un enlace es obtenido de la retrodispersión de Rayleigh del núcleo de la fibra y la reflectancia de todas las interfases encontradas a lo largo del enlace. El ORL puede ser un problema en las señales DWDM y para los sistemas de transmisión de alta velocidad tales como el STM-16/OC-48 y STM-64/OC-192, pero es particularmente crítica para las transmisiones análogas tales como las señales de video de 1550 nm usados en las FFTH PON. Mientras la retrodispersión de Rayleigh es intrínseco a la fibra y no puede ser completamente eliminada, la reflectancia es causada por los diferentes elementos de la red (principalmente conectores) con interfases aire/vidrio ó vidrio/vidrio (con diferentes índices de refracción) y puede siempre ser mejorado mediante un cuidado especial o un mejor diseño. Para optimizar la transmisión, los efectos de de las señales reflejadas (ejemplo, las interferencias de señales de fuente de luz o inestabilidad de la potencia de salida) deben de tenerse bajo control. De aquí, nuestra atención debe de enfocarse a asegurar la calidad de las redes de conexión a través una medición de alta precisión de los ORL. Las recomendaciones de la ITU-T G.983 y G.984 permiten ORL mínimo por enlace de 32 dB y la IEEE 802.3ah permite entre 15 a 20 dB.

Los principales efectos del ORL son los siguientes:

¹¹ Los NLE son características de las señales análogas de alta potencia originadas por la transmisión de video

- Baja transmisión de la luz, debido a fuertes fluctuaciones en la potencia de salida del láser
- Interferencia en el receptor.
- Bajo ratio portadora a ruido (CNR) en señales análogas, que ocasionan distorsiones en las señales de video
- Un alto BER en los sistemas digitales
- Permanente riesgo de dañar el láser

La figura 5.10 muestra los valores típicos de ORL para los diferentes tipos de conectores:

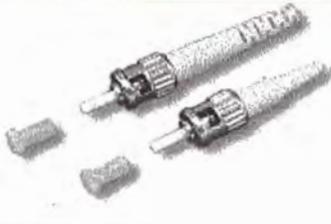
Un adecuado test de las pérdidas y la reflexión es importante para asegurar que en la transmisión de cada longitud de onda:

- Las pérdidas punto a punto y la Reflexión cumplan con las especificaciones.
- Para ubicar los tramos con observaciones y aquellos que excedan los requerimientos.

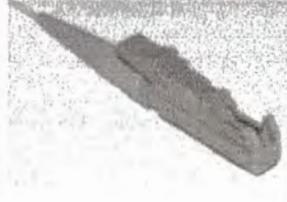
Estas pruebas son críticas, especialmente cuando las redes poseen cables antiguos, debido a que las fibras diseñadas para ser usadas con 1550 nm. Por ejemplo no han sido previamente calificadas para ser usadas con 1490 nm y pueden mostrar una atenuación más alta que la esperada.

Nota : La relación entre la potencia de salida a la potencia de entrada de cualquier componente es conocida como Atenuación, y tiene un valor positivo menor a uno. Este parámetro es usado para caracterizar la pérdida de potencia de una fibra óptica. Cuando un elemento es insertado en una red, la atenuación de este es denominado pérdida de inserción (IL) y tiene un valor negativo. Este parámetro es típicamente usado en la industria para caracterizar la pérdida de potencia de un componente óptico. Ambos parámetros típicamente se reportan en unidades de dB.

Es importante que todos los conectores sean apropiadamente limpiados e inspeccionados debido al nivel de potencia que soportan. Una fibra monomodo es de núcleo pequeño, típicamente de 9 a 10 μm de diámetro, una partícula pequeña de polvo o humo puede bloquear de manera sustancial el área de transmisión e incrementar la atenuación. Cuando se realiza conexiones se deben de tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

CONECTORES SIMPLES			
			
NOMBRE	FC	ST	SC
Típico IL (No APC) en Db	0.2	0.4	0.2
ORL típico en dB	65 (APC) 50(UPC)	50	65 (APC) 50 (UPC)
Tipo de Pulido	SPC/UPC/APC	SPC/UPC	SPC/UPC/APC

(a)

CONECTORES SIMPLES				
				
NOMBRE	E2000	D4	SMA	BICONIC
Típico IL No APC en dB	0.2	0.2	0.25	0.3
ORL típico en dB		45	30	30
Tipo Pulido	SPC/UPC/APC	SPC/UPC	FLAT	FLAT

(b)

Figura 5.10 a,b.- Valores de pérdidas de inserción (IL) y de retorno óptico (ORL) para varios tipos de conectores

SPC : Super Physical contact/Super polished connector

UPC : Ultra Physical contact/ultra-polished connector

APC : Angled Physical contact/angle polished connector

- No se debe permitir nunca que los conectores toquen alguna superficie y el ferrule del conector no debe ser tocado, salvo para ser limpiados.
- Cada conector debe de ser limpiado e inspeccionado usando un fiberscope ó mejor aún, usando un videoscope después de ser limpiado o antes de realizar las conexiones. Los conectores de los equipos de mediciones también deben de ser limpiados e inspeccionados, en la figura 5.11 mostramos como ejemplo un Videoscope.
- El personal técnico debe de tener un apropiado método de limpieza así como tener los accesorios apropiados a ser usado. Los principales accesorios de limpieza esta formado por los siguientes elementos:

Aire comprimido seco

Cassette de limpieza de conectores

Alcohol isopropílico

Toallitas preparadas y de calidad

En la figura 5.12 se muestra un Kit básico de limpieza

Los puertos de los conectores no usados deben de ser convenientemente cubiertos y deben de colocarse en un estuche plástico.

