



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN**

**SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE ALTA CAPACIDAD POR
FIBRA ÓPTICA MEDIANTE DWDM**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N:
FRANCISCO ALFREDO NIETO CHÁVEZ
EDUARDO SANTIAGO GONZÁLEZ**

ASESOR:

ING. MARTIN HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Por haberme dado la oportunidad de estudiar y pertenecer a esta gran institución.

A mis maestros

Por compartir su conocimiento dándome la formación que hoy tengo.

A mi madre

Por todo el apoyo y ayuda incondicional que me has dado durante el largo camino de la vida, eres el pilar de mi éxito.

A mi padre

Gracias por existir, por siempre estar a mi lado y por haber compartido tu vida conmigo. También mil gracias por haberme transmitido la pasión por la ingeniería electrónica y por hacerme un ser humano responsable.

A mi esposa

Por tu apoyo, amor, por creer en mi y por impulsarme a lograr mis metas.

A mi hijo Axel Emmanuel

Gracias por existir, por comprenderme y por haberme permitido utilizar parte de nuestro tiempo de juego en el desarrollo de esta tesis.

A mi hijo Ian (†)

Gracias por que en tu corta estancia en este mundo me enseñaste a ser fuerte, a no desmallar ante las adversidades por complicadas que sean y a vivir cada día con esperanza.

A mis familiares y amigos

Gracias por ser parte de mi vida y por compartir tantos momentos inolvidables, especialmente por que son parte integral de mis logros.

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	- 1 -
1 ANTECEDENTES.....	- 3 -
1.1 PANORAMA GENERAL.....	- 3 -
1.2 DESARROLLO DE LAS REDES OPTICAS.....	- 3 -
1.3 TECNOLOGÍA WDM.....	- 5 -
1.3.1 Componentes básicos de un sistema WDM.....	- 8 -
1.4 UBICACIÓN DE DWDM EN EL SISTEMA OSI.....	- 11 -
2 SISTEMAS DWDM.....	- 13 -
2.1 DEFINICION.....	- 13 -
2.2 TRANSPONDER.....	- 14 -
2.3 MULTIPLEXOR/DEMULTIPLEXOR.....	- 15 -
2.4 FIBRA ÓPTICA.....	- 17 -
2.5 AMPLIFICADOR ÓPTICO.....	- 22 -
2.6 TABLA DE LONGITUDES DE ONDA.....	- 25 -
3 FACTORES CRITICOS EN UN SISTEMA DWDM.....	- 27 -
3.1 PARAMETROS DE TRANSMISORES.....	- 27 -
3.2 PARAMETROS DE RECEPTORES.....	- 30 -
3.3 PARAMETROS DE MULTIPLEXORES Y DEMULTIPLEXORES.....	- 31 -
3.4 PARÁMETROS DE LA FIBRA OPTICA.....	- 36 -
3.4.1 Dispersión cromática.....	- 36 -
3.4.2 Dispersión del modo de polarización (PMD).....	- 38 -
3.4.3 Efectos no lineales.....	- 44 -
3.4.4 Modulación de auto-fase.....	- 44 -
3.4.5 Modulación de fase cruzada.....	- 46 -
3.4.6 Efecto FWM (Four Wave Mixing).....	- 47 -
3.5 PARÁMETROS DE AMPLIFICADORES OPTICOS.....	- 48 -
3.6 MEDICIÓN Y EQUIPO DE PRUEBA EN REDES DWDM.....	- 50 -
3.7 TÉCNICAS DE MEDICION PARA COMPONENTES DEL SISTEMA DWDM.....	- 57 -
4 DESARROLLO DE UN SISTEMA DWDM CASO PRÁCTICO.....	- 68 -
4.1 PLANEACIÓN DEL PROYECTO - 68 -	
4.2 EQUIPO DE MEDICIÓN E IMPLEMENTACIÓN UTILIZADO EN EL PROYECTO.....	- 70 -
4.2.1 Generador de múltiples fuentes láser.....	- 70 -
4.2.2 Analizador OTDR.....	- 71 -
4.2.3 Analizador de PMD y Dispersión cromática.....	- 72 -
4.2.4 Analizador de espectros ópticos (OSA).....	- 72 -
4.2.5 Atenuador variable.....	- 73 -
4.2.6 Atenuador fijo.....	- 74 -

4.2.7	Generador de fuente láser.....	- 75 -
4.2.8	Medidor de potencia óptica.....	- 76 -
4.2.9	Computadora.....	- 77 -
4.3	VIABILIDAD DEL MEDIO DE TRANSMISIÓN PARA UTILIZARSE CON TECNOLOGIA DWDM.....	- 77 -
4.3.1	Medición de atenuación en la fibra mediante OTDR.....	- 77 -
4.3.2	Análisis de resultados.....	- 84 -
4.3.3	Medición de PMD.....	- 85 -
4.3.4	Análisis de resultados.....	- 97 -
4.3.5	Mediciones de Dispersión Cromática.....	- 98 -
4.3.6	Análisis de resultados.....	- 112 -
4.3.7	Conclusiones de viabilidad del medio.....	- 115 -
4.4	PROCEDIMIENTO PARA LA IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA EN SERVICIO DE UN SISTEMA DWDM.....	- 115 -
4.4.1	Topología de red.....	- 115 -
4.4.2	Instalación de equipo.....	- 116 -
4.4.3	Pruebas internas del equipo (Stand Alone).....	- 119 -
4.4.4	Integración con la red.....	- 132 -
4.4.4.1	Configuración.....	- 132 -
4.4.4.2	Calibración.....	- 132 -
4.4.4.3	Etapa Interna de Calibración (Inter-Stage Calibration).....	- 141 -
4.4.4.4	Revisión final de variación de ganancia (GV) para la vida media del sistema (MOL).....	- 142 -
4.4.4.5	Revisión final de variación de ganancia (GV) al inicio de la vida del sistema (BOL).....	- 144 -
4.4.4.6	Memoria de resultados de Calibración.....	- 145 -
4.4.4.7	Ecualización.....	- 154 -
4.4.4.8	Memoria de Resultados de Ecualización.....	- 158 -
4.4.4.9	Prueba de Estabilidad final (B.E.R. Bit Error Rate).....	- 164 -
	CONCLUSIONES.....	- 169 -
	ACRÓNIMOS.....	- 171 -
	BIBLIOGRAFÍA.....	- 175 -

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la tecnología ha demostrado su enorme capacidad de desarrollo, esto es, avanza a un ritmo vertiginoso y no solo involucra a las grandes compañías o al estado, la tecnología ha llegado a ocupar un lugar necesario en nuestro modo de vida.

Así como la bombilla eléctrica (foco) llegó a ser un elemento fundamental en nuestra vida cotidiana, el teléfono, la radio, la televisión, etc. llegaron para ocupar su propio espacio.

Actualmente la computadora se suma a nuestra lista de instrumentos de uso común y con la computadora el Internet que es la red que involucra a prácticamente todo el mundo, resulta impensable la cantidad de información que fluye a través de esta red si tomamos en cuenta que cada vez hay más hogares en línea, más empresas en línea, más operaciones mercantiles en línea, en fin los usuarios de cientos de países que tienen acceso al Internet. Toda la información que viaja a través de esta red ya sea voz, datos o video se recibe, transmite y procesa en forma digital. El inmenso procesamiento de datos que se realiza para después ser intercambiados necesita de un gran canal de paso (ancho de banda) para que la información viaje de manera eficiente.

En comunicaciones, usar fibra óptica para incrementar la capacidad de una red de transporte, es una buena solución por el ancho de banda que soporta pero todavía se puede optimizar aun más. Los sistemas que actualmente usan fibra óptica utilizan una sola longitud de onda (frecuencia) para operar, lo cual es un desperdicio ya que sobre una misma fibra óptica ahora ya pueden propagarse múltiples frecuencias de luz y entonces podemos tener muchas longitudes de onda en una sola fibra óptica.

Esto se puede lograr con un sistema DWDM “Dense Wavelength Division Multiplexing” (Multiplexación por división de longitud de onda de gran densidad) que está formado básicamente de: múltiples fuentes de luz operando cada una a una longitud de onda distinta, un elemento multiplexor que combina las diferentes fuentes de luz, una sola fibra óptica que transporta las diferentes señales, amplificadores para alcanzar distancias mayores y en el punto de destino debemos tener un elemento demultiplexor que separe las diferentes longitudes de onda.

El objetivo de esta tesis es dar a conocer, estudiar y recomendar a las nuevas generaciones de ingenieros en telecomunicaciones el uso y planeación de redes de transporte de alta capacidad

mediante el uso de la tecnología DWDM ya que como veremos a lo largo de esta tesis tiene grandes propiedades costo – beneficio.

En el capítulo 1 se darán a conocer los antecedentes que precedieron al desarrollo de la tecnología DWDM actual.

En el capítulo 2 el objetivo es dar a conocer los diferentes componentes que integran un sistema DWDM y cual es su funcionamiento.

En el capítulo 3 se analizaran los factores críticos a considerar para lograr un funcionamiento óptimo en esta tecnología.

En el capítulo 4 se desarrollara el caso de estudio práctico de un enlace de DWDM que fue parte de una ruta internacional realizada para la compañía Protel.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

1.1 PANORAMA GENERAL

Actualmente la demanda de transporte de información se ha incrementado notablemente, debido a servicios como Internet en la década pasada y que actualmente es uno de los principales demandantes de inmensos anchos de banda para satisfacer sus requerimientos y constantes avances principalmente para soportar funciones multimedia.

Los sistemas de comunicación que utilizan la luz como portadora de información son actualmente el medio de transporte de más alta capacidad, ya que las frecuencias de luz usadas están entre 100,000 a 400 000 Ghz, por lo tanto tienen la capacidad de transportar velocidades del orden de los Gb/s, siendo la mejor solución para cubrir la gran cantidad de información que se transporta actualmente en todo el mundo, además de que el ancho de banda que se puede transportar en un medio de luz es inmenso y permite que conforme avanza la tecnología sea posible incrementar la capacidad de transporte sin la necesidad de cambiar el medio físico de transmisión mediante solo una actualización o expansión en los equipos que lo utilizan

1.2 DESARROLLO DE LAS REDES OPTICAS

El rápido crecimiento del Internet y la World Wide Web “red mundial de datos” (WWW) ha causado que los vendedores de carriers “medio de transporte” y equipo reconsideren sus estrategias de mercado y desarrollo, planteando la necesidad de emigrar las redes que son esencialmente de voz a redes esencialmente de datos. Los sistemas ópticos son el centro de esta transformación mundial proporcionando gran capacidad de red para dar abasto al explosivo crecimiento del tráfico de datos y aplicaciones multimedia.

El desarrollo de las redes ópticas es una actividad relativamente reciente y fue posible por cuatro innovaciones clave:

- La invención del láser a finales de los 50s.
- El desarrollo de la fibra de baja-perdida en los 70s.

- La invención del erbium-doped fibre amplifier (EDFA) en los 80s.
- El avance en tecnología de filtros en los 90s. (filtros dieléctricos, fibre bragg gratings (FBG) y arrayed waveguide gratings (AWG)).

Las redes ópticas tradicionalmente han sido construidas usando sistemas SDH/SONET. Estos sistemas estuvieron diseñados para llevar tráfico de voz eficientemente y están basados en la tecnología de multiplexaje por división de tiempo (TDM) principalmente. Sin embargo los sistemas TDM sufren problemas de escalamiento, limitando los rangos de transmisión a cerca de 40Gb/s. También, el multiplexaje jerárquico construido en los sistemas SDH/SONET puede algunas veces ser ineficiente para llevar tráfico de datos.

Hoy en día las redes son híbridas, esencialmente usan sistemas electrónicos para conmutar y sistemas ópticos para el transporte. Los sistemas ópticos son buenos transportando canales de poca o muy alta capacidad sobre distancias largas, esta es una aplicación que requiere poco procesamiento, pero proporciona muy alto rendimiento. Por el contrario los sistemas electrónicos, como los switches ATM y los ruteadores IP son buenos conmutando muchos paquetes o células individuales, esta aplicación requiere de un procesamiento intenso. Los sistemas SDH/SONET usan las ventajas anteriormente descritas ya que utilizan sistemas electrónicos para conmutar y ópticos para la transmisión.

Sistemas fotónicos

El termino fotónico es relativamente nuevo y abarca los asuntos ópticos mas que los electrónicos para construir sistemas de telecomunicaciones. Los sistemas electrónicos son buenos para detectar, almacenar y regenerar señales así como para realizar operaciones lógicas. Estas funciones son hoy en día muy difíciles de implementar con tecnología óptica sin embargo, la velocidad limitada de los sistemas electrónicos favorecen los bien conocidos “cuellos de botella electrónicos” dentro de los sistemas de transmisión ópticos. Los sistemas ópticos son buenos combinando, dividiendo, filtrando, multiplexando y demultiplexando señales ópticas. Estas características pueden ser usadas para combinar varias señales a diferentes longitudes de onda dentro de una fibra óptica.

Los sistemas fotónicos explotan la inmensa capacidad de los cables de fibra óptica dividiendo el ancho de banda disponible en canales separados. Esta técnica llamada multiplexaje por división de longitud de onda (WDM) permite que las redes excedan la capacidad disponible en los sistemas tradicionales SDH/SONET.

Los sistemas fotónicos se desarrollaron en las redes de telecomunicaciones desde la mitad de los años 90s. Esos sistemas proporcionan una relación costo-eficacia, que supera la congestión de tráfico en la fibra en redes de larga distancia. Sin embargo los sistemas fotónicos que están emergiendo en la actualidad, incluyen cross-conectores ópticos, multiplexores add/drop ópticos, sistemas ultra-largo-camino y sistemas metro. Estos sistemas permiten construir carriers y redes totalmente ópticas – eliminando el alto costo de conversiones óptico-eléctrico-óptico.

La tecnología fotónica esta madurando rápidamente en los sistemas de transmisión. La inmensa capacidad disponible hecha por la tecnología esta poniendo presión sobre los sistemas de conmutación electrónicos, los cuales favorecen los cuellos de botella en las redes de telecomunicaciones como ya se a mencionado. Las investigaciones actualmente contemplan aplicar la tecnología fotónica en los sistemas de conmutación del futuro principalmente para tener redes de telecomunicaciones completamente transparentes.

Los enlaces (WDM) fueron los primeros sistemas fotónicos desarrollados dentro de las redes, combinaban transmisión a 1310 nm y 1550 nm para duplicar la capacidad del enlace. Los avances de la tecnología permitieron la introducción de sistemas de cuatro canales que podían cuadruplicar la capacidad de la fibra. Sin embargo, esto no fue hasta que los avances en tecnología láser fueron introducidos.

1.3 TECNOLOGÍA WDM (multiplexaje por división de longitud de onda)

WDM es una tecnología óptica basada en la multiplexacion (multicanalización) de varias longitudes de onda generadas por diferentes emisores de luz dentro de una misma fibra óptica. De esta forma, se logra aumentar la capacidad de transmisión o ancho de banda de la fibra ya que actualmente cada longitud de onda puede transportar cualquier velocidad entre 100 Mb/s y 10 Gb/s.

Los sistemas WDM se utilizarán primeramente en los enlaces de larga distancia donde las necesidades de ancho de banda se incrementan constantemente. Sin embargo, en transmisión local también es necesario implementar soluciones de WDM para aliviar la congestión en porciones de la red con alta densidad de tráfico en particular para los enlaces entre centrales telefónicas de alta importancia o en anillos metropolitanos.

Podemos resumir brevemente las ventajas principales de los sistemas WDM sobre los sistemas TDM tradicionales.

1. WDM incrementa la capacidad de transmisión sin necesidad de reemplazar la fibra existente, lo que reduce sustancialmente los costos de actualización

de la red y permite una mercadotecnia de arrendamiento de fibras y de longitudes de onda para transmisión de otros servicios como videoconferencia, televisión, tráfico de Internet, aplicaciones específicas corporativas, etc.

2. WDM permite redes totalmente ópticas sin regeneración electrónica de la señal en ningún punto.
3. Los sistemas WDM no tienen los problemas que limitan el desempeño de los sistemas TDM y son de mucho mayor capacidad, (la complejidad técnica de los multiplexores y demultiplexores de velocidades mayores a 2.5 Gb/s han limitado el desarrollo de los sistemas TDM).
4. WDM ofrece en la actualidad sistemas con capacidades en el rango de terabits/seg.(DWDM).

En la *figura 1* se observa la diferencia entre el sistema TDM tradicional, el cual utiliza un par de fibras para cada sistema y la tecnología WDM que utiliza un par de fibras para transportar los mismos canales. Obsérvese que la cantidad de amplificadores ópticos (WDM) es menor que la de los regeneradores ópticos (RO) del sistema TDM.

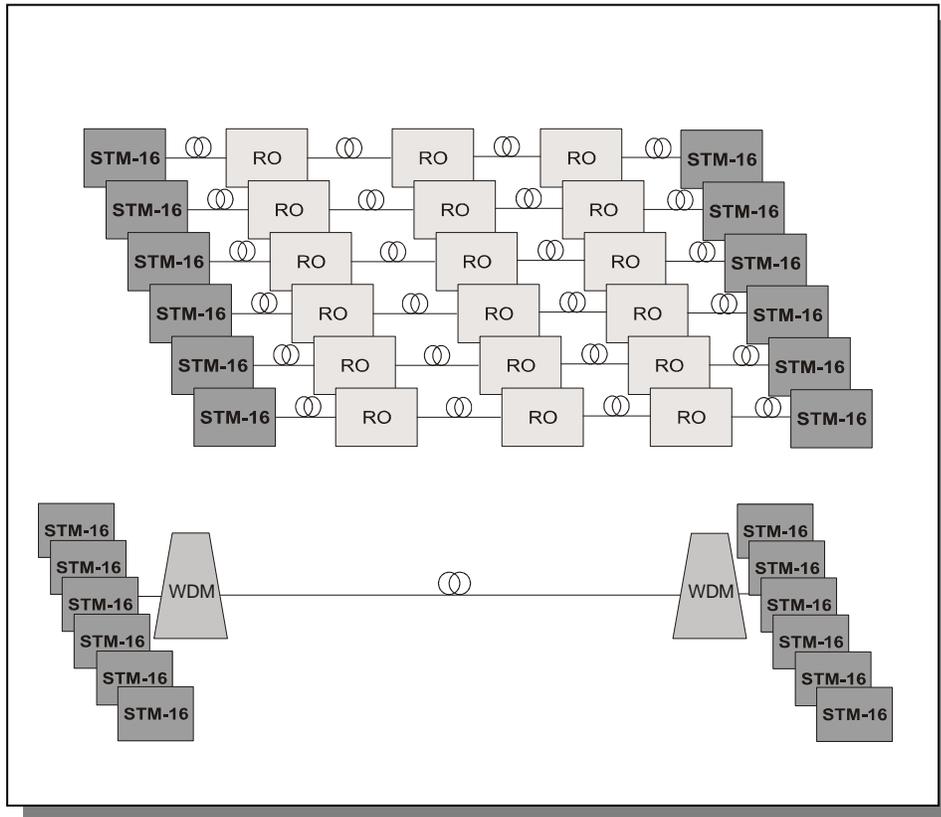


Figura 1. Multiplicación de la capacidad de transmisión de la fibra óptica utilizando WDM.

En la *figura 2* se muestra una configuración básica WDM. La transmisión es punto a punto y se multiplexan los cuatro canales (o sistemas) dentro de una sola fibra óptica. Cada canal tiene su propia longitud de onda y dichas longitudes de onda se encuentran espaciadas entre sí por varios nanómetros.

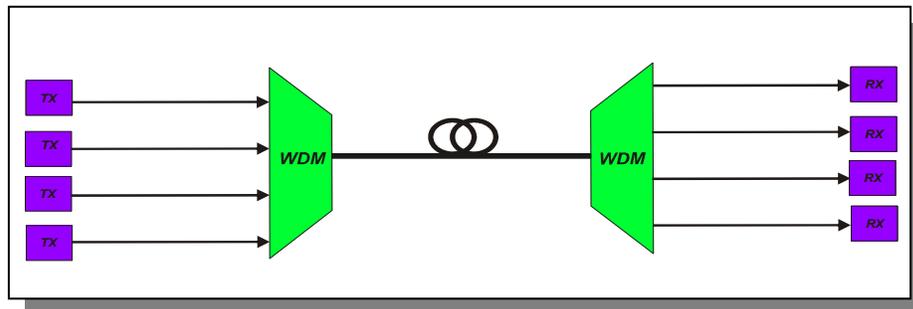


Figura 2. Sistema WDM de cuatro canales.

1.3.1 Componentes básicos de un sistema WDM

Un sistema WDM cuenta básicamente con múltiples fuentes de luz cada una operando a una longitud de onda distinta, un elemento multiplexor que combina las diferentes fuentes de luz, una sola fibra óptica que transporta las diferentes señales y en el camino podemos tener amplificadores para alcanzar distancias mayores.

En el punto destino debemos tener un elemento demultiplexor que separe las diferentes longitudes de onda y las presente en canales individuales hacia el punto final del enlace.

Si las fuentes de luz (multiplexor SDH/SONET, switch ATM o ruteador IP) proporcionan una señal óptica a una longitud de onda específica puede ser introducida directamente en el multiplexor WDM. Si la longitud de onda recibida no es compatible, existen dispositivos llamados transponders que son usados para convertir la longitud de onda de origen en una longitud de onda específica que se adecue al sistema WDM.

Transponder

Un transponder es un módulo adaptador de longitud de onda (fuentes de luz de frecuencia distinta) que se utilizan para cambiar la longitud de onda de los equipos transmisores por ejemplo una señal óptica en SDH y hacerla compatible con las longitudes de onda de entrada al multiplexor WDM. El transponder del lado receptor es necesario solo si el receptor del extremo remoto que recibe la señal SDH no es compatible con la longitud de onda que se generó en el transponder de transmisión.

Multiplexor WDM

El multiplexor MUX es usado para combinar señales de diferentes longitudes de onda dentro de una fibra óptica. Un acoplador de banda ancha estándar se puede utilizar como un MUX, sin embargo las pérdidas de inserción son altas, cerca de 4 decibeles para dos canales, 7 decibeles para sistemas de cuatro canales, 13 decibeles para sistemas de 16 canales. Por lo que la técnica de fabricación más utilizada es basándose en filtros ópticos.

Fibra óptica

La fibra óptica es uno de los componentes más críticos de una red óptica. De ahí la importancia en la selección de la fibra a utilizar en las redes de transporte de alta velocidad.

Fibra óptica como portadora de información

En poco más de 10 años la fibra óptica se ha convertido en una de las tecnologías más avanzadas que se utilizan como medio de transmisión de información. Este novedoso material revolucionó la tecnología de transmisión de información en las telecomunicaciones en todos los sentidos, desde lograr una mayor velocidad en la transmisión y disminuir casi en su totalidad los ruidos y las interferencias.

Las fibras ópticas son filamentos de vidrio de alta pureza extremadamente compactos; su grosor es similar a la de un cabello humano. Fabricadas a alta temperatura con base en silicio, su proceso de elaboración es controlado por medio de computadoras, para permitir que el índice de refracción de su núcleo, que es la guía de la onda luminosa, sea uniforme y evite las desviaciones, entre las principales características se pueden mencionar las siguientes: son compactas, ligeras, 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 radio-frecuencia. Las fibras ópticas no conducen señales eléctricas por lo tanto son ideales para incorporarse en cables eléctricos ya que no contienen ningún componente conductor que pudiera mezclar las señales y por lo tanto pueden usarse en condiciones peligrosas 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 de información 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. Con un cable de seis fibras se puede transportar la señal de más de cinco mil canales o líneas principales, mientras que se requiere de 10,000 pares de cable de cobre convencional para brindar servicio a ese mismo número de usuarios, con la desventaja que este último medio ocupa un gran espacio en los ductos y requiere de grandes volúmenes de material y mantenimiento, lo que también eleva los costos

Definición de fibra óptica

Un filamento de vidrio sumamente delgado y flexible (de 5 a 125 micrones) es capaz de conducir rayos ópticos (señales en base a la transmisión de luz). Las fibras ópticas poseen capacidades de transmisión enormes, del orden de miles de millones de bits por segundo. Se utilizan varias clases de vidrios y plásticos para su construcción.

Una fibra es un conductor óptico de forma cilíndrica que consta del núcleo (core), un recubrimiento (cladding) que tienen propiedades ópticas diferentes de las del

núcleo y la cubierta exterior (jacket) que absorbe los rayos ópticos y sirve para proteger al conductor del medio ambiente así como darle resistencia mecánica. Además, y a diferencia de los pulsos electrónicos, los impulsos luminosos no son afectados por interferencias causadas por la radiación aleatoria del ambiente.

Impactos de desempeño.

Existen parámetros de la fibra óptica que impactan en el desempeño de una red, estos se mencionan a continuación y mas adelante se analizaran a detalle.

- *La dispersión cromática*
- *Atenuación*
- *Dispersión del modo de polarización (PMD)*

Demultiplexor WDM

Un demultiplexor DEMUX separa una señal de múltiples longitudes de onda en longitudes de onda individuales, conceptualmente funciona como un multiplexor usado en forma inversa. Así la tecnología aplicable a multiplexores es también aplicable a los demultiplexores. Sin embargo un DEMUX óptico requiere de tecnología más compleja. Debe tener también una alta relación señal a ruido óptica (OSNR), con las aplicaciones **DWDM** el espaciamiento es más estrecho y la selectividad de longitud de onda se vuelve un parámetro muy importante.

Amplificador óptico

Un Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (EDFA) contiene un segmento de fibra óptica que se ha dopado con Erblio, dentro de este segmento de fibra se aplica un bombeo de radiación láser a las longitudes de onda de entrada produciéndose un efecto de amplificación a la salida.

Longitud de onda de sistemas WDM

Los sistemas que trabajan con WDM usan el rango de longitudes de onda entre 1530 a 1560 nm (figura 3), conocida como banda C y se encuentran establecidas por la recomendación G.692 de la UIT-T.

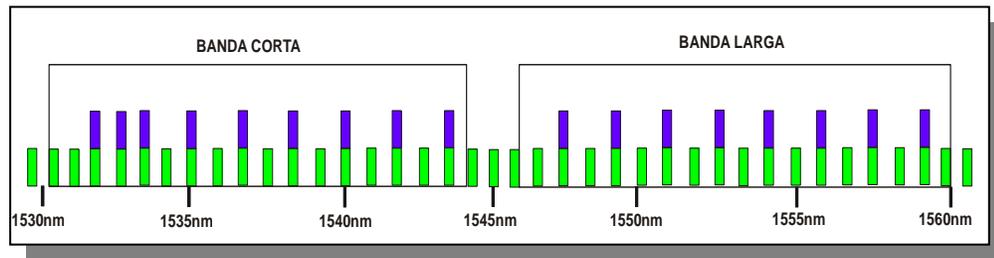


Figura 3. Canales con espaciamiento a 100 GHz en el rango de 1530 a 1560 nm de acuerdo a la G.692 de la UIT.

Las razones que justifican el uso de esta banda están relacionadas con las bajas pérdidas en esta ventana óptica y con el uso de amplificadores ópticos dopados con erbio (EDFA) que trabajan en el ancho de banda de la banda C. Algunas compañías por convención dividen la banda C en azul para la banda corta y rojo para la banda alta.

1.4 UBICACIÓN DE DWDM EN EL SISTEMA OSI

El modelo OSI es un modelo de 7 capas para redes de datos, como DWDM se utiliza como transporte físico de los datos, por convención algunos fabricantes lo ubican en la capa que han denominado capa óptica o capa 0, ver la figura 4. Sin embargo pertenece a la capa física o capa 1 ya que corresponde al medio físico de transporte.

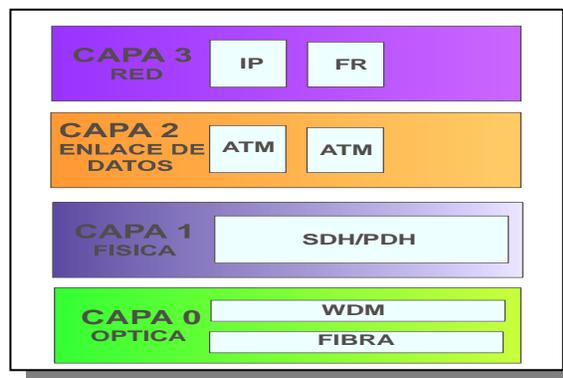


Figura 4. Ubicación de WDM en el modelo OSI.

Podemos observar un diagrama que representa el campo de aplicación de los sistemas WDM. En la actualidad las redes ópticas cuentan con varios niveles de protocolos y los principales son la capa de SDH o SONET ya que se encargan de

la función de transporte, otras capas pueden estar compuestas de una red ATM o IP. La función principal de WDM es el transporte de señales ópticas independientemente del protocolo que transporte siendo capaz WDM de conectarse directamente con cualquiera de las capas de nuestro modelo de red. Como puede observarse en la *figura 5*.

DWDM constituye la capa sobre la cual corren todas las demás aplicaciones de la red óptica por lo que es muy importante considerar la utilización de sistemas DWDM desde el diseño de red.

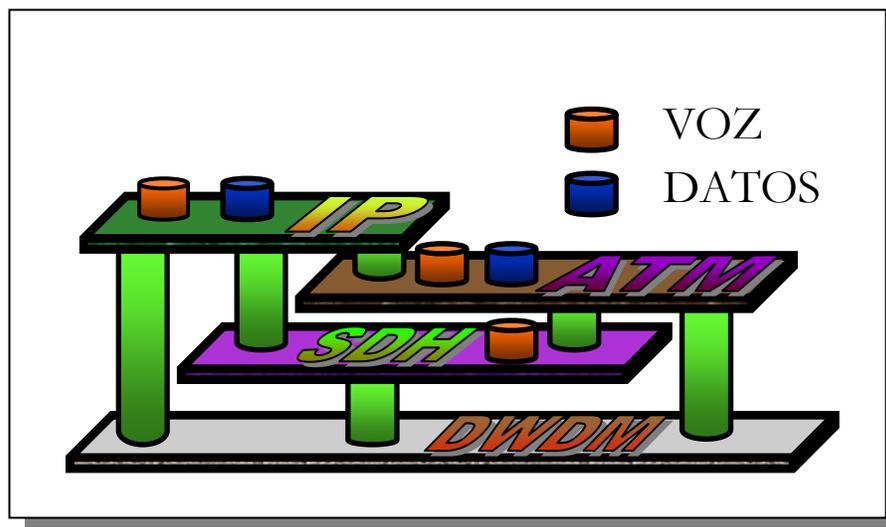


Figura 5. Aplicaciones de WDM.

Cuando el número de longitudes de onda que se multiplexan son más de dieciséis, se le conoce como DWDM (Multiplexación por división de longitud de onda de gran densidad).

A finales de los 90, los sistemas densos DWDM llegaron a ser una realidad cuando gran número de servicios y multitud de longitudes de onda comenzaron a coexistir en la misma fibra, llegando a enviar 32 / 40 / 64 / 80 / 96 longitudes de onda cada una con la capacidad de transportar velocidades de 2.5Gb/s o 10 Gb/s.

Los sistemas SDH/SONET actualmente operan a velocidades de 10Gb/s y 40Gb/s. Pero combinando los sistemas SDH/SONET con los sistemas DWDM, las redes serán capaces de llevar tráfico a 1Tb/s (100 x 10Gb/s).

CAPITULO II

SISTEMAS DWDM

2.1 DEFINICION

Desde el punto de vista técnico, la tecnología DWDM se define como un sistema de multiplexaje de longitudes de onda en el que la separación entre longitudes de onda es de alrededor de 1nm logrando con ello insertar más longitudes de onda en un ancho de banda más pequeño.

Los sistemas WDM que antecedieron a los DWDM, la separación entre longitudes de onda era de varios nm.

DWDM es una tecnología a utilizar en el corazón de una red de transporte óptico. Los componentes esenciales de un sistema de comunicación DWDM, se pueden clasificar de acuerdo a la posición en el sistema de la siguiente manera de acuerdo a la *figura 6*:

- Transponder
- Multiplexor
- Fibra óptica
- Amplificador óptico
- Demultiplexor
-

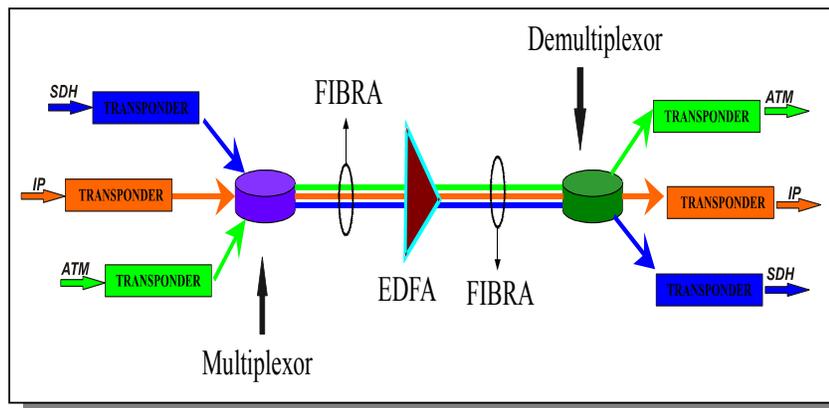


Figura 6. Sistema DWDM.

2.2 TRANSPONDER

Los convertidores de longitud de onda (transponder) son módulos adaptadores de longitud de onda, que se utilizan para adaptar la longitud de onda de los equipos transmisores a una longitud de onda ligeramente distinta, especificado en el plan de distribución de longitudes de onda del sistema DWDM.

Los transponder son dispositivos *óptico/eléctrico/óptico*. Cada transponder dentro del sistema convierte su señal cliente a una longitud de onda compatible con el sistema. Este proceso es relativamente simple, la longitud de onda de entrada se convierte a una señal eléctrica, esta señal se amplifica y se usa entonces para controlar un láser que trabaje en la nueva longitud de onda.

Los principales componentes (*Figura 7.*) de un transponder que procesan la información son:

- a) **Fotodiodos** que se encargan de convertir la señal óptica (fotones) a una señal eléctrica (electrones).
- b) **Amplificadores** que toman la señal eléctrica y proporcionan una señal de control.
- c) **Láser sintonizables** que generan una longitud de onda mediante una señal de control.

Es posible fabricar láser sintonizables, para generar una longitud de onda especificada mediante una señal de control y que a su vez puede cambiarse al variar la señal de control.

Por ejemplo, un láser Fabry-Perot puede sintonizarse mediante la acción de un material piezo eléctrico. Un material piezo-eléctrico es aquel que cambia sus dimensiones físicas al aplicársele un voltaje. La longitud de onda emitida por el láser Fabry-Perot depende de las dimensiones físicas de la cavidad resonante del láser. Si las paredes de dicha cavidad las fabricamos con un material piezo-eléctrico ahora podemos variar las dimensiones de la cavidad aplicando un voltaje variado a dicho material, por lo que este voltaje será la señal de control que permita variar la longitud de onda emitida por el dispositivo.

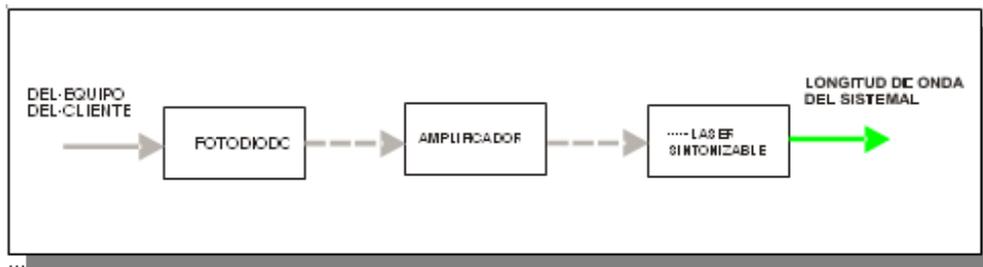


Figura 7. Funcionamiento del Transponder.

Los transponder Multi-rango, permiten diferentes velocidades de transmisión a la entrada / salida de los sistemas DWDM, por ejemplo, permiten velocidades de 100 Mb/s a 10 Gb/s, y puede transportar señales ATM, SONET/SDH, IP, Giga Ethernet, async/PDH, etc.