Cuando se use conectores angulares (APC), debe tenerse especial cuidado cuando se efectuó la limpieza y las conexiones. Un conector APC nunca debe conectarse a otro conector del tipo PC ó UPC.

Recomendaciones de seguridad

- Nunca debe de mirarse directamente sobre fibra vivas sin protegerse la vista. Durante el proceso de inspección debe de usarse siempre protección para la vista.
- Debe de seguirse con cuidado todo el proceso de prueba y las instrucciones de seguridad descrita en la guía proporcionada por los fabricantes de los equipos.
- Antes de usar un Fiberscope, se debe de estar absolutamente seguro que la fuente de luz este en OFF.
- De ser posible debe de usarse un videoscope para inspeccionar las terminaciones de las fibras y conectores.

- Nunca mire directamente a la fibra, aperturas de equipos o conectores, al menos que se este completamente seguro que la fuente de luz este en off.
- Nunca coloque en ON un equipo que use láser o transmisor láser hasta que se este completamente seguro que todo el trabajo ha sido completamente culminado.

La capa física se prueba en sus tres fases:

- a) Durante la Instalación.
- b) Durante la activación y Provisión del Servicio
- c) Durante la reparación de averías.

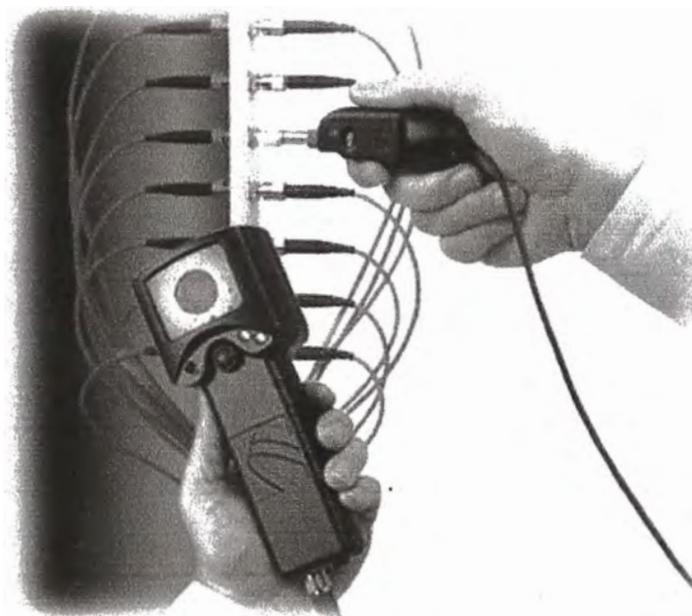


Figura 5.11 La inspección usando un FiberScope, permite inspeccionar terminaciones a través de los adaptadores que están ya instalados en el hardware de los equipos o en el pach panel.



- | | |
|--|--|
| 1. Toallitas de limpieza | 2. Dispensador de Alcohol |
| 3 Spray de aire comprimido seco | 4. Toallitas impregnadas en alcohol isopropílico. |
| 5. Cassette limpiador de conectores | 6. Hisopos |

Figura 5.12 Kit de Limpieza de Conectores

5.5.3 Instalación

Las tres principales pruebas ópticas a desarrollarse durante la instalación de estas redes son:

- Mediciones de la pérdida de retorno óptico de manera bidireccional (ORL)
- Mediciones de pérdida óptica de los elementos de la PON de manera bidireccional.
- Característica bidireccional del enlace punto a punto.

Las pruebas para realizar los tests mencionados requieren de los siguientes equipos de pruebas:

- Un medidor de pruebas de ORL , también conocido como un reflectómetro óptico de onda continua (OCWR, Optical Continouou Wave Reflectometer) ó medidor de reflexión.
- Equipos de prueba de pérdida óptica (OLTS – Optical loss test set) .
- Localizador visual de fallos (VFL), usado para inyectar luz roja brillante en la fibra y permite ubicar los puntos de fallas, malos empalmes, cortes y curvaturas.
- Un Reflectómetro en el dominio del tiempo óptico (OTDR)

- Medidor de potencia de aislamiento de longitud de onda PON, que debe de ser capaz de medir la potencia óptica del Burst de ATM ó del Tráfico de subida de Ethernet desde el ONT.

Idealmente la PON debe de ser medida correctamente después que cada elemento sea instalado

a) Mediciones del ORL y pérdida óptica.

Debido a que la comunicación sobre la fibra es bidireccional, el ORL debe de ser medido en ambas direcciones. Usando un medidor de ORL o un conjunto compatible de pruebas de pérdida óptica (OLTS) a cada lado del enlace, el ORL debe de ser medido primero en un sentido luego en dirección contraria. Los OLTS actuales pueden ser usados para medir tanto el ORL como la pérdida óptica al mismo tiempo.

Cuando se usa OLTS, es importante recordar que el conjunto de prueba requiere una secuencia de dos mediciones, que se realiza en dos pasos:

1. Los OLTs son primero referenciados uno a otro utilizando sus fuentes de luz individuales.
2. Cada OLTS envía un valor de potencia calibrada desde su fuente de luz sobre la sección bajo prueba hacia el otro OLTS, que mide la potencia recibida y calcula la pérdida.

La recomendación ITU G.983.1 y G.984.2 permiten un máximo valor de ORL de 32 dB por enlace

Los medidores de ORL incluye una fuente y un medidor de potencia óptica para medir la potencia reflejada. Algunos OLTS pueden desarrollar esta prueba, haciendo innecesario la utilización de un ORL dedicado. Cada uno puede proveer un ORL total de todos los componentes, de un segmento del sistema. Un setup típico para una prueba integral entre la CO y el Terminal de acometida se muestra en la figura 5.13

La calibración de un medidor de ORL debe de verificarse antes de realizar cualquier prueba, y recalibrarse si fuera necesario.