Cabe señalar que el transponder de lado receptor será necesario solo si el extremo remoto (SDH) no es compatible con la longitud de onda que se genere en el transponder de transmisión o si los transponder de transmisión y recepción requieren el envío y recepción de señales de supervisión entre ellos.

El sistema también puede incluir la posibilidad de aceptar señales ópticas directas al multiplexor; tales señales pueden venir, por ejemplo, de un satélite.

Las longitudes de onda DWDM del transponder son multiplexadas en una sola señal óptica y enviada por la fibra.

2.3 MULTIPLEXOR/DEMULTIPLEXOR

Los MULTIPLEXORES/DEMULTIPLEXORES en DWDM son dispositivos ópticos pasivos y se pueden implementar con filtros ópticos. El filtro generalmente utilizado en sistemas DWDM es el filtro dieléctrico, basado en el principio de la refracción de la luz que consiste en el cambio de dirección de la propagación de un haz de luz al pasar de un medio a otro.

El filtro dieléctrico (*Figura 8*) es una placa translúcida constituida de una sucesión de capas de material con diferentes índices de refracción. El grosor de cada capa y su índice de refracción se diseñan para que la luz de cierta longitud de onda sea refractada hasta que vuelve a salir por la misma cara de la placa por donde entró, separándola de las demás longitudes de onda que atraviesan la placa.

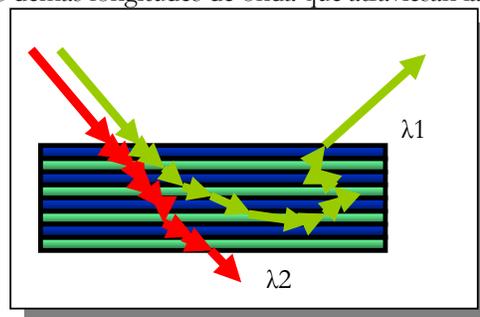


Figura 8. Filtro dieléctrico.

El Multiplexor DWDM es un dispositivo que toma varias longitudes de onda a su entrada y las convierte en una sola señal compuesta.

La *figura 9* describe el proceso de multiplexaje (combinación de diferentes longitudes de onda) de 3 fuentes de luz a longitudes de onda diferentes hacia una misma fibra óptica

El proceso de multiplexaje se realiza mediante filtros dieléctricos donde la primera longitud de onda (roja λ_1) se hace incidir sobre la primer placa dieléctrica sin afectar su dirección, la segunda longitud de onda (verde λ_2) se le hace incidir desde una dirección diferente, al entrar a la placa dieléctrica se modifica su dirección de propagación para salir en la misma dirección que la longitud de onda representada por el rojo. En las siguientes 2 placas dieléctricas se repite el proceso hasta que todas las longitudes de onda viajan en la misma dirección y pueden acoplarse a una sola fibra óptica.

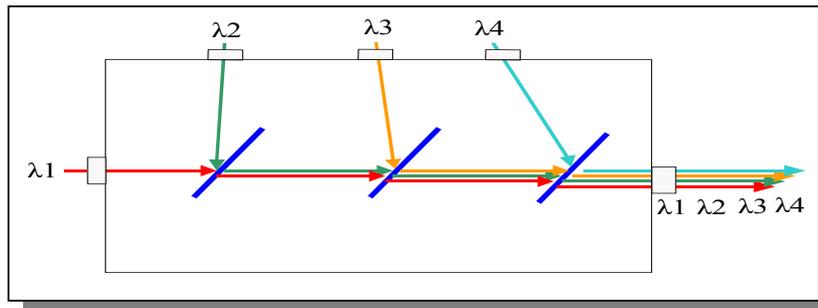


Figura 9. Multiplexaje de longitudes de onda.

El Demultiplexor DWDM es un dispositivo que toma la señal compuesta a su entrada y las transforma en varias longitudes de onda.

La *figura 10* describe el proceso de demultiplexaje (separar los diferentes componentes de luz) de 3 diferentes longitudes de onda contenidos en una misma fibra óptica.

El proceso de separación se realiza de manera análoga. Se hacen incidir rayos de luz de longitudes de onda mezcladas sobre la primera placa dieléctrica la cual modifica la dirección de propagación de la longitud de onda representada por el rojo (λ_1) y la separa del resto. Las placas subsecuentes se encargan de la separación de todas las longitudes de onda.

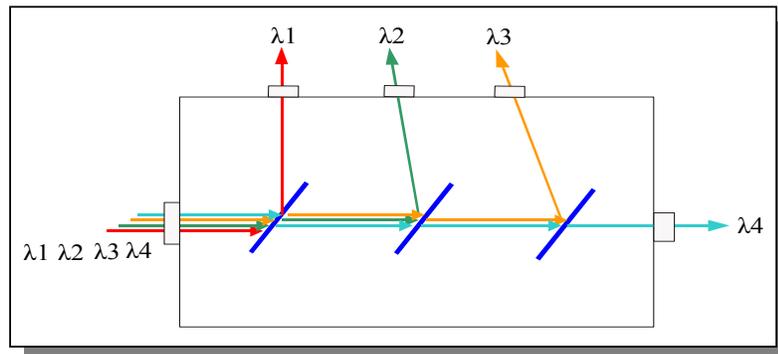


Figura 10. Demultiplexaje de longitudes de onda.

2.4 FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica esta construida principalmente de dos tipos de cristal sólido, el núcleo “core” y la cubierta “cladding”.

Existen dos categorías generales de fibra óptica:

- multimodo.
- monomodo.

La fibra multimodo, es el primer tipo de fibra que se comercializó, su nombre viene del hecho de que varios rayos ópticos viajan reflejándose a diferentes ángulos como se muestra en la *figura 11(a)*.

Los rayos ópticos recorren diferentes distancias para llegar a su destino, esta disparidad en cuanto al tiempo de llegada se le conoce como dispersión modal, este fenómeno es la causa de obtener una señal de calidad pobre en la recepción y limita el alcance de transmisión. Esta es la razón por la que la fibra multimodo no se usa en aplicaciones larga distancia.

La fibra monomodo (*Figura 11b*), tiene un núcleo “core” de diámetro menor que la fibra multimodo, permitiendo que un solo rayo óptico viaje por el núcleo. Como resultado de ello, la señal se atenúa menos y se alcanza mayores distancias, estos factores contribuyen a tener mayor capacidad de ancho de banda y bajas

perdidas ópticas, debido a lo anterior la fibra monomodo se prefiere en aplicaciones de larga distancia como es el caso de aplicaciones con DWDM.

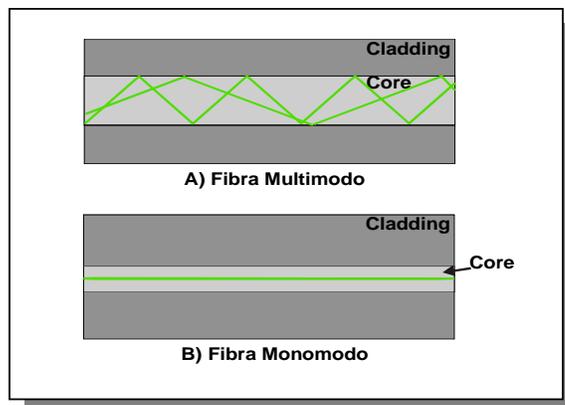


Figura 11. Fibra óptica.

Los diseños de la fibra óptica monomodo han evolucionado a medida que pasan los años. Dentro del espectro infrarrojo hay cuatro ventanas que ha sido explotados en la transmisión por fibra óptica. La ventana de 850 nm, se uso exclusivamente para aplicaciones multimodo de distancias cortas.

Las fibras SMF, comúnmente llamadas fibras monomodo estándar, se diseñaron para usarse en la ventana, de 1310nm. Para optimizar el rendimiento de la fibra óptica en esta segunda ventana, la fibra fue diseñada de forma que la dispersión cromática fuera cercana a cero para una longitud de onda de 1310 nm.

A medida que la fibra óptica se hacia mas común y aumentaban las necesidades de un mayor ancho de banda y mayores distancias, se exploto una tercer ventana cercana a los 1550nm en donde la atenuación es muy baja, las fibras DSF que desplazan el punto de dispersión cero a la región de los 1550nm, hacen que la atenuación óptica menor y el punto de dispersión cero coincidan con la ventana de los 1550nm, lo cual no es adecuado para la transmisión de DWDM y por esta limitación, estas fibras no sirven para aplicaciones de alta densidad..

Comment [EU1]: Necesitamos saber exactamente porque con dispersión cero no sirve para WDM

La fibra de tipo NZ-DSF es la cuarta ventana, esta diseñada específicamente para aplicaciones DWDM, este diseño proporciona dispersión baja en la región de los 1550nm, pero no-cero como las DSF.

Como se ha descrito el diseño de fibras va evolucionando de la mano de las nuevas necesidades, a continuación se mencionan algunos tipos y aplicaciones de fibras comerciales.

- **SMF-28** (Single Mode Fiber) Fibra de dispersión normal para uso regional y local de telefonía y redes de televisión por cable. Se encuentra en el 95 % de las instalaciones, puede ser útil para DWDM en la región de los 1550nm (*con compensadores de dispersión*).
- **DSF** (Dispersión Shifted Fiber) Fibra de dispersión corrida con longitud de onda de dispersión nula nominal próxima a 1550 nm. No útil para DWDM.
- **NZDSF** (Non Zero Dispersion-Shifted Fiber) Fibra de dispersión corrida no-cero la dispersión cromática tiene que ser mayor que algún valor diferente de cero en toda la gama de longitudes de onda de la utilización prevista. Recomendable para DWDM en la región de los 1550nm.
- **LS** (Long Span) Fibra para tramos largos NZDSF para redes de larga distancia en aplicaciones de alta capacidad y alta velocidad optimizada para aplicaciones WDM
- **LEAF** (Large Effective Area Fiber) Es una fibra tipo NZDSF para redes de larga distancia en aplicaciones de alta capacidad y alta velocidad optimizada para aplicaciones DWDM y tecnologías de redes ópticas. Combina la baja atenuación y baja dispersión con una área efectiva de 32% más grande que las fibras convencionales NZDSF.
- Fibras de nueva generación - incluyen los tipos que permiten a la energía viajar incluso en el recubrimiento "cladding", creando una pequeña cantidad de dispersión para contrarrestar algunos fenómenos no lineales, y las fibras de dispersión planas que permiten el uso de longitudes de onda mayores que la optima sin ensanchamiento de pulso.

En el futuro el diseño de la fibra será cada vez más importante en cuanto a la interdependencia con el diseño de sistemas DWDM.

Tablas de referencia para las fibras ópticas mas utilizadas.

En la tabla 1 se indican los tipos de fibra utilizados por Telmex para diferentes usos.

CABLES UTILIZADOS EN TELMEX			
TIPO	Tipo UIT-T	USO	DISPERSION
TM-1	G.652	Subterráneo	NORMAL (SMF-28)
TM-3	G.652	Interior	NORMAL (SMF-28)
TM-4	G.652	Directamente Enterrado	NORMAL (SMF-28)
TM-5	G.653	Aéreo	CORRIDA (DSF)
TM-6	G.652	Aéreo	NORMAL (SMF-28)
TM-7	G.653	Subterráneo	CORRIDA (DSF)
TM-8	G.653	Directamente Enterrado	CORRIDA (DSF)
TM-10	G.653	Interior	CORRIDA (DSF)
TM-11	G.655	Subterráneo	NO CERO (NZDSF) LS
TM-12	G.655	Interior	NO CERO (NZDSF) LS
TM-13	G.655	Subterráneo	NO CERO (NZDSF) LEAF
TM-14	G.655	Interior	NO CERO (NZDSF) LEAF
TM-15	G.655	Aéreo	NO CERO (NZDSF) LEAF
TM-16	G.655	Directamente Enterrado	NO CERO (NZDSF) LEAF

Tabla 1. Tipos de fibra en teléfonos de México.

En la tabla 2 se puede observar un cuadro comparativo de las características de las fibras SMF-28 y SMF/DS

Cuadro comparativo de las características de las fibras ópticas		
Característica	Tipo de fibra monomodo	
	SMF-28 (TM-1, TM-3, TM-4, TM-6)	SMF/DS (TM-5, TM-7, TM-8, TM-10)
Dispersión	18 ps/nm-Km	5 ps/nm-Km
Área efectiva	80 μm^2	55 μm^2
Atenuación a 1310 nm	< 0.40 dB/Km	< 0.35 dB/Km
Atenuación a 1550 nm	< 0.30 dB/Km	< 0.25 dB/Km
Diámetro de modo de propagación a 1310 nm	9.3 μm	
Diámetro de modo de propagación a 1550 nm	10.5 μm	8.1 μm
Longitud de onda de dispersión cero	1310	1550
PMD en fibra	0.2 ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ Max. 0.1 ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ Enlace	0.5 ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ Max.

Tabla 2. Cuadro comparativo de características de fibra SMF-28 y SMF/DS.

En la tabla 3 se puede observar un cuadro comparativo de las características de las fibras NZDSF-LS y NZDSF-LEAF

Cuadro comparativo de las características de las fibras ópticas		
Característica	Tipo de fibra monomodo	
	NZDSF-LS (TM-11, TM-12)	NZDSF-LEAF (TM-13, TM-14, TM-15, TM-16)
Dispersión	-01 a -3.5 ps/nm-Km sobre un rango de 1530 a 1560 nm.	2 a 6 ps/nm-Km para el rango de 1530 a 1565 nm 4.5 a 11.2 ps/nm-Km para el rango de 15655 a 1625 nm -17.4 ps/nm-Km a 1310 nm
Área efectiva	55 μm^2	72 μm^2
Atenuación a 1310 nm	0.38 dB/Km	\leq 0.34 dB/Km
Atenuación a 1550 nm	< 0.25 dB/Km	\leq 0.25 dB/Km \leq 0.25 dB/Km a 1625 nm
Diámetro de modo de propagación a 1310 nm		6.67 μm
Diámetro de modo de propagación a 1550 nm	8.4 μm	9.2 a 10 μm
Longitud de onda de dispersión cero	diferente de 1550	diferente de 1550
PMD en fibra	0.2 ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ Max. 0.08 ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ Enlace	0.5 ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ Max.

Tabla 3. Cuadro comparativo de características de fibra NZDSF-LS Y NZDSF-LEAF.

2.5 AMPLIFICADOR ÓPTICO

Los amplificadores ópticos han iniciado una auténtica revolución en la industria de las telecomunicaciones durante los últimos años, debido a que pueden amplificar directamente señales ópticas sus características de amplificación de bajo ruido sobre un rango de longitudes de onda que corresponden a la tercera ventana donde hay baja pérdida en la fibra, lo ha hecho especialmente atractivo para extender el alcance de las redes ópticas.

Un Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (EDFA) contiene un segmento de fibra óptica que se ha dopado con Erblio, dentro de este segmento se aplica un bombeo de radiación láser a las longitudes de onda de entrada produciéndose un efecto de amplificación a la salida.

El amplificador de fibra dopada con Erblio es un dispositivo fundamental para el funcionamiento de los sistemas DWDM. En los sistemas tradicionales, como SDH, se logran alcanzar grandes distancias mediante el uso de equipos regeneradores cada determinado número de kilómetros. Un regenerador consiste de un detector (diodo PIN ó APD) el cual convierte la señal óptica a formato eléctrico, una vez en formato eléctrico se realiza el proceso de regeneración y resincronización, finalmente la señal eléctrica ya procesada se vuelve a convertir a formato óptico utilizando un láser. Un proceso caro pero aceptable ya que solo utiliza una sola longitud de onda.

Cuando hablamos de sistemas DWDM un regenerador es un dispositivo extremadamente costoso ya que requiere de múltiples detectores y fuentes de luz para convertir a formato eléctrico y procesar cada una de las longitudes de onda

En contraste con los regeneradores electro - ópticos, los amplificadores ópticos utilizan EDFAs y son transparentes para las longitudes de onda que transportan, sus características principales son:

- No depende del protocolo de señal transportada.
- No importa el formato o velocidad de bit transportados en cada canal óptico.
- No recupera el reloj ni actualiza encabezados de sección de regeneración de las longitudes de onda transportadas.
- Puede ser conectado directamente a una amplia variedad de tecnologías, tales como los switchs ATM (Modo de Transferencia Asíncrona), protocolo Internet (IP), WDM etc., sin que exista peligro de que sus

componentes ópticos interfieran con los formatos de las señales transportadas.

- El único requisito es que las longitudes de onda que se quieren transportar se encuentre dentro de su rango de amplificación (1530 a 1560 nm)

Los amplificadores ópticos pueden ser bidireccionales, es decir transmitir y recibir longitudes de onda en una sola fibra óptica empleando un EDFA en cada sentido.

El EDFA permite amplificar la señal óptica sin convertirla a formato eléctrico, por lo tanto es un amplificador netamente óptico. El EDFA opera en un rango amplio de longitudes de onda por lo que no es necesario separar las diferentes señales ópticas para ser amplificarlas.

¿Como Funciona?

Un rayo de luz de alta potencia llamado láser de bombeo o láser para carga y la señal a ser amplificada (señal de entrada), se mezclan entre sí, usando un acoplador selectivo. El diagrama de la *figura 12* muestra el principio de funcionamiento.

La luz de alta potencia (láser de bombeo o láser para carga), que opera a una longitud de onda diferente a la de la señal óptica a ser amplificada, excita una sección de fibra dopada con erbio colocando los iones de erbio a su estado de mayor nivel energético.

Cuando los fotones pertenecientes a la señal de entrada reconocen los átomos excitados de erbio, los átomos de erbio ceden algo de su energía a la señal de entrada, regresando a su estado de menor energía y liberando gran cantidad de fotones. La señal óptica amplificada es monitoreada por un control de ganancia el cual regula la potencia del láser de carga.

Es común situar aisladores para evitar retornos de reflexiones hacia la fibra, tales reflexiones perturban la operación del amplificador.

Comment [EU2]: Se pierde el entendimiento del tema o secuencia ¿Qué es esto? Un ejemplo o bajo que encabezado esta ahí?