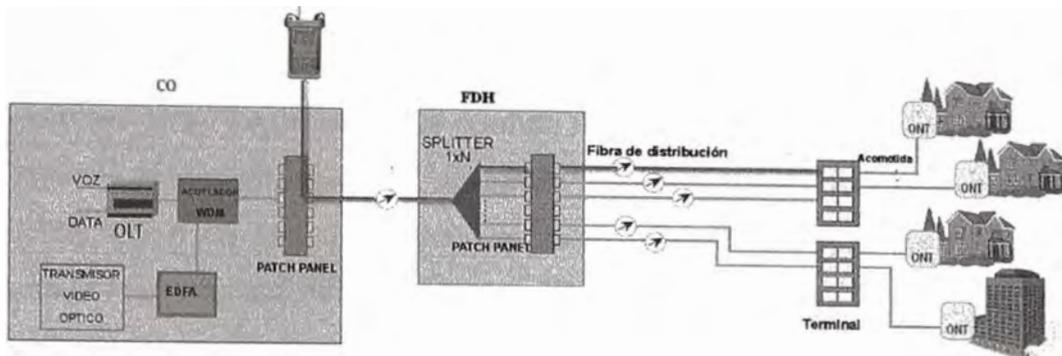


Figura 5.13.a Medición del ORL en un solo sentido desde la C.O. hasta el Terminal de acometida

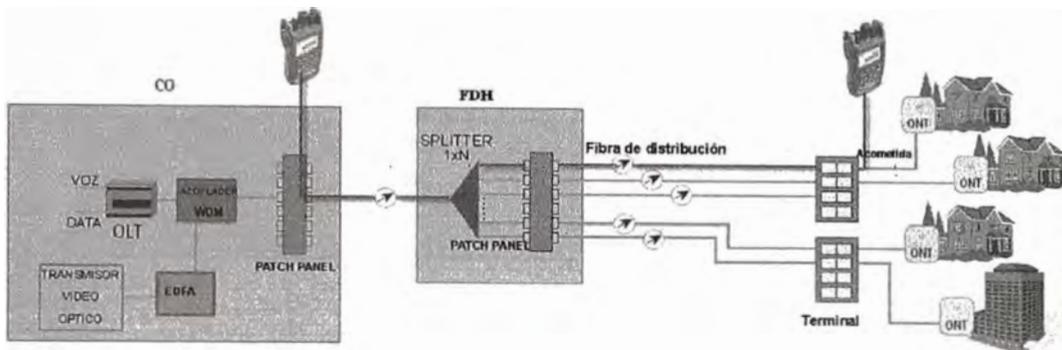


Figura 5.13.b Prueba bidireccional del ORL desde la C.O. hasta el Terminal de acometida

La pérdida óptica es definida como la diferencia entre el nivel de potencia entre la fuente de transmisión y la potencia medida por el medidor de potencia. Las pérdidas de inserción (IL) es la pérdida de energía óptica resultante de la inserción de un componente o mecanismo en la ruta óptica.

La pérdida óptica total del enlace es la suma de los IL de los siguientes elementos:

- Conector del OLT
- Acopladores WDM
- Empalmes.
- Atenuación de fibras.
- Empalmes
- Conectores del ONT
- Cualquier conector malogrado

Cuando se diseña una red, se establece previamente la atenuación. Esto se realiza en detalle con el objetivo que el receptor reciba un nivel de potencia adecuado para tener un nivel libre de errores en la transmisión. La pérdida de un enlace toma en cuenta la potencia de transmisión y la sensibilidad del receptor, así como la pérdida esperada de cada componente óptico en la red. La pérdida de un enlace requerida para las PON, están basadas en la ITU-T Rec G.983, y es mostrada en la tabla 5.4

Tabla 5.4 Pérdidas requeridas por enlace en las redes PON

Especificaciones (dB)	Min/Max	ITU-T		EPON		
		Clase	G.983.1 G.982 G.983.3 BPON	G.984.2 GPON	Clase	IEEE 802.3ah-2004 1000Base-
			PX10	PX20		
ORL del Enlace			32		20/15	
Atenuación Enlace		A	5/20		5/19.5D;20U	
		B	10/25		10/23.5D;24U	
		C	15/30			

Los splitter de la PON causan pérdidas inherentes debido a que la potencia de entrada es dividida en varios puertos de salida. La pérdida de los splitters depende del ratio de split y es aproximadamente 3 dB por un splitter 1x2. La pérdida se incrementa 3 dB cada vez que el número de salida se dobla. Para un splitter 1x32 se tendrá una pérdida por el splitter de al menos 15 a 18 dB.

La figura 5.14 muestra los elementos típicos de una PON, que deben de tomarse en cuenta cuando se determine la pérdida de un enlace. Esta PON tiene seis empalmes entre el OLT y el ONT. La Tabla 5.5 muestra la pérdida del enlace estimada de manera teórica.