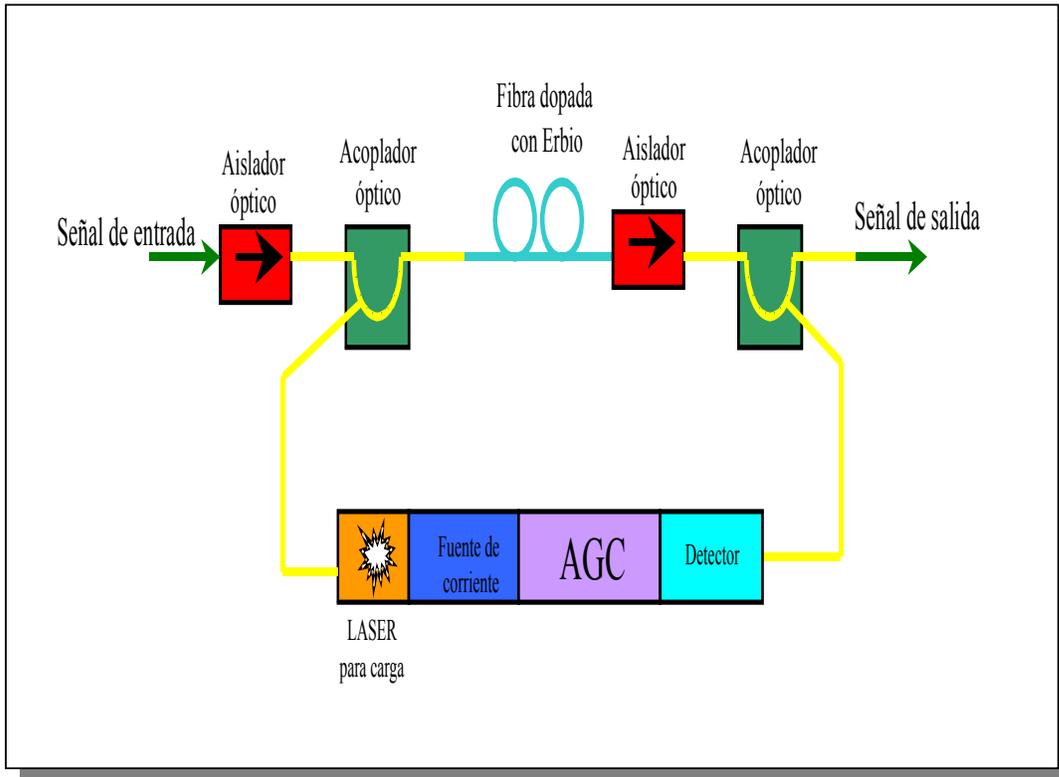


Figura 12. Funcionamiento de amplificador EDFA.

2.6 TABLA DE LONGITUDES DE ONDA

En la tabla 4 se muestran las longitudes de onda utilizadas en DWDM.

Frecuencia en THz	Separación 100 GHz (8 canales o más)	Separación 200 GHz (4 canales o más)	Separación 400 GHz (sólo 4 canales)	Separación 500/400 GHz (sólo 8 canales)	Separación 600 GHz (sólo 4 canales)	Separación 1000 GHz (sólo 4 canales)	Longitud de onda en el vacío en nm
196,1		*					1528,77
196,0	*						1529,55
195,9	*	*					1530,33
195,8	*						1531,12
195,7	*	*					1531,90
195,6	*						1532,68
195,5	*	*			*	*	1533,47
195,4	*						1534,25
195,3	*	*		*			1535,04
195,2	*						1535,82
195,1	*	*					1536,61
195,0	*						1537,40
194,9	*	*			*		1538,19
194,8	*			*			1538,98
194,7	*	*					1539,77
194,6	*						1540,56
194,5	*	*				*	1541,35
194,4	*						1542,14
194,3	*	*		*	*		1542,94
194,2	*						1543,73
194,1	*	*					1544,53
194,0	*						1545,32
193,9	*	*	*	*			1546,12
193,8	*						1546,92
193,7	*	*	*		*		1547,72
193,6	*						1548,51
193,5	*	*	*			*	1549,32
193,4	*			*			1550,12
193,3	*	*	*				1550,92
193,2	*						1551,72
193,1	*	*	*		*		1552,52
193,0	*			*			1553,33
192,9	*	*	*				1554,13
192,8	*						1554,94
192,7	*	*	*				1555,75
192,6	*						1556,55
192,5	*	*	*	*	*	*	1557,36
192,4	*						1558,17
192,3	*	*	*				1558,98
192,2	*						1559,79
192,1	*	*		*			1560,61

	Separación irregular en la rejilla de frecuencia nominal		Separación irregular por desplazamiento de la rejilla de frecuencia nominal		
196,1	*				1528,77
196,0	*				1529,55
195,9	*	*			1530,33
195,8	*				1531,12
195,7	*	*			1531,90
195,6	*				1532,68
195,5	*	*			1533,47
195,4	*				1534,25
195,3	*	*			1535,04
195,2	*				1535,82
195,1	*	*			1536,61
195,0	*				1537,40
194,9	*	*			1538,19
194,8	*				1538,98
194,7	*	*			1539,77
194,6	*				1540,56
194,5	*	*		(194,45)	1541,35
194,4	*				1542,14
194,3	*	*		(194,2)	1542,94
194,2	*				1543,73
194,1	*	*			1544,53
	Separación irregular en la rejilla de frecuencia nominal		Separación irregular por desplazamiento de la rejilla de frecuencia nominal		
194,0	*				1545,32
193,9	*	*	*		1546,12
193,8	*				1546,92
193,7	*	*	(193,675)	*	1547,72
193,6	*				1548,51
193,5	*	*	(193,525)		1549,32
193,4	*				1550,12
193,3	*	*	(193,35)	*	1550,92
193,2	*				1551,72
193,1	*	*	*	*	1552,52
193,0	*				1553,33
192,9	*	*	*		1554,13
192,8	*				1554,94
192,7	*	*	(192,625)	(192,75)	1555,75
192,6	*				1556,55
192,5	*	*	*	(192,45)	1557,36
192,4	*				1558,17
192,3	*	*		*	1558,98
192,2	*				1559,79
192,1	*	*			1560,61

Tabla 4. Longitudes de onda utilizadas en DWDM.

CAPÍTULO III

FACTORES CRÍTICOS EN UN SISTEMA DWDM

El arribo de la tecnología DWDM como cualquier otra tecnología, introducen buenas y mas poderosas ventajas así como nuevos problemas. La principal preocupación para los operarios de los nuevos sistemas DWDM es la confiabilidad y estabilidad a través del tiempo de todo el sistema. Por lo que resulta sumamente importante conocer los principales parámetros involucrados en todo el sistema, desde la verificación de la calidad de transmisores, receptores, MUX/DEMUX, fibra óptica y amplificadores ópticos.

3.1 PARAMETROS DE TRANSMISORES

Los sistemas DWDM deben su ventaja de ancho de banda al uso de múltiples canales a diferentes longitudes de onda. todas estas deben estar dentro del rango de longitudes de onda del EDFA y deben controlarse adecuadamente las características de las fuentes de luz para cada canal.

Requerimientos de transmisores

Existen parámetros técnicos muy especializados de los transmisores láser que solo el fabricante del equipo DWDM puede controlar durante el diseño, también existen otros que se consideran durante la homologación y evaluación del sistema antes de instalarse en la planta telefónica. A continuación se mencionan algunos de estos requerimientos:

- El corrimiento espectral típico en los láser DFB debe ser menor a $0.1\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ y $0.01\text{nm}/\text{mA}$.
- El corrimiento por envejecimiento no debe ser mayor a $0.001\text{nm}/\text{año}$.
- La sensibilidad típica dependiente de la temperatura es de $0.002\text{nm}/^{\circ}\text{C}$.
- El transmisor debe de permanecer dentro del ancho de banda de diseño y no debe de desplazarse de su longitud de onda central con el paso del tiempo.
- La potencia de salida debe de permanecer estable a través del tiempo.

- El láser debe estar aislado ópticamente y no debe ser afectado por reflexiones transitorias del medio de transmisión especialmente las que provienen del primer amplificador de línea.

De acuerdo a lo anterior los parámetros de diseño deben de proveer un láser altamente estable para evitar en el corto plazo el costoso cambio de módulos transmisores.

En las aplicaciones DWDM los parámetros prácticos y más críticos de los diodos láser son:

- La longitud de onda central.
- La potencia de salida.

Longitud de onda central. Esta se define como la longitud de onda en el punto medio de 3 dB abajo del pico de potencia. Tal como se indica en la *figura 13*. Esta longitud de onda central es muy importante ya que nos indica con precisión la capacidad de la fuente de luz de comunicarse fielmente con el receptor. Este valor se debe medir durante:

- La instalación para verificar que se cumple con las especificaciones del fabricante y con la recomendación G.692.
- Debe monitorearse durante los programas de mantenimiento para detectar corrimientos del valor central.
- Debe monitorearse sobre todo en los sistemas con espaciamentos muy estrechos (0.78 y 0.39 nm).

La longitud de onda central se define como longitud de onda en el punto medio de 3 dB abajo del pico de potencia. Tal como se indica en la *figura 13*.

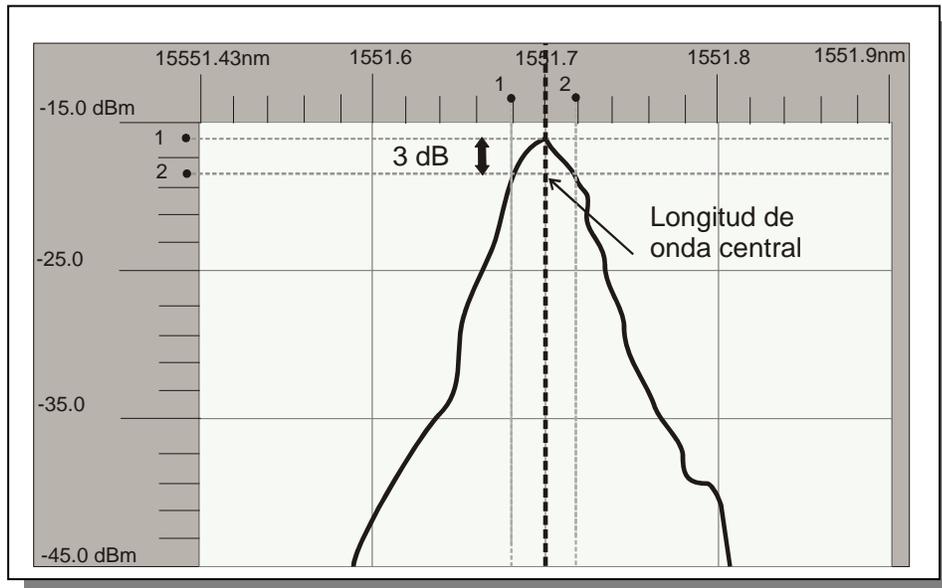


Figura 13. Interpretación de la longitud de onda central.

Es importante considerar que no todos los picos de potencia son simétricos en algunos casos muestran un rizo, por lo que es importante la referencia de 3 dB para obtener el punto medio y determinar la longitud de onda central. Para ello se utiliza un analizador de espectros ópticos “OSA” (Optical Spectrum Analyser). En la figura anterior el cursor vertical indica la longitud de onda central del láser DFB.

Potencia de salida

La potencia de salida se debe medir utilizando un medidor de potencia o un analizador de espectros ópticos (OSA) y de ser necesario a través de un atenuador variable, considerando las pérdidas de inserción del equipo de medición.

Se debe verificar este valor de acuerdo a las especificaciones del fabricante del equipo. De ser posible debe medirse en cada convertidor de longitud de onda.

En la *figura 14*. Se indica el valor del pico de potencia del láser DFB en la intersección de los cursores.

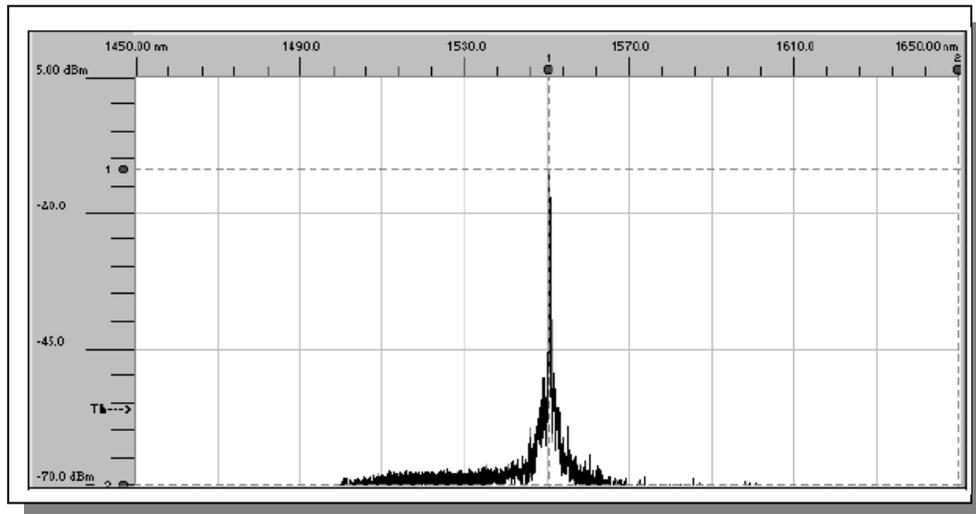


Figura 14. Potencia del láser DFB.

Recordemos que en DWDM el diodo láser se utiliza a la salida de los transponder para proveer la longitud de onda de uno de los canales especificados en el plan de asignación de longitudes de onda de acuerdo a la UIT-T.

3.2 PARAMETROS DE RECEPTORES

La función del receptor es proveer al demodulador con la señal eléctrica lo mas limpia posible. El desempeño del receptor se mide por la tasa de errores “BER” (Bit Error Rate) que entrega una señal de recepción dada.

El desempeño total de un receptor se describe mediante una curva de sensibilidad, en el cual se grafica el BER en función de la potencia recibida para una velocidad determinada. Estas curvas aplican solo para condiciones de operación particulares y dependen de cada proveedor.

Parámetros críticos

Los parámetros críticos que se relacionan con los detectores son:

- La *sensibilidad* es el parámetro más importante de los receptores y se mide utilizando un medidor de BER, un atenuador, y un medidor de

potencia. Se debe comprobar que el sistema no introduzca errores para una tasa de errores determinada y a un nivel mínimo de potencia.

- La *diafonía óptica* por canal es una indicación de la contribución de energía no deseada en un canal debido a la potencia de los otros canales, este valor se recomienda verificar una vez que se haya completado todo el enlace del sistema. Para medir diafonía óptica utilizando un analizador de espectro óptico se debe cortar la transmisión de un canal óptico en el sistema DWDM, y en el extremo remoto verificar en el espectro la influencia de los otros canales sobre el canal que se está probando. Es importante verificar que este parámetro se encuentre dentro de las especificaciones del fabricante, para que el detector tenga una tasa de errores adecuada.

El fotodetector que se utiliza a la entrada de los transponder, y que en caso de utilizar transponder en el extremo de recepción, a la salida del transponder de recepción se tiene el canal UIT-T correspondiente, en esta salida es donde se puede medir la diafonía óptica.

En caso de no utilizar transponder la salida del DEMUX DWDM se acopla directamente al receptor SDH el único requisito es que el receptor pueda detectar entre otras la longitud de onda proveniente del DEMUX.

3.3 PARAMETROS DE MULTIPLEXORES Y DEMULTIPLEXORES

El desempeño de los MUX y DEMUX depende de la capacidad que tienen para aislar los canales entrantes o salientes. A continuación listamos los parámetros más importantes que involucran a los MUX/DEMUX:

- Longitud de onda central de canales
- Espaciamiento de canal
- Ancho de banda de canal
- Diafonía
- Uniformidad de la potencia de salida
- Pérdida de inserción
- Pérdida óptica de retorno
- Relación señal a ruido óptica OSNR

Longitud de onda central

Los canales transmitidos deben de estar operando cerca del valor nominal de longitud de onda, usualmente una de las longitudes de onda de la recomendación UIT-T. Se interpreta como se explico en los parámetros del transmisor.

Espaciamiento de canal

En las redes existentes se utilizan espaciamientos regulares, donde el mas común es el de 100GHz de acuerdo a la UIT-T, y los espaciamientos irregulares donde la separación de canales se utilizan para minimizar o predecir la aparición de efectos no lineales tales como el FWM.

En la *figura 15* se muestra la separación irregular de canales para un sistema de 3 canales. Esta separación puede deberse al uso de fibras de dispersión corrida y para evitar los efectos no lineales.

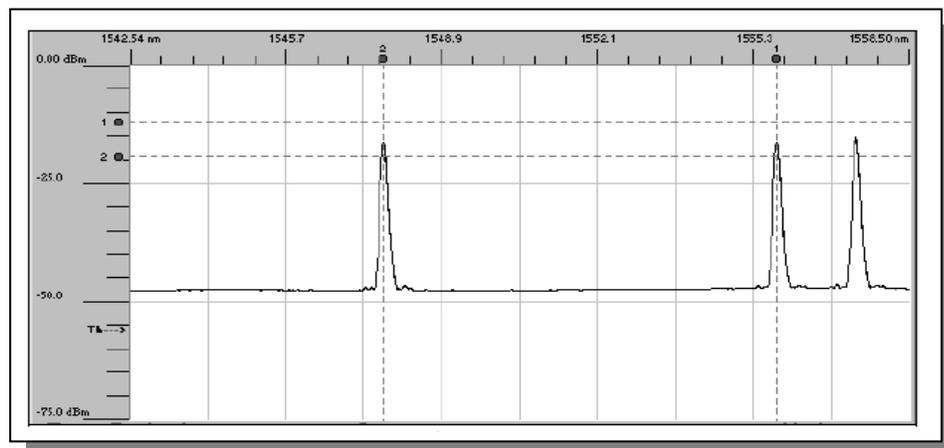


Figura 15. Separación irregular de canales.