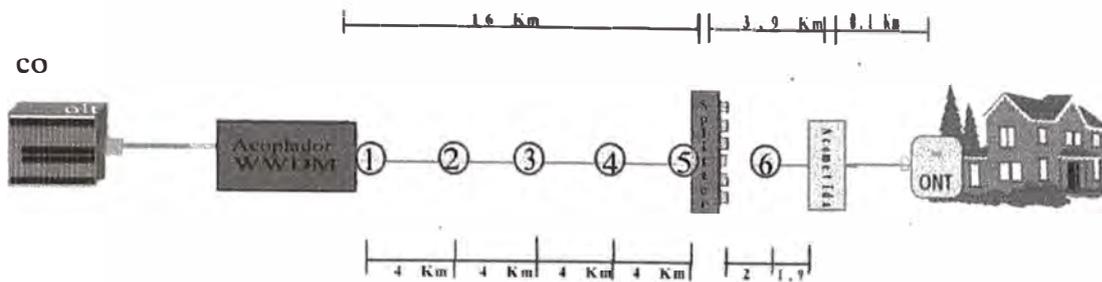


Figura 5.14: Pérdidas de los elementos en un enlace óptico

Tabla 5.5 Pérdida estimada del enlace

Segmento	Pérdida (dB)	Número/ Longitud	Pérdida total (dB)	Pérdida acumulada	Con Mejoras	Nueva pérdida acumulada (dB)
Acoplador 2x1 WWDM	1	1	1	1	0,7	0,7
Fibra G.652.C 1310 nm (el pero caso)	0,39 dB/Km	20	7,8	8,8	0,3/Km=6	6,7
Empalmes	0,05 dB	6	0,3	9,1	0,3	7
Splitter 1x32	18 dB	1 a 16 Km	18	27,1	17	24
Acometida	0,1	1 a 19.6 Km	0,1	27,2	0,1	24,1
Conectores	0,2 dB	2	0,4	27,6 (Clase C)	0,2	24,3 (Clase B)

En el cálculo mostrado del ejemplo, no se toma en cuenta las pérdidas por dispersión o cualquier otro efecto no lineal. Para el caso estudiado la pérdida acumulada será de 27.6 dB y el sistema será de clase C (mínimo 15 dB/ max. 30 dB) con 2.4 dB de margen.

Pueden darse pequeñas mejoras en algunos componentes, los efectos de esta mejora permitirá a la PON ubicarse en un enlace de clase B (mínimo 10 dB/Max 25 dB) con un pequeño margen. La mayor pérdida es causado por la atenuación de la fibra y del splitter en la región de los 1310 nm.

La pérdida puede ser obtenida usando de manera separada una fuente y un medidor de potencia óptica. Un OLTS básico consiste de una fuente y un medidor, mientras los OLTS avanzado consisten de una fuente y un medidor de potencia combinados en una sola

unidad, que es sumamente útil ya que permite realizar pruebas bidireccionales automáticas y análisis de resultados automáticos.

Las siguientes consideraciones son importantes cuando se selecciona un OLTS para aplicaciones PON:

- Pruebas automáticas, reducen los tiempos de prueba y los riesgos del operador.
- Un alto rango dinámico, permite medir componentes de alta atenuación, tales como los splitters) y/o incrementar la distancia de cobertura.
- Tener integrado las facilidades de comunicación bidireccional entre los técnicos, mejora las pruebas de extremo a extremo.
- La capacidad de probar con doble ó triple longitud de onda (1310/1490/1550).

Antes de conectar o realizar el empalme de los cables de fibra, debe de medirse la pérdida óptica de cada sección del cable. Una vez que todas las conexiones son realizadas, la pérdida punto a punto debe de ser medidas entre cada Terminal de acometida y el OLT. La pérdida total no debe de exceder la pérdida teórica calculada del enlace, de otro modo, no se tendrá una transmisión libre de errores.

b) Caracterización del enlace

Durante el proceso de instalación, es importante asegurar que cada elemento se encuentre dentro o no exceda las especificaciones. Esto puede asegurarse usando un OTDR.

A diferencia de un OLTS que caracteriza un lazo completo con dos equipos de medición, un OTDR provee el mapa detallado de todas las pérdidas que se presentan en el enlace, permitiendo a los usuarios localizar y caracterizar cada elemento individual de un enlace, incluyendo conectores, empalmes, splitters, acopladores y fallas.

La operación del OTDR ha sido ampliamente desarrollado en el capítulo 3. Cada evento en el enlace (es decir cada componente óptico o avería), que cause reflexión son graficados en la curva que nos muestra el OTDR.

Las fallas que pueden ser detectadas por el OTDR incluye:

- Desalineamientos de la fibra
- Incompatibilidad de fibras.

- Fallas angulares
- Suciedad de los conectores
- Cortes de fibra
- Macrodobladuras

Las macrodobladuras son eventos indeseables que surgen a causa que las fibras son forzadas a tener curvaturas mayores a un radio mínimo y pueden ser fácilmente detectados por comparación de las pérdidas a 1310, 1490 y 1550 nm. Esto es así debido a que las macrodobladuras presenta mayor pérdida para longitudes de ondas mayores. El OTDR que mejor observar las macrodobladuras es el que posee una longitud de onda de 1625 nm (a mayor longitud de onda , mejor detección de macrodobladuras).

Otra importante consideración en el uso de un OTDR es la zona muerta, Debido a que el detector del OTDR es muy sensitivo, y puede ser saturado por reflexiones fuertes, tal como el del conector de salida del OTDR o por el primer evento en la red, si este evento es particularmente cercano al OTDR. Frecuentemente la zona muerta se ubica en el primer conector (el conector del OTDR). Desde que es imposible medir la pérdida dentro de la zona muerta, las pérdidas debido a los empalmes y conectores cercanos al punto de lanzamiento del OTDR no pueden ser determinado bajo circunstancias normales. Sin embargo, el uso de una caja supresora de pulso entre el OTDR y la fibra bajo prueba puede usarse para evitar este problema, esta caja contiene una longitud de fibra óptica que permite que el primer conector así como los eventos que caen en la zona muerta puedan ser medidos dentro del enlace. Idealmente, la zona muerta del OTDR debe de ser tan corta como sea posible. Algunos OTDR tienen zonas muertas tan cortas como un metro y una zona muerta de atenuación de cuatro metros.