Ancho de banda de canal

El ancho de banda de cada canal se refiere al ancho espectral situado a 3dB abajo del pico de potencia. El valor debe ser mucho menor que el espaciamiento de canal, por ejemplo en el caso de un espaciamiento de 0.78nm (0.8nm) el ancho espectral debe ser menor que 0.2nm. *Figura 16*

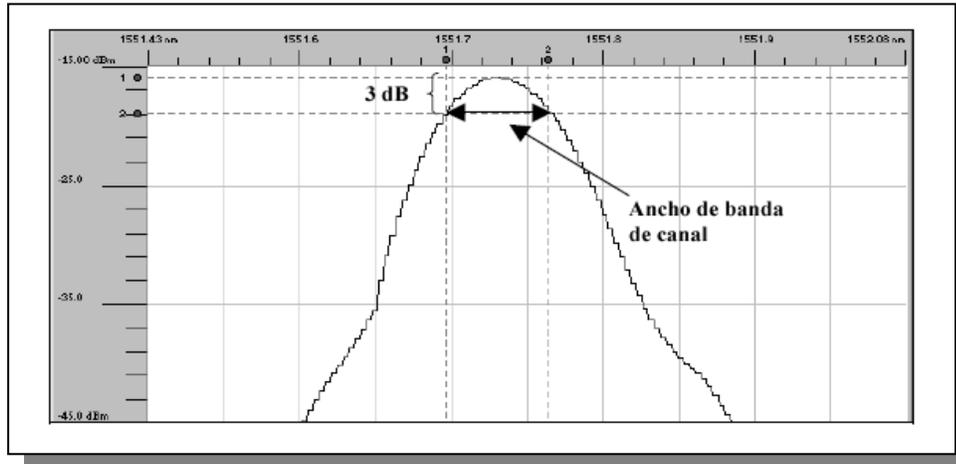


Figura 16. Ancho de banda de canal.

Diafonía

Verificando que no existan corrimientos de la longitud de onda central de cada canal y que el ancho espectral de cada canal sea el correcto se asegura que la diafonía entre canales sea mínima. El fabricante del equipo se encarga de proveer un alto aislamiento entre canales del MUX o DEMUX para garantizar baja diafonía. Ejemplo de diafonía *figura 17*.

Nuevamente se recomienda verificar la diafonía una vez que se haya completado todo el enlace del sistema

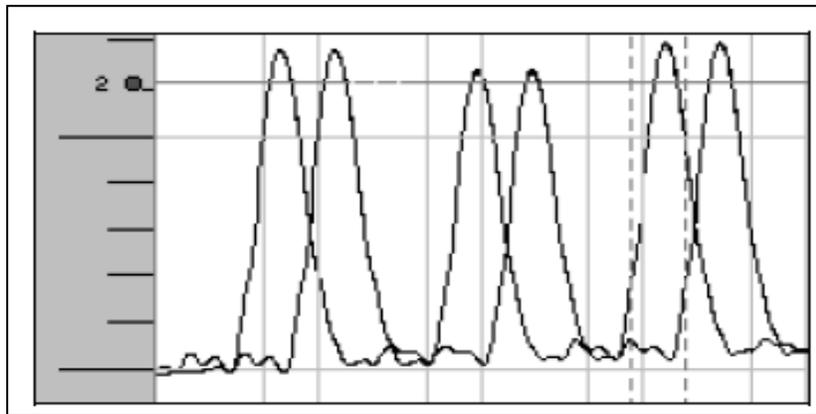


Figura 17. Canales con corrimiento de longitud de onda presentando diafonía.

Uniformidad de la potencia de salida

La uniformidad de la potencia de salida de un multiplexor es la variación pico a pico en las potencias de todos los canales medidos con un analizador de espectros. La máxima variación permitida es de 3 dB para evitar introducir serias inconsistencias entre las características de las diferentes señales de los canales. En la *figura 18*. Se muestra un espectro de 8 longitudes de onda y se observa que entre todas ellas se tiene una diferencia dentro del rango de los 3dB, por lo que se considera buena la uniformidad de canales.

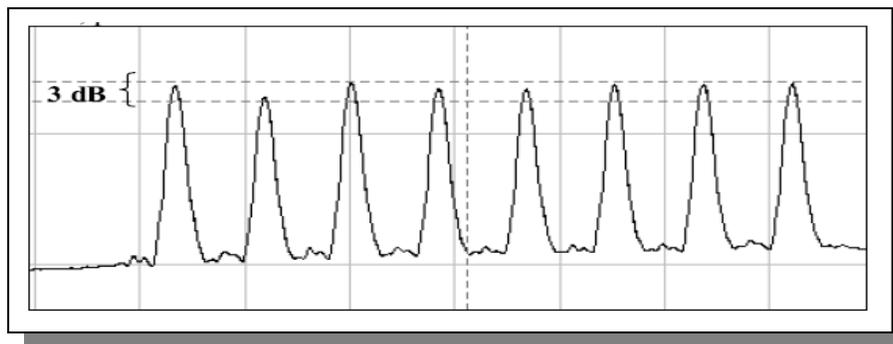


Figura 18. Uniformidad de la potencia de salida.

Perdida de inserción

La pérdida de inserción de un componente es la diferencia entre la potencia de entrada y la de salida, con esto se cuantifica la pérdida de potencia en el dispositivo para una longitud de onda en particular o sobre una región espectral dada.

La pérdida de inserción debe ser la mas baja posible y debe de controlarse en el presupuesto de pérdidas que aplica el fabricante en el diseño.

Perdida óptica de retorno (Reflectancia)

Cuando la luz se inyecta a un componente de fibra óptica, tal como un conector, un multiplexor, empalme o incluso la misma fibra, parte de la energía es transmitida, parte es absorbida y otra tanta es reflejada. La potencia óptica reflejada es indeseable debido principalmente a:

- Contribuye en las pérdidas de potencia total.

- Los transmisores láser de alto desempeño utilizados en DWDM son muy sensibles a la luz reflejada la cual puede contribuir significativamente a la degradación de la estabilidad del láser y la relación señal a ruido del sistema. En una situación extrema una fuerte reflexión puede dañar el láser.
- Las reflexiones ocurren dentro del amplificador óptico EDFA, especialmente la interferencia por multitrayectorias puede contribuir a la amplificación del ruido.

Los valores de reflectancia deben de estar por debajo de los -50 dB para el caso de los MUX y DEMUX.

Relación señal a ruido óptica (OSNR)

La relación señal a ruido óptica (OSNR) determina el BER del sistema y es recomendable medir una vez que se tenga el enlace completo DWDM.

Este valor es una indicación de la legibilidad de la señal recibida; es un parámetro de creciente interés como el límite para las aplicaciones de larga distancia, ya que al incrementar la cantidad de amplificadores de línea la plataforma de ruido se acerca más a la señal de información.

El valor medido en cualquier punto del enlace debe ser siempre *mayor a* $+18$ dB.

Para medir la OSNR en un espectro óptico es necesario medir desde la parte más alta del pico de potencia hasta la plataforma de ruido de cada canal recibido. En la *figura 19*. Se indica el valor OSNR para el canal 1.

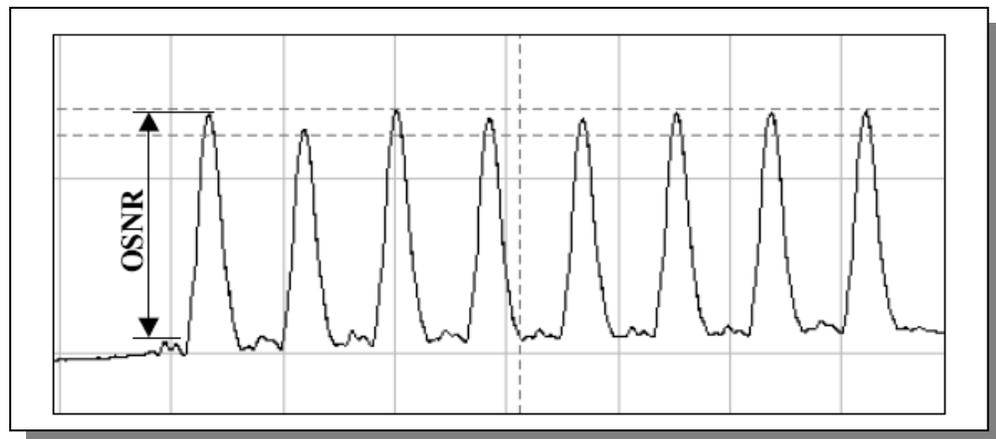


Figura 19. OSNR del canal 1.

3.4 PARÁMETROS DE LA FIBRA OPTICA

A continuación listamos los parámetros que limitan más el desempeño de la fibra óptica en los sistemas DWDM:

- Dispersión cromática.
- Dispersión del modo de polarización (PMD).
- No linealidades.

3.4.1 Dispersión cromática

La dispersión cromática es consecuencia de que las diferentes longitudes de onda se propagan a diferentes velocidades. Los transmisores emiten luz que contiene una combinación de longitudes de onda. Cada longitud de onda, dentro de una señal de luz compuesta, viaja a una velocidad diferente. En consecuencia, los rayos de luz que simultáneamente se emiten de un transmisor, y se propagan por una fibra óptica, no llegan al extremo lejano de la fibra al mismo tiempo.

La dispersión cromática ocasiona que el ancho de pulso se incremente al pasar a través del enlace de fibra. La dispersión cromática de un enlace de fibra es acumulativa con la distancia, y este cambio en el retardo de grupo por unidad de longitud de onda se expresa en ps/nm, en las especificaciones de la fibra se da un coeficiente de retardo en unidades de ps/ (nm.Km).

¿Que incrementa la dispersión cromática?

- Al incrementar el número y longitud de los tramos de fibra del enlace.
- El incremento en la velocidad de bit.
- No se afecta con el incremento del número de canales ni con la disminución del espaciamiento de canales.

Como disminuir los efectos de la dispersión cromática

- Disminuir el valor absoluto de la dispersión cromática de la fibra.
- Compensar la dispersión, utilizando módulos compensadores de dispersión en los amplificadores ópticos.

- La dispersión cromática requiere más atención en sistemas DWDM que utilizan fibra tipo G.652 debido a que la dispersión es alta en la región de 1550nm.

En la *figura 20* se observan los valores típicos de dispersión cromática.

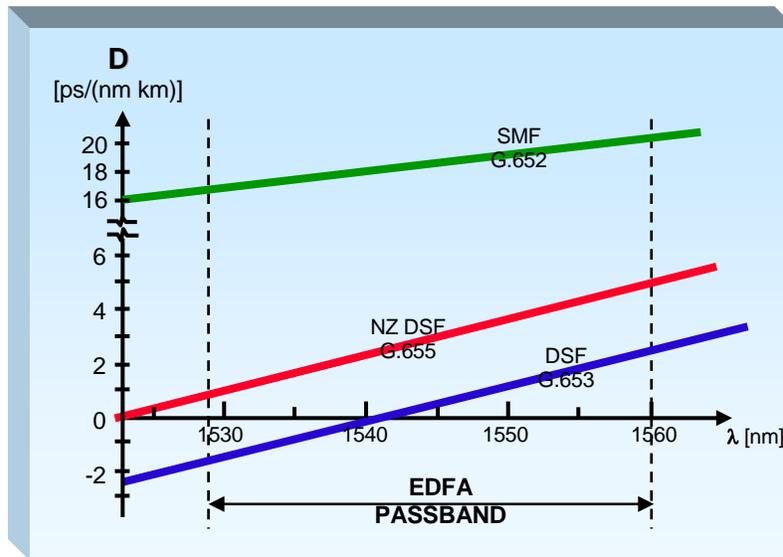


Figura 20. Grafica de dispersión cromática vs espectro óptico por tipo de fibra.

En la *figura 21* se observa la limitante en términos de distancia del enlace debido a la dispersión cromática considerando la característica de tráfico a transportar.

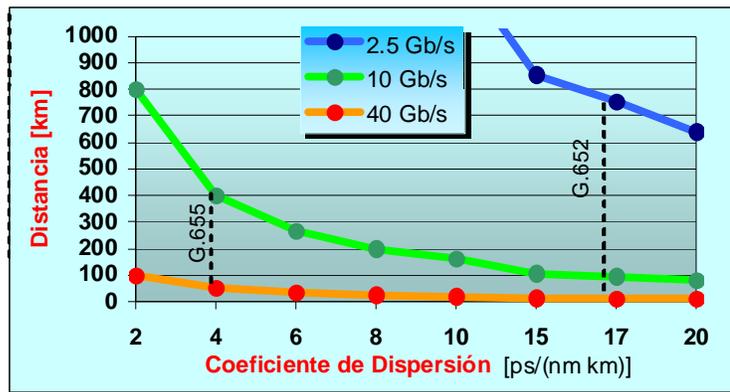


Figura 21. Límites de la dispersión cromática en relación a la distancia.

3.4.2 Dispersión del modo de polarización (PMD)

Los pulsos ópticos viajan en una fibra monomodo en dos modos de polarización. En el mundo ideal los dos modos viajan a la misma velocidad. En el mundo real, los dos modos viajan a velocidades ligeramente diferentes. Esto se llama dispersión del modo de polarización (PMD). Esta diferencia en las velocidades se traduce en una diferencia de tiempo de tránsito a través de la fibra, provocando el ensanchamiento del pulso (dispersión). Esta Diferencia en tiempo de tránsito se llama retardo de grupo diferencial (DGD)

En las *figuras 22 y 22-a* .se muestran de manera grafica el fenómeno de PMD.

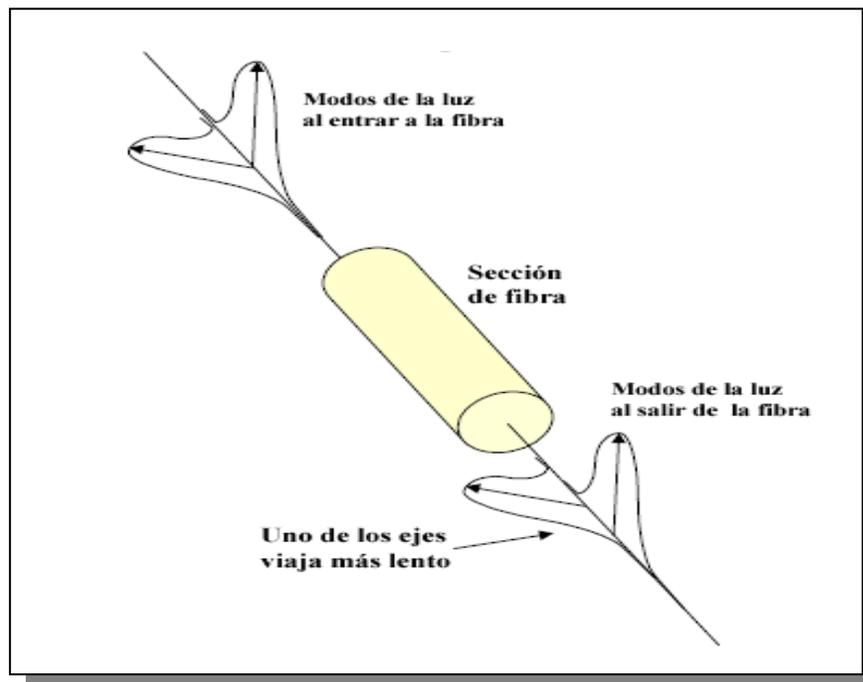


Figura 22. Efecto PMD en las secciones de fibra.

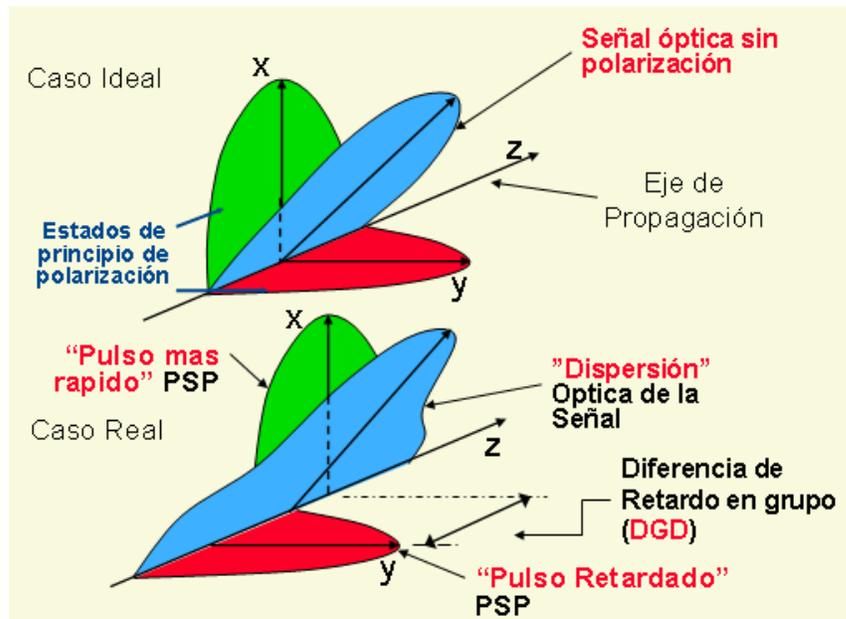


Figura 22-a. Efecto PMD en la fibra óptica

El PMD es un parámetro muy importante cuando se pretende instalar sistemas DWDM usando las fibras G.652 que fueron instaladas en los años 80s (Alrededor de 80 millones de kilómetros de fibra óptica fueron instalados en el mundo), no es tan crítico para los sistemas que se requieran instalar usando las nuevas fibras G.653 y G.655.

En los 80s el efecto del PMD no se reconocía o no se entendía. El mezclar fibras de los 80s con las nuevas ocasiona serios problemas de PMD cuando se pretende actualizar la capacidad de las redes a STM-64 (10 Gb/s).

Especialmente cuando los canales DWDM transportan sistemas STM-16 (2.5 Gb/s) y STM-64 a través de enlaces de larga distancia. que tienen muchas secciones de fibra óptica. se vuelve crítico el efecto de PMD.

¿Cómo se mide el PMD?

El valor instantáneo de PMD para una longitud de onda particular varía con el tiempo de manera aleatoria debido a los esfuerzos cambiantes en la fibra (la temperatura, la vibración, etc.) y el acoplamiento de los modos de polarización a lo largo del tramo de fibra.