Las pérdidas para el último conector de la fibra bajo prueba, puede ser medido de la misma manera, mediante la conexión del supresor de pulsos en el último conector. El supresor de pulso permite al OTDR comparar el nivel de retrodispersión antes y después del evento y de esta manera calcular la pérdida del conector.

La caracterización del enlace PON usando el OTDR ha creado nuevos requerimientos en los OTDRs tales como:

- Una zona muerta mucho mas corta para detectar el Terminal de acometida cercano al ONT.

- Un rango dinámico para poder atravesar la pérdida del splitter . Se requiere un OTDR optimizado.
- El OTDR deberá de ser capaz de ver a través del splitter, distinguiendo entre la pérdida de splitter (aproximadamente 17.5 dB, para un splitter 1X32, y el extremo de la fibra, para caracterizar el enlace completo.
- Se requiere de una alta resolución para caracterizar los eventos cercanos

Para las pruebas en la PON, los OTDR deben de ser capaces de realizar pruebas en tres longitudes de ondas (1310,1490 y 1550 nm) y si es posible en una cuarta longitud de onda (1625 o 1650 nm) para la detección de macrodobladuras. Sin embargo, una prueba a 1550 nm es considerado adecuado para cubrir la región de de los 1490 nm. Al mismo tiempo es conocido que la atenuación a 1490 nm es aproximadamente 0,02 dB mayor que la de 1550 nm, esto es así para las últimas fibras, especialmente la fibra G.652.C de bajo pico de agua. Sin embargo, esto puede ser cuestionable para las fibra antiguas (primeros años de los 90 y anteriores) cuando la G.652.C no existía y cuando el interés por el pico de agua era mínimo (1383 nm en la banda E). En muchos casos, la amplitud y el ancho del pico de agua era mayor de lo que hoy es común encontrar. Otra razón para probar tanto en los 1490 y los 1550 nm esta basado en la realidad que cada una de esta longitud de onda, transporta diferentes tipos de servicios.

Un nuevo tipo de OTDR optimizado para las PON usa 1650 nm de longitud de onda para el servicio de localización de averías. Este tipo de OTDR tiene un puerto dedicado para probar a 1650 nm y usar un filtro para rechazar todas las señales no deseadas (1310 nm y 1490 nm y 1550 nm) que pueden contaminar la medición del OTDR. Solamente la señal de OTDR de 1650 nm le es permitido pasar a través del filtro, generando una medición precisa del OTDR. Este tipo de OTDR no interfiere con los láser transmisores porque la longitud de onda de 1650 nm es compatible con la recomendación ITU-T L41 (El mantenimiento de longitudes de onda de fibras que transportan señales). Esta recomendación sugiere uno 100 nm de diferencia entre la longitud de onda usado por el OTDR en el servicio del mantenimiento y la longitud de transmisión mas cercana.(1550 nm). Para pruebas en fibra largas o componentes de altas perdidas, un rango dinámico elevado es necesario, además cuando se caracterice un elemento discreto, se requiere frecuentemente un pulso corto. Estos dos requerimientos se contradicen ya que un pulso

largo provee un mayor rango dinámico, mientras un pulso corto que viene con una potencia baja limita el rango dinámico.

El software de análisis del OTDR debe de permitir localizar todos los posibles tipos de eventos, tales como:

- Reflexiones, causados por conectores, cortes de fibra y terminaciones.
- Pérdidas causadas por empalmes y macrocurvaturas.
- Ganancias, causadas por imperfecciones de alineamientos del núcleo ó diámetros diferentes.

Un buen OTDR debe de ser capaz de mostrar todos los tipos de eventos sobre la traza para permitir hacerlo fácilmente identificable al usuario, debe también proveer una lista de eventos en una tabla de eventos.

5.6 Activación y provisión del servicio

Los siguientes test deben de realizarse cuando se activa por primera vez la red o se instala un nuevo ONT.

5.6.1 Pruebas durante activación OLT (Solo durante la activación inicial)

La medición de la potencia óptica en el OLT es necesario para asegurar un buen nivel de potencia. Esto se realiza durante el proceso de activación ya que esta prueba no se puede repetir sin cortar los servicios de toda la red. Para realizar esta medida, la fibra alimentadora es desconectada y se mide la potencia a la salida del acoplador WWDM. Se pueden usar dos métodos:

- Usando un Medidor de potencia óptica, con la característica de poder ser capaz de medir las tres longitudes de onda de manera individual.
- Medidor de potencia con aislador de longitud de onda, el cual realiza la medición de potencia de cada longitud de onda de manera simultanea.

Después de conectar la fibra alimentadora, se realiza una prueba similar en el hub de las fibras de distribución, realizando mediciones en cada uno de las salidas del splitter.

5.6.2 Prueba en los terminales ópticos (ONT)

Cada vez que un ONT es agregado en la red, la potencia de subida y de bajada de los terminales de acometida deben de ser medidos.

El método recomendable es el uso de medidor de potencia con aislador de longitud de onda, que puede ser conectado como un elemento de paso. Un método alternativo es el de usar un medidor de potencia y filtros espectrales; sin embargo, este método no permite medir las señal bursty de subida. La figura 5.15 muestra la ubicación del medidor de potencia con aislador de longitud de onda conectado en la red. Este elemento permite medir la potencia de bajada a 1550 nm y 1490 nm, y la potencia de subida a 1310 nm.

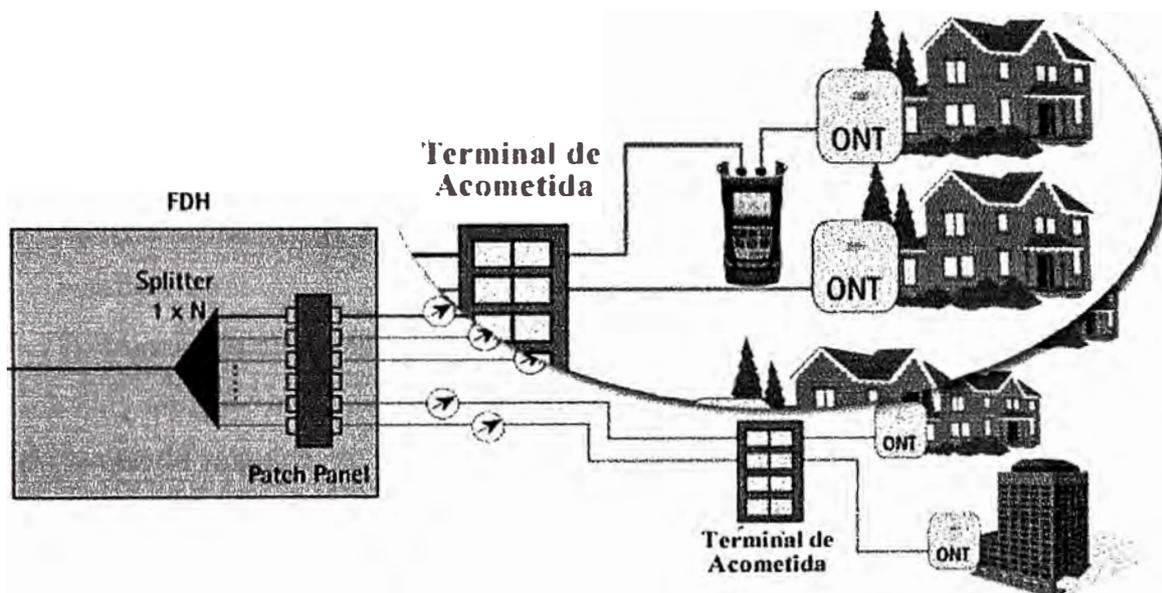


Figura 5.15 .Ubicación del medidor de potencia con aislador de longitud de onda. A diferencia de un medidor de potencia que solo mide el promedio de la potencia de una señal, este nuevo equipo detecta la potencia del tráfico burst ATM y provee una medida precisa.

5.7 Mantenimiento.

El mayor reto en una red PON completamente instalada es la realización de mediciones a través del splitter. Las averías en una PON requiere de la localización e identificación de la fuente del problema óptico, en una topología compleja que incluye varios elementos

resulta, si no se sigue un orden y no se cuenta con los instrumentos adecuados, bastante compleja la localización de la averías.

Si un corte ocurre en el cable ubicado entre el OLT y un splitter de bajada todos los ONT de bajada que dependen del splitter serán afectados. Si una macrocurvatura ó un conector sucio son los causantes de la pérdida de potencia de la señal, puede darse el caso que solo algunos ONT sea vean afectados debido a que la atenuación es proporcional a la longitud de la fibra, por lo que los ONT distantes recibirán una señal mas baja que los que se encuentran mas cerca a la CO. La señal de subida recibida en la CO también será más débil para los ONT lejanos, por lo que los OLT detectaran esta degradación.

Los Problemas que pueden ocurrir en una FTTH PON incluye:

- El nivel de potencia de uno o más ONTs no tienen el nivel mínimo de potencia especificado.
- Pérdida de la señal (no hay potencia)
- Incremento del BER o degradación de la señal (puede ser debido a una potencia insuficiente)
- Problemas en el Hardware de un componente activo (Un ONT o un OLT).

Debido a que la mayoría de los componentes de la red son pasivos, los problemas son usualmente debido a suciedad, daños ó desalineamiento de los conectores, cortes o macrodobladuras en el cable de fibra óptica. Esto puede afectar a uno, algunos, o a todos los abonados de la red, dependiendo de la localización de la avería.

La Mayoría de los Problemas pueden ser localizados usando los siguientes equipos:

Medidor de potencia con aislamiento de longitud de onda PON: Tiene las siguientes características:

- Se conecta como un instrumento de paso, que permite tanto al tráfico de subida como de bajada viajar a través de él.
- Mide la potencia de cada longitud de onda de manera simultánea.
- Detecta la potencia Burst del tráfico.
- Puede ser usado para ubicar averías en cualquier punto de la red.

La figura 5.16, muestra algunos de los puntos en los cuales pueden ser usado este equipo.

Medidor de potencia integrado por filtros espectrales, tiene las siguientes características:

- Mide la potencia de una longitud de onda específica, una a la vez.
- Mide la potencia continua, pero no la potencia Burst del tráfico desde la ONT.
- No puede ser conectado como un elemento de paso.

Localizador visual de fallos VFL (Visual Fault Locator), tiene las siguientes características:

- Inyecta una luz roja dentro de la fibra
- Encuentra fallos tales como malos empalmes, cortes y dobladuras haciéndoles visibles a la vista; esto sería imposible localizarlo de otra manera.
- Pueden ser incorporado al OTDR

Estos equipos pueden localizar defectos hasta los 5 kilómetros, en la figura 5.17 se muestra un modelo de estos equipos.

Reflectómetro OTDR: Ampliamente estudiado en el capítulo tres, Provee un trazo gráfico permitiendo la localización y características de cada elemento del enlace, incluyendo conectores, empalmes, splitters, acopladores, y fallos

Detector de fibra activa LFD (Live Fiber Detector) con adaptadores intercambiables, tiene las siguientes características:

- Detecta el tráfico.
- Mide la potencia de la señal en la fibra sin tener que realizar desconexiones.
- Se basa en la tecnología de macrocurvaturas no destructivas.