El PMD se mide en pico segundos (ps) para un segmento de fibra instalada. Las unidades que aparecen en las especificaciones de la fibra óptica son el coeficiente que caracteriza la propia fibra y se da en ps/\sqrt{km} .

Regla de concatenación para determinar el PMD de un enlace, se deben promediar los valores medidos de las secciones del enlace de acuerdo a la fórmula 1.

Fórmula 1

$$PMD = \sqrt{PMD1^2 + PMD2^2 + \dots PMDn^2}$$

¿Qué valores de PMD están permitidos?

La ITU-T propone los siguientes valores máximos en función de la velocidad que se transporta en el canal óptico.

2.5 Gb/s (STM-16) PMD Max = 40 ps

10 Gb/s (STM-64) PMD Max = 10 ps

En la práctica es muy recomendable considerar los siguientes valores como adecuados.

2.5 Gb/s (STM-16) PMD Max = 20 ps.

10 Gb/s (STM-64) PMD Max = 5 ps.

Las causas que ocasionan el PMD en la fibra son los esfuerzos en el núcleo debidos de lo siguiente:

la construcción de la fibra:

- Núcleo elíptico de la fibra en algunos tramos
- Material del núcleo no homogéneo

causas externas de la fibra:

- Diseño del cable de fibra
- El método de instalación
- Cambios ambientales (la temperatura, vibración, etc.)

Problemas que ocasiona el PMD en las redes DWDM

- El PMD es un fenómeno crítico que limita la velocidad de transmisión.
- A mayor velocidad transportada el ensanchamiento del pulso es mayor y el receptor produce un BER alto.
- Al viajar mas despacio uno de los ejes el pulso se ensancha.
- Si el enlace es muy grande al final de los pulsos prácticamente estarán sobrepuestos imposibilitando su interpretación en el receptor.

¿Cómo disminuir el PMD de un enlace de fibra óptica?

Es importante verificar el adecuado valor del PMD, sobretodo si el PMD total se encuentra dentro de los límites tolerados o existen demasiadas conmutaciones al equipo de protección de los sistemas STM-16, STM-64 o DWDM que transporte estas velocidades. Las soluciones para los casos de PMD alto se listan a continuación:

1. Reducir los presupuestos de potencia de las secciones de fibra
 - Para PMD entre 4 y 9 ps, reducir el presupuesto de potencia por 1 dB en cada sección.
 - Para PMD entre 9 y 14 ps, reducir el presupuesto de potencia por 2 dB en cada sección.
2. Para PMD mayor a 14 ps. Las terminales deben tener circuitos de corrección de errores FEC (solo para el STM-64), e incorporar protección en el sistema considerando que por lo menos va a existir un corte al año.
3. Reducir los números de secciones.
4. Para PMD mayores a 22 ps el BER es peor que 10^{-7} , por lo que lo recomendable es cambiar secciones de cable de fibra óptica o todos los cables de la fibra del enlace.

Coeficientes nominales de PMD.

En la tabla 5 se muestran los coeficientes nominales de PMD para las fibras ópticas mas utilizadas.

	NOMINAL	TIPICA	Fuente Principal
G.652	0.5	0.02-0.5	Estres externo
G.653	0.5	0.3-1.0	Extres Interno; Core Eliptico
G.655	0.5	< 0.2	Extres Interno
DCF	0.5	0.2-0.5	Core Eliptico; Extres Interno

Tabla 5. Coeficientes nominales de PMD para las fibras más utilizadas.

Limites de PMD en relación a la distancia.

En la figura 23 se muestran los de la distancia de transmisión debido al coeficiente PMD

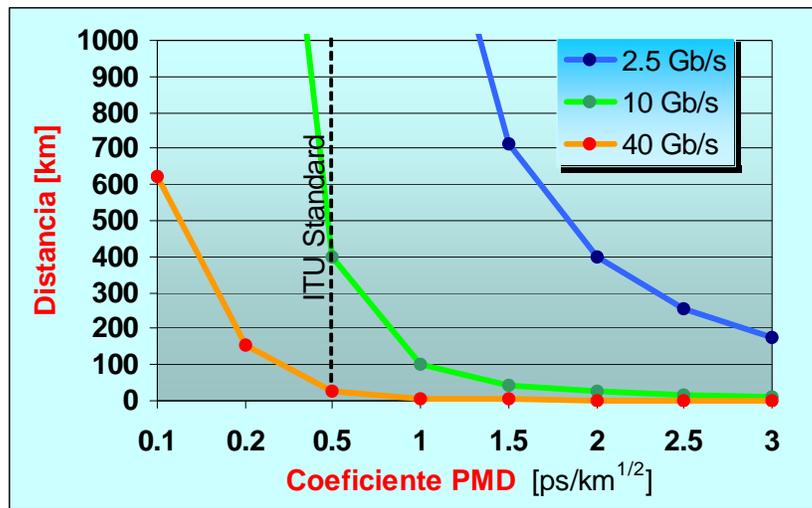


Figura 23. Limites de la distancia debido a el coeficiente de PMD

Mediciones reales de PMD en una red para DWDM

En la figura 24 se muestra una grafica de PMD para diferentes fibras de la red Walford – Amersham y se puede observar que el coeficiente varia de fibra a fibra.

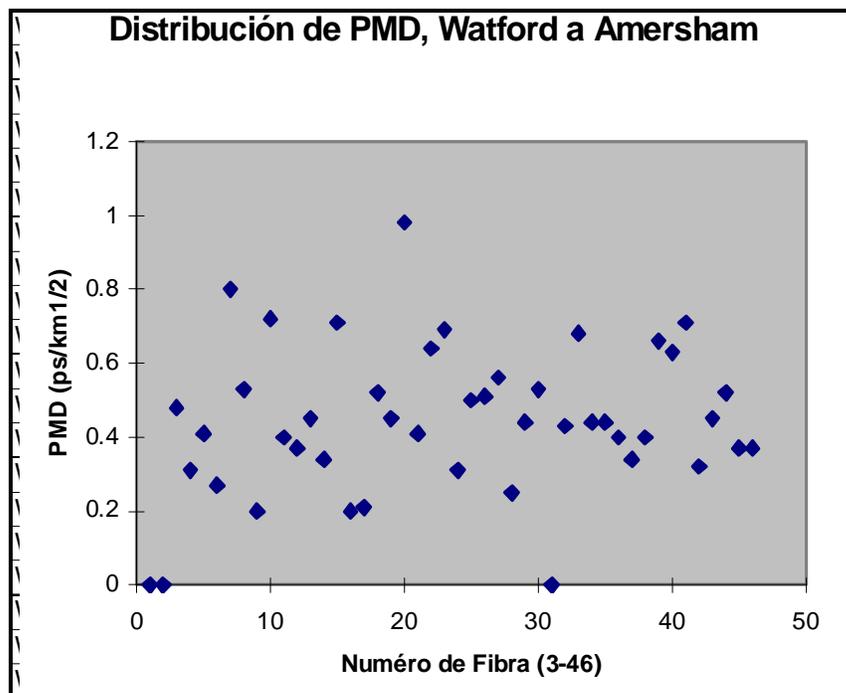


Figura 24. Mediciones reales de PMD

Mediciones de PMD durante toda una noche

En la figura 25 se muestra la grafica de PMD de una sola fibra de la red de Walford – Amersham tomada durante toda la noche. Se puede observar que el comportamiento es variable respecto al tiempo debido a factores ambientales naturales o a sucesos indirectos ocasionales.

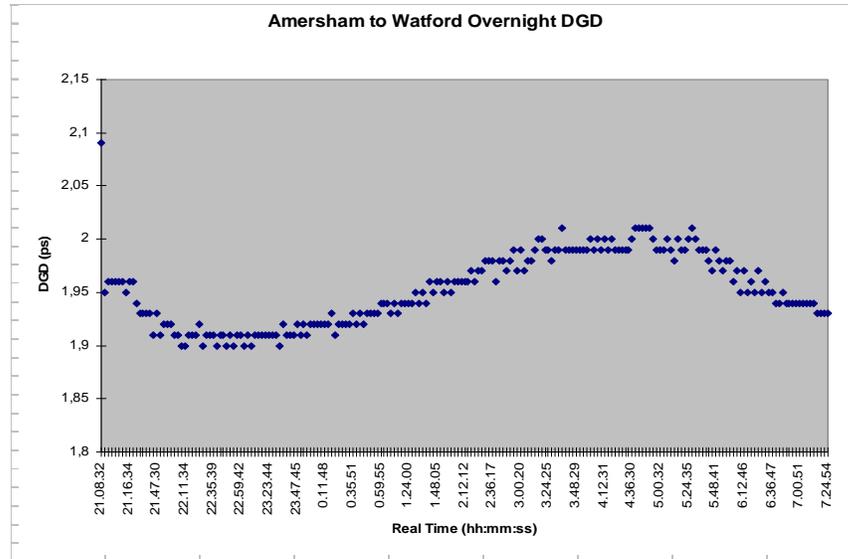


Figura 25. Mediciones PMD durante toda la noche

3.4.3 Efectos no lineales

Es importante entender los principales efectos no lineales que aparecen en las fibras ópticas para comprender la necesidad de los nuevos tipos de fibra que se requieran para que los sistemas DWDM trabajen adecuadamente.

Los efectos no lineales en las fibras ópticas tienen efectos similares como los comportamientos no lineales en otros sistemas físicos, sean mecánicos o electrónicos. Causan la generación de falsos armónicos por la suma y diferencia de frecuencias. Estas señales agregadas causan pérdidas inesperadas en las redes ópticas de comunicaciones.

Los efectos no lineales que más perjudican el desempeño de la fibra óptica son:

- Modulación de auto-fase
- Modulación de fase cruzada
- Mezclado de cuatro ondas (FWM)

3.4.4 Modulación de auto-fase

Es la modulación sobre la propia fase de la señal óptica cuando la intensidad de la señal láser es demasiado alta. Esta modulación ensancha o comprime la señal, dependiendo del signo (positivo o negativo) de la dispersión cromática.

En DWDM el ensanchamiento espectral creado por la modulación de auto-fase en un canal óptico interfiere con los canales adyacentes.

- **La modulación de auto-fase se incrementa con:**
 - un incremento en la potencia inyectada en el canal.
 - incremento en la velocidad del canal.
 - dispersión cromática negativa.

En DWDM la modulación de fase es más problemático en fibras G.692 (dispersión cero a 1310nm) que en las fibras de dispersión corrida o en las NZDSF.

- **La modulación de auto-fase se decreta con:**
 - dispersión cromática cero o con un pequeño valor positivo.
 - incrementando el área efectiva de la fibra.
 - compensando la dispersión.

En la figura 26 y 26-a se muestra como es el fenómeno de auto-fase

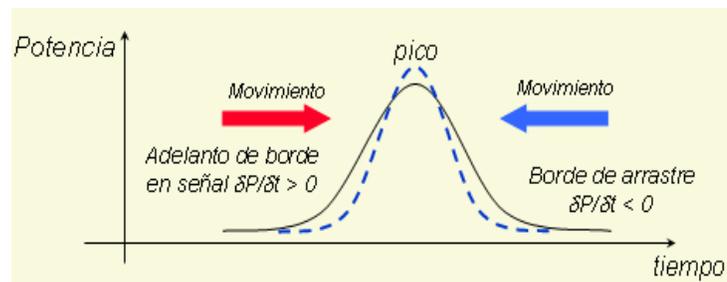


Figura 26. Caso típico de compresión del pulso de señal debido a auto-fase

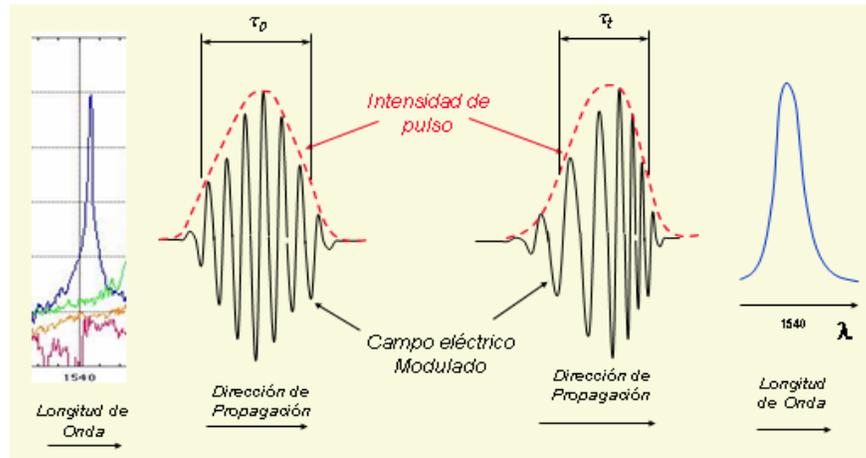


Figura 26-a. Compresión de pulso en auto-fase

3.4.5 Modulación de fase cruzada

En este tipo de modulación en la fibra óptica la señal de un canal modula la fase del canal adyacente.

La modulación de fase cruzada es sensible a los mismos factores que la modulación de auto-fase, así como al incremento en el número de canales, esta no se afecta por la disminución en el espaciamiento de canales.

La modulación de fase cruzada se disminuye mediante:

- El incremento del área efectiva.
- Compensación de la dispersión.

La modulación de fase cruzada no es tan importante cuando los sistemas DWDM se instalan en fibras de área efectiva grande como la fibra de tipo LEAF.

En la figura 27 se muestra el fenómeno de fase cruzada.

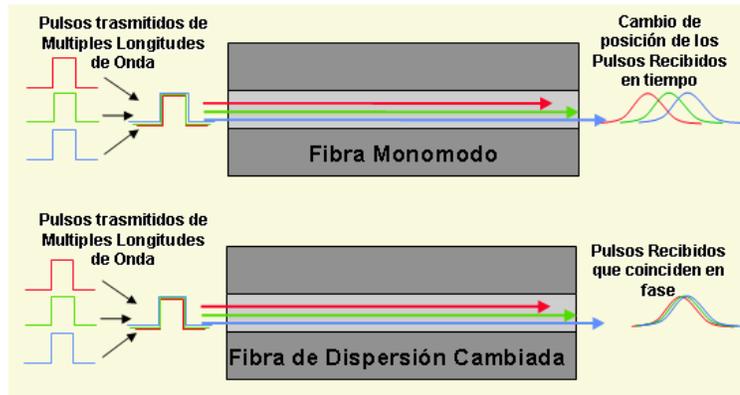


Figura 27. Fenómeno de fase cruzada

3.4.6 Efecto FWM (Four Wave Mixing)

El mezclado de cuatro ondas (four wave mixing) es uno de los efectos no lineales que ocasionan mas trastornos en los sistemas WDM, se produce cuando la intensidad de la señal láser alcanza niveles críticos y aparecen señales fantasma en el espectro óptico una vez que la señal pasa a través de la fibra de dispersión cero. Estas señales pueden confundirse con los verdaderos canales y ocasionar graves problemas de interferencia en el receptor.

Es muy critico en sistemas que utilizan fibras de dispersión corrida G.653. Su efecto se anula utilizando fibras de dispersión no-cero NZDSF (G.655) y fibras de área efectiva grande.

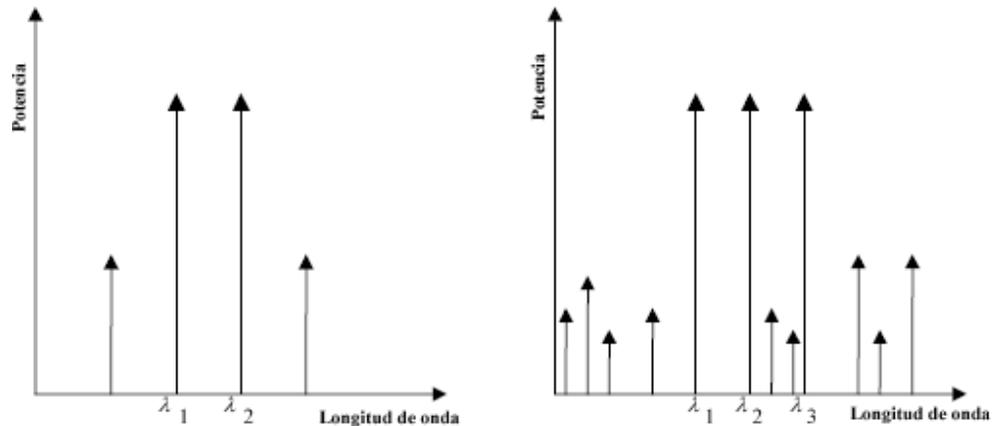
El número de canales fantasma se obtiene con la formula 2.

Formula 2:

$$\frac{N^2(N-1)}{2}$$

Donde N es el número de canales

De acuerdo a esta expresión para 2 canales se obtienen dos canales fantasma, para 3 canales se obtienen 9 canales fantasma, para un sistema de 4 canales se obtienen 24 canales fantasma, para 8 canales se obtienen 224 canales fantasma y para 16 canales se obtienen 1920 canales fantasma.



3.5 PARÁMETROS DE AMPLIFICADORES OPTICOS

Los amplificadores ópticos EDFAs son muy importantes para la operación económica de las redes DWDM. Debido a que proveen amplificación transparente para todos los canales sin considerar los esquemas de modulación o protocolos de las señales que transportan. El amplificador óptico permite que la señal óptica se transmita a través de largas distancias sin necesidad de recuperar y regenerar la señal transportada.

La ganancia es la función esencial de un amplificador, la amplificación óptica es uno de los parámetros más importantes a medir. La ganancia depende de muchos parámetros que, separadamente o juntos pueden modificar la actuación del dispositivo. La ganancia varía con la longitud de onda de la señal, estado de polarización de entrada, y potencia. Los parámetros más críticos de un amplificador óptico son:

- Ganancia
- Emisión amplificada espontánea (ASE)
- La figura de ruido (NF)

Ganancia

La ganancia varía con la longitud de onda de la señal, estado de polarización de entrada y potencia. En la curva de ganancia de la *figura 28*. Se muestran las características de ganancia a través del espectro de 8 canales, el cual cambia dependiendo de la relativa potencia de entrada de cada canal.