En la figura 5.18 se muestra uno de estos equipos.

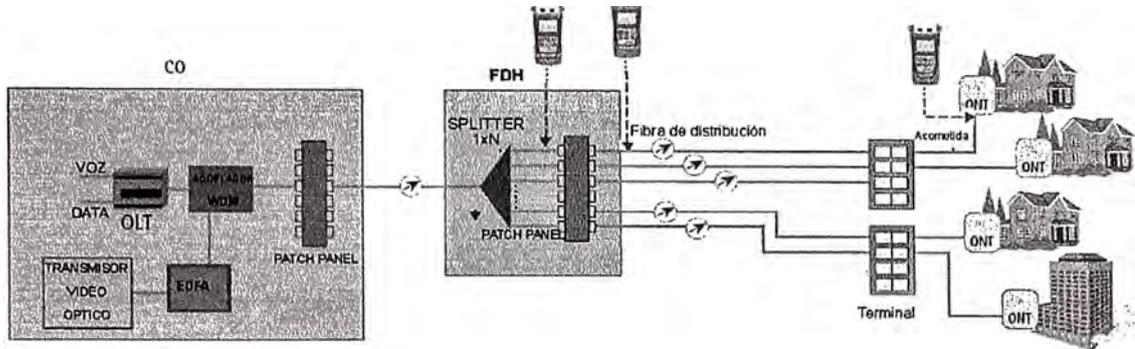


Figura 5.16. Puntos en los cuales se usa un medidor de potencia con aislamiento de longitud de onda para detectar averías en una red PON

Localizador Visual de Fallos
Visual fault locator



Figura 5.17 Localizador Visual de Fallos. Emite una luz roja que tiene un alcance de 5 Km.

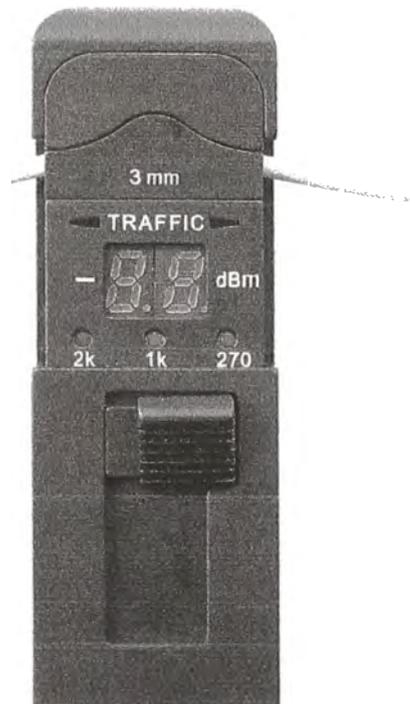


Figura 5.18 Detector de fibra activa LFD.

5.8 Pruebas en elementos pasivos

Como se ha visto previamente, las PON están compuesta por una serie de elementos pasivos, tales como:

- Acopladores 2x1 WDM
- Splitters bidireccionales (1xN)

Las características de estos componentes durante el proceso de fabricación es crítico para asegurar un desempeño favorable de la PON, parámetros importantes tales como la pérdida de inserción, uniformidad espectral, ancho de banda, pérdida dependiente de la polarización, y pérdida de retorno óptico deben de ser controladas y testeadas durante el proceso de fabricación. Al momento de la instalación se debe de tener un conocimiento completo de las características de todos los elementos pasivos.

CONCLUSIONES

1. El deterioro de las señales ópticas podemos dividirlos en aquellas originadas por efectos lineales, los cuales son independientes de la intensidad de la señal, y efectos no lineales que varían con la intensidad de la señal. Los efectos lineales incluyen a la atenuación de la señal (ó pérdida), la dispersión cromática, la dispersión por el modo de polarización; y los mayores efectos no lineales son: la mezcla de cuarta onda, automodulación de fase y la modulación de fase cruzada.
2. Conforme los sistemas han ido incrementando su velocidad, los equipos de mediciones se han ido adaptando a las necesidades. Los parámetros que inicialmente eran despreciables en la fibra hoy en día se han convertido en grandes vallas a ser remontadas, como son el caso de la dispersión por el modo de polarización PMD y la dispersión Cromática, sobretodo para las redes de larga distancia que hoy en día están migrando hacia velocidades de 10 Gbps y 40 Gbps.
3. Las redes Metropolitanas son el puente entre las redes de acceso y las redes de larga distancia, combinado tecnologías de nueva generación y se están volviendo cada vez más complejas, grandes y rápidas. Los requerimientos de prueba de las redes Metro son similares a las redes de larga distancia, pero la diferencia estratégicas y realidades económicas diferentes que rodean a ambas arquitecturas nos conducen a diferentes procedimientos de pruebas. Los principales parámetros a ser chequeados durante la construcción incluyen:
 - La pérdida total de enlace
 - La pérdida de retorno óptica ORL

- La característica del enlace, lo cual incluye pérdida de los empalmes y conectores, así como la reflectancia; el equipo usado para esta prueba es el OTDR.

Antes de poner en funcionamiento este tipo de redes es necesario simular el tráfico DWDM y analizar el comportamiento a través de la fibra, pero también a través de los multiplexores y filtros, así como ver el impacto de la transmisión de varias longitudes de onda de manera simultánea. En el punto de provisión, se requiere realizar pruebas tanto en la capa óptica y en la de protocolo. Por el lado de la capa óptica usamos el analizador de espectro óptico para analizar los niveles de cada uno de los canales.

De encontrarnos con velocidades que superen los 10 Gpbs tendríamos al igual que las redes de larga distancia de tener el cuidado adecuado con la PMD.

4. Por otro lado, el mundo de las redes de acceso de banda ancha es muy diverso, la tecnología de las redes ópticas pasivas PON, surgen en el mercado a mediados de los años 90, y se han desarrollado principalmente en ASIA, y se están instalando en USA y Europa. Es a partir del 2002 que las grandes empresas se ha sentido atraídas por esta tecnología, hoy la Tecnología de las PON ha evolucionado rápidamente, y es la alternativa lógica a las antiguas redes de cobre.

Por el lado del mantenimiento estas nuevas redes PON presentarán nuevos retos, ya que se deberán de modificar los actuales procedimientos y probar nuevos parámetros que no se han estado considerando en la redes Punto a Punto.

Desde el punto de vista de un técnico, la prueba de redes de acceso PON automáticamente trae consigo la problemática de las condiciones ambientales, ya que el 100 % de las pruebas deben de realizarse al aire libre. De hecho, la mayor parte de los puntos de pruebas en la red de acceso están ubicados en recintos exteriores. Estos elementos, tales como los terminales de acometida, cajas de empalmes, gabinetes, y los Hubs de distribución de fibra son bastante pequeños, y como el número de conexiones de incrementa, dejando espacios muy pequeños para que los técnicos puedan colgar sus unidades de pruebas. Esto quiere decir se hará cada vez más importante para los técnicos poder ser capaces de realizar pruebas con una mano.

También, una red de acceso por definición es más distribuida que otras configuraciones, lo que implica que el número de fibras por posición es baja, pero hay mucho más posiciones que cubrir. Como el territorio es más grande y teniendo en cuenta que la red de acceso es alimentada por fibra, los técnicos cuya experiencia principal está en redes basadas en el cobre ahora tienen que realizar pruebas relacionadas con la fibra, forzándolos a aprender lo básico de pruebas de fibra óptica dentro de un corto tiempo. En este caso, es esencial que el equipo de prueba sea fácil de usar e interpretar (se requiere de un curva de aprendizaje lo mas corta posible). Las nuevas unidades de pruebas son capaces de tratar e interpretar los datos, y luego presentar una tabla simple de resultados, mostrando un resumen (sumario) de toda la información requerida así como el estado pass/fail para cada enlace probado.

Los problemas que pueden ocurrir dentro de una red FTTX son numerosos, y pueden ser causados tanto por los equipos activo ó pasivo. Por lo cual se requieren equipos que puedan medir como mínimo con las tres longitudes normadas para estas redes.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Optical Networks: A Practical Perspective (Second Edition - The Morgan Kaufmann Series in Networking) by Rajiv Ramaswami.
- [2] The Handbook of Optical Communication Network -Mohammad Ilyas y Hussein T. Mouftah , Capitulo 1 “Overview of optical communication networks: Current and future trends “
- [3] Artículo publicado en la revista CONECTRONICA nº 51- Prof. Dr. Francisco Ramos Pascual Ver http://www.radioptica.com/Fibra/sonet_sdh_I.asp?pag=2
- [4] Understanding Fiber Optics Third Edition Jeff Hecht Capitulo 03 pagina 72
- [5] ITU Standard GR 653.
- [6] ITU Standard GR 655.
- [7] Artículo “Understanding and measuring chromatic dispersion” 7/25/2000 por M. R. (Mike) Wilder, Anritsu Company
<http://www.fiberopticonline.com/content/news/article.asp?DocID={AD24094E-6231-11D4-8C55-009027DE0829}>
- [8] C.D. Poole, R.E. Wagner. “ A Phenomenological approach to polarizacion dispersion in single mode fibers” IEEE Electronics Letters, 1986, Vol 22.
- [9] Joachin Peerlings “Polarizacion Mode Dispersión and Fiber Characterization” Revista Fiber Optic Technology Diciembre 2004.
- [10] O. Karlsson, “Long-term measurement of PMD and polarization fibers”, Revista J.Lightwave Technology, vol. 18, pp.941-951, 2000
- [11] P. Noutsios, S. Poirier, “PMD assessment of installed fiber plant for 40 Gbit/s transmission,” NFOEC 2001, pp. 1342-1347.
- [12] Revista de Telecomunicaciones de Alcatel 1er Trimestre 2002 – “Consideraciones sobre las fibras a utilizar en las Redes Metropolitanas” Jim Ryan.
- [13] Revista LightWave – Setiembre 2003 “Metro Capacity with cost reducing fiber infrastructure” por Drs Ray Boncek, Paul Dickinson, and Santana Das

- [14] Las Telecomunicaciones de nueva generación –Publicación Telefónica,
http://www.telefonica.es/sociedaddelainformacion/html/publicaciones_nueva_gener.s.html
- [15] Artículo publicado en <http://www.lightreading.com/> Agosto 08,2005 “PON & FTTx Update “
- [16] FTTx PON Guide – Testing Passive Optical Network -EXFO

Otras Referencias

1. Artículo “Las fibras ópticas abren el camino a un acceso de banda ancha mas rápido”.
Th. Pfeiffer, E. Ringoot, A. Granger, D. Wang ; Date Published: June 13, 2005
Alcatel Telecommunications Review (ATR)
2. FTTx PON Technology and Testing – Andre Girard PhD. EXFO Electro-Optical Engineer Inc.
3. ATM Ingeniería de Redes – Telefónica de España Servicios de Formación
4. Emerging Optical Network Technologies Edited by KRISHNA M. SIVALINGAM
University of Maryland, Baltimore County SURESH SUBRAMANIAM George
Washington University
5. Optical Networks: A Practical Perspective (Second Edition) (The Morgan Kaufmann Series in Networking) by Rajiv Ramaswami, Kumar Sivarajan