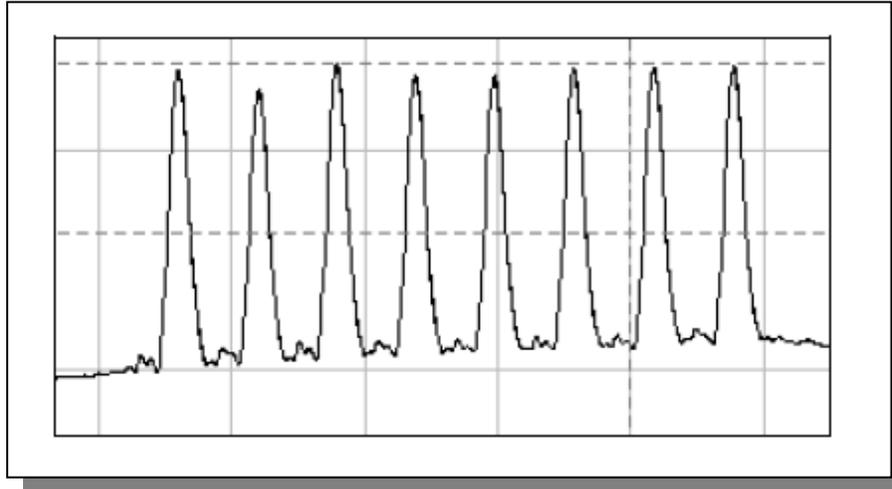


Figura 28. La ganancia puede variar de una longitud a otra.

La ganancia se obtiene mediante la relación de la potencia de salida menos la potencia de ruido (ASE) dividida entre la potencia de entrada al amplificador.

Amplificación de emisión espontánea (ASE)

La principal fuente de ruido de un amplificador óptico es la amplificación de emisión espontánea (ASE). Esta emisión de ruido es producida cuando se logra la amplificación en la fibra dopada con erbio y se transmiten en ambas direcciones dentro de la fibra.

La contribución de la ASE en las regiones de operación de un amplificador óptico no es significativa, sin embargo en un enlace muy largo donde se tenga una gran cantidad de repetidores la contribución de ruido puede ser significativa y limitaría el alcance máximo.

Figura de ruido

La figura de ruido (Noise Figure NF) se define como la degradación de la SNR (relación señal a ruido) de la señal después de pasar a través del amplificador óptico. Frecuentemente existe confusión en este punto ya que la SNR a que se refiere es en términos de la radio frecuencia (RF), es decir la banda base de la señal que lleva la información, y no directamente la relación señal a ruido óptica (OSNR) de la portadora óptica que se observa con el analizador de espectros ópticos.

Este valor es una especificación del fabricante del amplificador, y normalmente se tiene valores menores a 8 dB.

3.6 MEDICIÓN Y EQUIPO DE PRUEBA EN REDES DWDM

Las técnicas de medición y prueba estandarizadas son importantes precisamente para definir los parámetros bajo los cuales los sistemas ópticos y sus componentes trabajaran. En la evaluación del rendimiento de un sistema, todos los componentes presentes en el sistema deben ser considerados. Las técnicas para medir sistemas de fibra óptica caen en dos categorías principalmente: **pruebas funcionales y pruebas de rendimiento**. Las pruebas funcionales involucran determinados componentes del sistema de fibra óptica. Por ejemplo, examinar la continuidad de la fibra con el uso de un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo representa una prueba funcional. Las pruebas de rendimiento, tienen que ver con el funcionamiento del sistema comparado con el funcionamiento esperado, determinado por las pérdidas en el enlace óptico.

EQUIPO DE PRUEBA PARA FIBRA OPTICA

El equipo para instalación y solución de fallas es una parte importante en los sistemas de fibra óptica. Existe una gran variedad de equipos de prueba que se usan actualmente los cuales se muestran a continuación.

Medidor de potencia óptica.

Este instrumento mide la cantidad de potencia óptica en la fibra. Muchos modelos manejan varias longitudes de onda y proporcionan medidas en dB relativos y dB absolutos o watts. Usualmente se necesitan adaptadores para trabajar con diferentes tipos de conectores ópticos. La figura 30 muestra un ejemplo típico de equipo medidor de potencia.



Figura 30. Medidores de potencia óptica.

Fuente de luz óptica.

Una fuente de luz óptica inyecta una señal de luz estable dentro de la fibra. Muchos modelos ofrecen funciones de onda continua. Algunos ofrecen funciones de modulación. Típicamente las frecuencias de modulación son de 270 Hz, 1 kHz y 2 kHz. La figura 31 muestra un ejemplo de equipo fuente de luz láser.



Figura 31. Equipo generador de luz láser para fibra óptica.

Medidor de pérdidas óptico.

Este instrumento combina un medidor de potencia óptica y una fuente de luz óptica en un solo instrumento. También se le conoce como optical loss test set (OLTS).

Identificador de fibra.

Un identificador de fibra localiza la ruta de la fibra. Esto se logra inyectando una señal identificadora dentro de la fibra, usando un mecanismo de filtrado provoca que una pequeña cantidad de luz sea detectada y escape fuera de la fibra.

Esta luz que escapa es capturada y procesada para determinar si es igual a la señal identificadora. La figura 32 muestra un ejemplo de equipo para identificar fibra óptica.



Figura 32. Equipo de identificación de fibra óptica

Equipo de comunicación.

Son usados para coordinar actividades de mantenimiento en la fibra óptica. Frecuentemente las fibras son enterradas o protegidas en cuartos donde el walkie-talkie (intercomunicador de radio portátil) es inservible. En estos casos, la misma fibra es el mejor medio para poder comunicarse. Los talkset (intercomunicadores) son habilitados para funcionar en una o dos fibras y obtener comunicación half-duplex (solo un sentido) o full-duplex (doble

sentido). La figura 33 muestra un ejemplo de equipo de comunicación por fibra óptica.



Figura 33. Equipo de comunicación de voz por fibra óptica

Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR).

Los OTDRs son los instrumentos más utilizados en la instalación y diagnóstico, hoy en día. Para ejemplificar este importante equipo de prueba vemos en la Figura 34 la pantalla de salida de un OTDR moderno, en este ejemplo, el OTDR está examinando dos tramos de fibra interconectados. La longitud de onda usada es de 1310nm. El primer tramo de fibra no presenta anomalías en sus 19.3784 Km de longitud. El promedio de atenuación del primer tramo de fibra es de 0.505 dB/km. Al final del primer tramo el conector causa considerable refracción de retorno “back reflection” (-13.72 dB) e introduce 1.404 dB de pérdida. El segundo tramo de fibra es de 19.397 Km. de largo y tiene un promedio de atenuación de 0.353 dB/km. El conector al final del segundo tramo de fibra también tiene una fuerte refracción de retorno “back reflection” de -14.56 dB. La región después del segundo conector es ruido. La figura 35 muestra un ejemplo físico de un equipo OTDR.

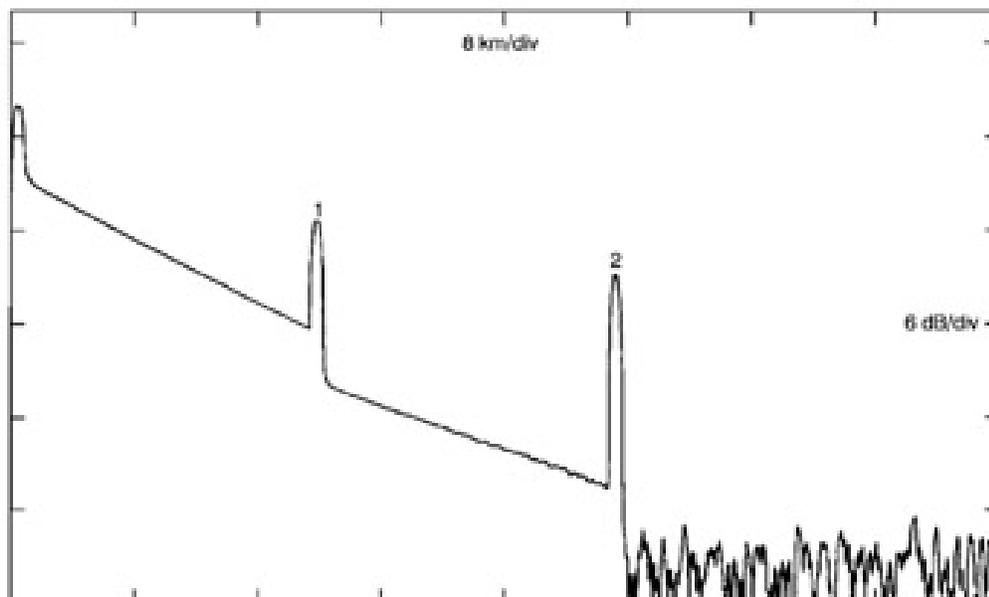


Figura 34: Optical Time Domain Reflectometer Screen (Pantalla del reflectómetro óptico en el dominio del tiempo).

En la tabla 6 se muestran los valores configurados en el equipo de medición para obtener las mediciones de OTDR de la figura 34.

Parámetros en el equipo de medición configurados para obtener el OTDR de la figura 34

Wavelength (longitud de Onda)	Pulse Width (ancho del pulso)	Range (rango)	Pt. Space (espacio entre puntos)	R. Index (índice de refracción)	Backscatter (dispersión de retorno)
1310 nm	500 m	64 km	10.000 m	1.4660	-79.20 dB
Event No. (número de evento)	Location (localización)	Loss (dB) (perdida)	Atten (dB) (atenuación promedio)	Refl (dB) (reflectancia)	
1	19.3784 km	1.404	0.505	-13.72	
2	38.7754 km	5.207	0.353	-14.56	

Tabla 6. Valores de configuración de equipo OTDR.



Figura 35. Equipo para mediciones ópticas OTDR.

Analizador de espectro óptico.

El analizador de espectro óptico determina la longitud de onda de luz y es parte esencial en la puesta en servicio inicial del sistema DWDM así como también para la detección de fallas. Esta herramienta determina el espectro de la fuente de luz. La figura 36 muestra un equipo OSA (analizador de espectro óptico)



Figura 36. Equipo analizador de espectro óptico OSA

Atenuador óptico.

Un atenuador óptico, simula las pérdidas causadas por la longitud de un tramo de fibra. Típicamente este instrumento funciona en el lado receptor. Mientras que un atenuador óptico puede simular las pérdidas ópticas de un tramo de fibra, este no puede simular con precisión la dispersión causada por la longitud de la fibra. La figura 37 muestra equipos atenuadores de potencia óptica.



Figura 37: Variable Fiber Optic Attenuator (Atenuador variable).

Medidor de refracción de retorno “BACK REFLECTION”.

Las altas velocidades digitales de los enlaces ópticos actuales y la mayoría de los enlaces analógicos basados en láser requieren muy poca back reflection para operar apropiadamente. Este instrumento cuantifica la cantidad de back reflection en la ruta de la fibra. La figura 38 muestra un equipo medidor de (back reflection) o refracción de señal óptica.



Figura 38. Equipo para mediciones de backreflection (refracción de retorno) en fibra óptica.

Detectores de inyección local.

Estos son usados para medir y/o asistir la correcta realización de los empalmes. Esto se hace inyectando y detectando señales de luz en los extremos de la fibra, frecuentemente se usan sofisticadas técnicas de micro alineación, para girar el empalme hasta que la luz sea detectada en el empalme antes de llegar a la fibra. La figura 39 muestra un equipo empalmador de fibra óptica de alineación automatizada.



Figura 39. Equipo para empalme de fibra óptica automatizado.

3.7 TÉCNICAS DE MEDICION PARA COMPONENTES DEL SISTEMA DWDM

Mediciones de fibra óptica

Las mediciones de fibra óptica varían dependiendo del tipo de fibra multimodo o monomodo. Mediciones de atenuación, dispersión, dispersión cromática, apertura numérica y diámetro del núcleo son pruebas para fibra multimodo. Mediciones de atenuación, dispersión cromática, longitud de onda de corte y tamaño de spot son pruebas importantes para fibra monomodo.

La atenuación es un parámetro crítico en la fibra, debido a los variados modos de propagación que complican las pruebas de atenuación. La atenuación se prueba excitando la fibra, hasta un modo de distribución equilibrado “EMD”

(Excitation of graded index fiber) que se muestra en la figura 40. El EMD representa el modo de distribución a través del largo de la fibra. Una fuente óptica y un medidor de potencia proporcionan el resultado de la prueba de atenuación. La pérdida de inserción en un tramo corto de fibra es comparada con la pérdida de inserción de un tramo largo de la fibra examinada. Esta prueba es solamente usada si se tiene el cuidado de conseguir la misma eficiencia de acoplamiento en ambos casos. Analizando la señal backscatter (dispersión o refracción de retorno) de la fibra con un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo, la uniformidad de la atenuación a lo largo de la fibra puede ser determinada.

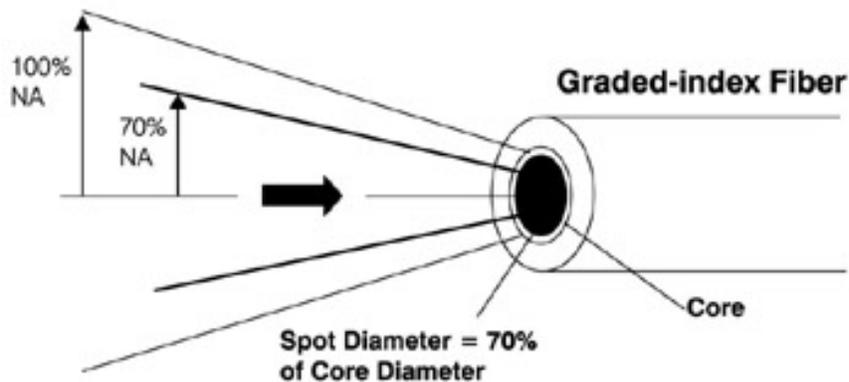


Figura 40. EMD – Excitation of Graded-index Fiber (excitation de la fibra de índice graduado)

Los sistemas de conmutación automatizados para probar componentes como un cable, conectores, o acopladores son benéficos para reducir el costo del equipo de prueba, por que varios instrumentos de prueba pueden trabajar simultáneamente. La figura 41 presenta un arreglo para probar cable usando un sistema de conmutación automatizado.

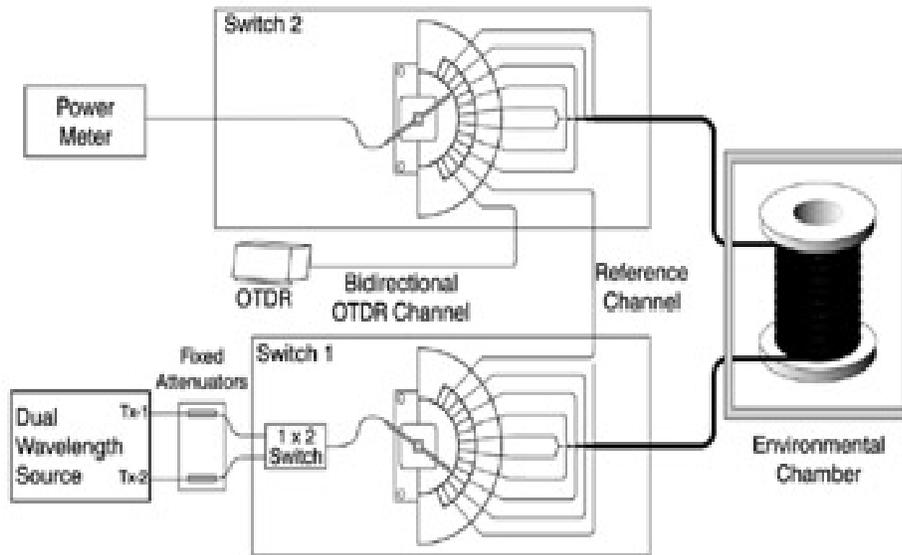


Figura 41. Cable Testing (Prueba de cable de fibra óptica).

Mediciones de fuentes de luz

Los diodos láser y los LEDs deben ser considerados cuando se miden sistemas de fibra óptica. Las pruebas en LEDs incluyen potencia de salida, modulación de ancho de banda, longitud de onda central, anchura espectral, tamaño de la fuente y patrón campo lejano. Las pruebas para diodos láser incluyen parámetros ópticos como: potencia de salida, modulación de ancho de banda, longitud de onda central / número de modos, modo de campo de rayo gaussiano y parámetros eléctricos como: corriente de umbral, curva de eficiencia, voltaje, corriente de monitoreo, etc.

Los LEDs manifiestan dependencia lineal de la potencia de salida. La potencia de la fibra puede ser medida con un medidor de potencia. La precisión de las mediciones depende del detector del medidor de potencia.

Las mediciones de modulación de ancho de banda usan un LED de intensidad modulada con generador de barrido, un diodo PIN convierte la señal óptica a señal eléctrica. La respuesta en frecuencia puede ser observada en un osciloscopio. Otra opción es usar un analizador de red con conversión óptico-eléctrico en la recepción.

Un analizador de espectro óptico mide la longitud de onda central y la anchura espectral. El resultado de estas mediciones influirá en el ancho de pulso en la

fibra. El tamaño del área de radiación y campo lejano pueden ser medidos directamente en el LED (sin la fibra). El tamaño puede ser determinado analizando la imagen en el microscopio (campo cercano) mientras que las mediciones de potencia de distribución de potencia angular se realizan a cierta distancia de la fuente (campo lejano). Campo lejano y campo cercano son necesarios para obtener alta eficiencia de acoplamiento.

La potencia de salida puede ser medida con una fuente de corriente variable y un medidor de potencia. En el láser, la corriente de umbral define el punto (one-set) de la emisión simulada.

Las técnicas de medición de modulación de ancho de banda son idénticas a las descritas para LEDs, sin embargo, los láser operan con un gran ancho de banda, el equipo de medición debe ser capaz trabajar con gran ancho de banda. La longitud de onda central y el número de modos debe ser medido con un analizador de espectro óptico.

El fenómeno de goteo (Chirp) es una longitud de onda no deseada causada por la intensidad de modulación. Los diodos que emiten una línea sencilla (franja) son afectados por chirp. Los métodos de interferometría son capaces de medir el chirp en una línea sencilla (franja).

Las características de radiación de los diodos láser se aproximan a una versión elíptica del rayo gaussiano. El rayo gaussiano es un rayo finito el cual transita sin alterarse dentro de un cono de luz de apertura numérica fija. Esto hace una rotación simétrica en dirección de la propagación. La elipticidad se da por el hecho de que el área de emisión es una franja antes que un círculo. Las mediciones campo lejano (análisis de la densidad de potencia a cierta distancia de la área de radiación) muestran los parámetros del rayo gaussiano.

Mediciones de detectores de luz

Las pruebas para fotodiodos PIN y APD incluyen diámetro, respuesta espectral, ancho de banda y corriente oscura (dark current/NEP). Los APD son probados adicionalmente para obtener factores de multiplicación y exceso de ruido. Los detectores ejecutan dos funciones: detección de señales en las recepciones y medición de potencia óptica. Cuando la función de los detectores es la detección de señales es deseable el diámetro mas pequeño por que la potencia de ruido equivalente (NEP) es proporcional al diámetro activo, y el ancho de banda es inversamente proporcional al área activa. Cuando el detector esta actuando

como un detector de potencia óptica es deseable el diámetro más grande posible por que esto incrementa la precisión de la medición.

Para fotodiodos PIN y APD la respuesta espectral depende básicamente de la longitud de onda. Una combinación longitud de onda-calibrada de una lámpara de tungsteno y un monocromator sintonizable miden la respuesta espectral. La respuesta ideal tendría que ser proporcional a la longitud de onda, sin embargo, esto varía considerablemente. El factor de multiplicación medido en APD resulta del alto voltaje el cual conduce a la multiplicación del número de portadores (Carriers) generados. Este factor de multiplicación se mide igual que la respuesta espectral.

El detector de ancho de banda puede ser medido excitándolo con una onda senoidal-modulada de una fuente láser. Un analizador de red con conversión óptico-eléctrico puede ser usado para realizar la medición. La potencia de ruido equivalente es un valor crítico por que esta influye en la sensibilidad de la recepción. Idealmente el NEP es proporcional a la raíz cuadrada de la corriente oscura “dark current”. Una medición más precisa puede ser tomada usando un analizador de espectro. En los APD el factor de exceso de ruido es una contribución adicional al ruido causada por el proceso de multiplicación mencionado en líneas anteriores y puede ser medido con un analizador de espectro.

Mediciones de pérdidas por interconexión

La interconexión ideal de dos fibras se da por una unión idéntica tanto física como óptica y la perfecta alineación de los ejes centrales en el empalme o conector. Sin embargo, en el mundo real, las pérdidas por interconexión es un factor a considerar. Las pérdidas de inserción es una consideración primaria para el funcionamiento del conector. Existen tres tipos de pérdidas de inserción: pérdidas relacionadas con la fibra, perdidas relacionadas con el conector y los factores del mismo sistema. Por la diferencia entre perdidas de inserción y rendimiento del conector, los usuarios deben comprender los métodos usados para medir las perdidas de inserción. Los mejores resultados se obtienen cuando la fibra esta conectada a la fuente y al detector de forma permanente como parte del equipo de prueba. Esto evita variaciones en los resultados que son causados por las perdidas de interconexión de la fuente y el conector.

Las pruebas de pérdida de inserción pueden reducir las perdidas relacionadas con la fibra. Una prueba general debe ser reproducible y proporcionar resultados aplicables. La mayoría de las pruebas miden la potencia de salida (P1) de la fibra. La fibra se corta a la mitad y se termina con un conector o empalme. La potencia

de salida (P2) se mide. Las pérdidas de inserción se obtienen mediante la formula 4.

$$\text{Loss (dB)} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

Formula 3

La longitud de la fibra debe estar rota exactamente a la mitad para producir una fibra idéntica en los dos lados del empalme. Este método elimina las perdidas inducidas por la fibra, para evaluar el rendimiento del conector independientemente de las variaciones relacionadas con la fibra. Tres condiciones de lanzamiento son de interés:

1. lanzamiento-corto, recibe-corto. Representada por fibras cortas sin recubrimiento en la transmisión y la recepción. Las condiciones lanzamiento-corto, recibe-corto manifiestan perdidas que se incrementan con la ligera compensación mecánica de la conexión. La desalineación lateral es un parámetro crítico bajo estas condiciones.
2. lanzamiento-largo, recibe-corto. Con recubrimiento en la transmisión y no en la recepción. Esta condición reduce la salida de apertura numérica (NA) de la fibra transmisora y las perdidas de separación. Entonces el núcleo receptor puede ser usado y la separación de las fibras puede ser tolerada.
3. lanzamiento-largo, recibe-largo: el recubrimiento en la recepción y en la transmisión crean la condición, presenta más sensibilidad a la desalineación lateral que las otras dos condiciones. Reduciendo el área efectiva del núcleo, incrementando las perdidas significativamente en ambas fibras.

Las pruebas de perdida de inserción asumen el uso de dos tramos idénticos de fibra. El uso de dos fibras diferentes requiere contabilizar las diferentes perdidas NA y las perdidas por diferencia de diámetros.

Las diferentes perdidas **NA** ocurren cuando la **apertura numérica** de la fibra transmisora (t) es más grande que la fibra receptora (r). La figura 42 muestra las diferentes perdidas NA.

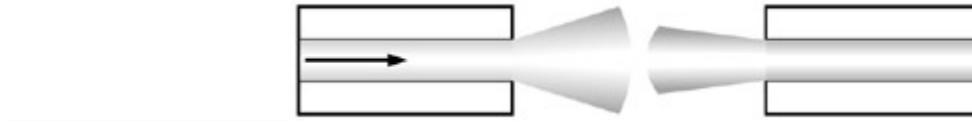


Figura 42. NA Mismatch Loss (perdida de apertura o correspondencia).

El calculo para las diferentes aperturas numéricas se obtiene de la formula 4.

$$\text{Loss}_{\text{NA}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{NA}_r}{\text{NA}_t} \right)$$

Formula 4

Como se ilustra en la figura 43 las diferencias en el diámetro del núcleo ocurren cuando el diámetro del núcleo de la fibra de transmisión (t) es más grande que el diámetro del núcleo de la fibra de recepción (r). Las pérdidas por diferencia en el diámetro del recubrimiento (cladding) son similares a las pérdidas por diferencia en el diámetro del núcleo. Estas dos diferencias evitan la alineación de los núcleos.

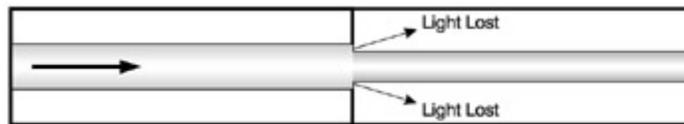


Figura 43. Core-diameter Mismatch Loss (perdida de diferencias entre los núcleos).

Las pérdidas para ambos tipos de diferencias de diámetro se calculan mediante la formula 5.

$$\text{Loss}_{\text{dia}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{dia}_r}{\text{dia}_t} \right)$$

Formula 5

Esta ecuación es precisa si se excitan todos los modos en la fibra. Cuando se excitan solamente los modos de bajo orden, las pérdidas se reducen y faltara considerar alguna cantidad.

La excentricidad ocurre por que el núcleo puede no estar perfectamente centrado en el recubrimiento (cladding). La ovalidad describe el hecho de que el núcleo o el recubrimiento puede ser más elíptico que circular. La alineación de dos núcleos elípticos puede variar dependiendo de la posición de las dos fibras. Estas pérdidas debido a los conectores son ilustradas en la figura 44.

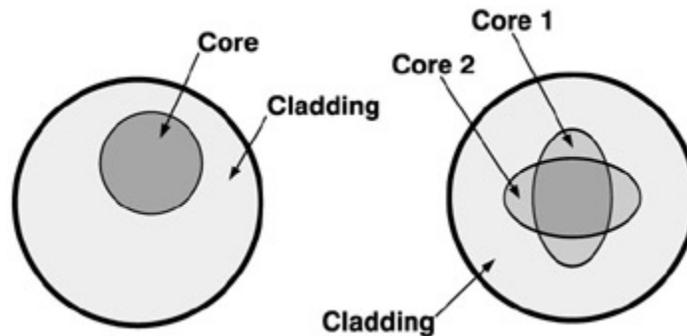


Figura 44. Concentricity and Ellipticity (Elipticidad y Concentricidad).

Las pérdidas relacionadas con los conectores también resultan del desalineamiento mecánico de los núcleos de la fibra óptica. Hay varios tipos de pérdidas por desplazamiento: desplazamiento lateral, desplazamiento angular y separación.

Un conector debe alinearse con los ejes centrales de las fibras, pero cuando el eje de una fibra no coincide con el eje de otra fibra, ocurre un desplazamiento lateral. Un desplazamiento del 10% en el eje del núcleo representa una pérdida de 0.5dB aproximadamente. Las terminaciones de la fibra deben ser perpendiculares a los ejes de la fibra. Si las terminaciones no son perpendiculares ocurre una falla llamada desplazamiento angular.

Algunos conectores mantienen las fibras ligeramente separadas para evitar que las fibras se estén frotando y dañe su terminación pulida. Las pérdidas por reflexión de Fresnel o separación son causadas por la diferencia en los índices de refracción de las dos fibras y el aire que está entre las dos fibras. Algunos fabricantes de conectores creen que el uso de una sustancia con un índice de refracción similar entre las fibras reduce las pérdidas por reflexión de Fresnel pero otros no recomiendan el uso de esta sustancia. El hueco que existe entre las fibras puede acumular pequeñas cantidades de sustancias abrasivas que pueden dañar las terminaciones, el uso de esta sustancia agravaría esta contaminación.

En una interconexión de fibra monomodo con terminación plana, la pérdida por reflexión de Fresnel puede llegar hasta -11dB , un nivel suficiente para interrumpir la mayoría de los láser. Esta pérdida puede ser reducida redondeando la terminación de la fibra durante el pulimento (llamado PC o fin de contacto físico). Puede parecer práctico el uso de terminaciones planas, pero obtener dos terminaciones perfectamente lisas está muy cercano a lo imposible. Con terminaciones redondeadas las fibras siempre tocan el punto más alto cerca del haz de luz. (Ver figura 45)

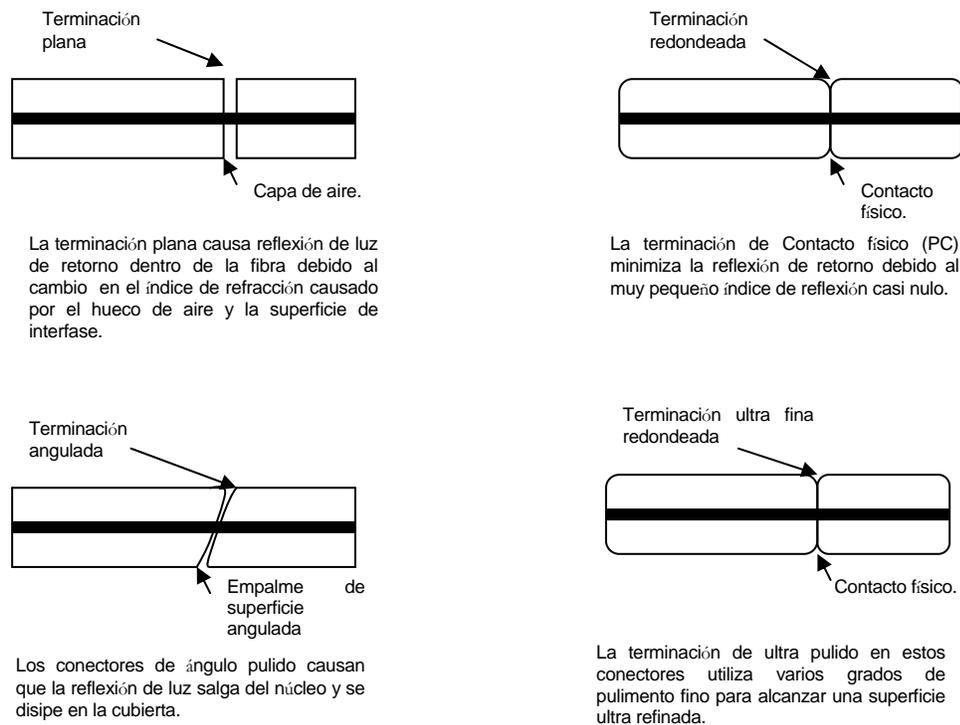


Figura 45: Fiber End Face Finishes (Terminado en las caras de fibra óptica ó conectores).

Los factores relacionados con el sistema, en las pérdidas por conector, implican las condiciones lanzamiento-recepción. Esas condiciones resultan del modo de distribución en la fibra. El rendimiento del conector depende de las condiciones de modo y la posición del conector en el sistema. Existen cuatro condiciones diferentes.

1. lanzamiento corto, recibe corto
2. lanzamiento corto, recibe largo
3. lanzamiento largo, recibe corto

4. lanzamiento largo, recibe largo.

Estas condiciones pueden ser controladas para proporcionar mediciones repetibles. Las condiciones lanzamiento-largo son preferidas generalmente. Las condiciones de lanzamiento o recibe corto suponen que el modo de distribución equilibrado (EMD) existe en la fibra. La Asociación de la Industria Electrónica recomienda lanzamiento 70/70: El 70% del diámetro del núcleo de la fibra y el 70% del NA de la fibra tiene que estar ocupado. Esta recomendación corresponde a EMD en una fibra de índice graduado. El EMD puede ser alcanzado de tres formas: alcance óptico (ilustrado en la figura 15.3), filtrando y alargando la longitud de la fibra. En general las pérdidas relacionadas con los conectores bajo condiciones de lanzamiento largo están entre 0.4 – 0.6 dB. Bajo condiciones lanzamiento corto, las pérdidas están entre 1.3 – 1.4 dB.

Las pruebas para pérdidas por empalme en un cable predeterminado involucra la medición de la potencia (P1) transmitida a través de dos fibras separadas. Entonces se une el cable con un empalme forrado, y se toma lectura de la nueva potencia (P2) a través del cable combinado.

La fórmula 6 es utilizada para calcular las pérdidas por empalme.

$$\text{Splice Loss} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

Fórmula 7

Donde:

- P1= Potencia en el primer cable
- P2= Potencia a través del cable combinado

Mediciones de desempeño en sistemas DWDM

Las mediciones en los sistemas incluyen continuidad de la fibra, tasa de error de bit (BER), sensibilidad y patrón de ojo. Estas son pruebas funcionales. La continuidad de la fibra se examina con un OTDR el cual localiza la ruptura en la fibra. El número de bits falsos de información dividido por el número total de bits que son transmitidos define la tasa de error de bit. La prueba de BER se realiza modulando una fuente con una secuencia de bits larga y bien definida y comparando la secuencia de transmisión con la de la recepción. La sensibilidad es el nivel de potencia más bajo que permite el BER. Esto puede ser examinado con un probador de BER; En este caso, un atenuador óptico es usado para

reducir la potencia de transmisión hasta que la tasa de error exceda el valor predefinido. El patrón de ojo se realiza con un microscopio.

RESUMEN

- Los sistemas de fibra óptica se someten a pruebas funcionales y pruebas de rendimiento.
- El equipo de prueba para sistemas de fibra óptica incluye medidor de potencia óptica, fuentes de luz óptica, medidor de pérdidas óptico, identificador de fibra, equipo de comunicación, OTDR, analizador de espectro óptico, atenuador óptico, medidor de refracción de retorno (backreflection) y detectores de inyección local.
- Los sistemas de conmutación automatizados para probar componentes como cable, conectores o acopladores son benéficos para mantener un bajo costo de equipo de prueba.
- La longitud de onda central y la anchura espectral se puede medir con un analizador de espectro óptico (OSA).
- Las pruebas para fotodiodos PIN y APD incluyen diámetro, respuesta espectral, ancho de banda y dark current/NEP.
- El detector de ancho de banda puede ser medido excitándolo con una onda seno de una fuente modulada.
- La excentricidad ocurre por que el núcleo no este perfectamente centrado en el recubrimiento (cladding).
- La ovalidad describe el hecho de que el núcleo o el recubrimiento puede ser más elíptico que circular.

CAPITULO IV

DESARROLLO DE UN SISTEMA DWDM CASO PRACTICO

4.1 PLANEACIÓN DEL PROYECTO

Debido a la necesidad actual de transportar gran cantidad de tráfico telefónico y de datos en el territorio Mexicano y con los Estados Unidos y más aún proyectando al futuro, se decidió iniciar un proyecto que cubriera las expectativas de:

- Bajo costo en inversión del medio de transporte.
- Escalabilidad (Expansiones a bajo costo y tiempo de integración).
- Alta eficiencia y disponibilidad de servicio.

De acuerdo a este planteamiento la tecnología que cubre al 100% estas expectativas es DWDM ya que para cubrir un bajo costo del medio de transporte solo se realizara contando con la compra o renta de 2 fibras ópticas a lo largo de todo el trayecto que se quiera cubrir y que de entrada darán cabida al transporte de 40 canales de 2.5 Gb/s = 100 Gb/s o mediante escalabilidad se pueden tener 40 canales de 10 Gb/s = 400 Gb/s o inclusive incrementando esto mismo pero por el doble de canales, dándonos entonces 80 canales de 2.5 Gb/s = 200 Gb/s o 80 canales de 10 Gb/s = 800 Gb/s o incluso mas dependiendo de cómo avance la tecnología y se construyan equipos estables. Para darnos una idea mas clara de lo que se puede transportar por esta red, si para dar el servicio de voz privada normalmente se utilizan canales de 64 Kb/s entonces para el caso de 40 canales con trafico de 2.5 Mb/s daríamos servicio alrededor de 39,000 usuarios de canales de voz, evidentemente si incrementamos a trafico DWDM de 10 Gb/s en 40 canales, entonces daríamos servicio a 156,000 usuarios y a 312,000 usuarios si incrementamos a 80 canales.

En la etapa de planeación del proyecto el usuario final planteo las necesidades técnicas, entrego la lista de sitios y ciudades donde se necesitaba transportar la red tráfico.

Después del análisis hecho por ingeniería y diseño de red se entrego la topología de la figura 46 donde se muestra para cada ciudad el tipo y cantidad de equipo a utilizar.

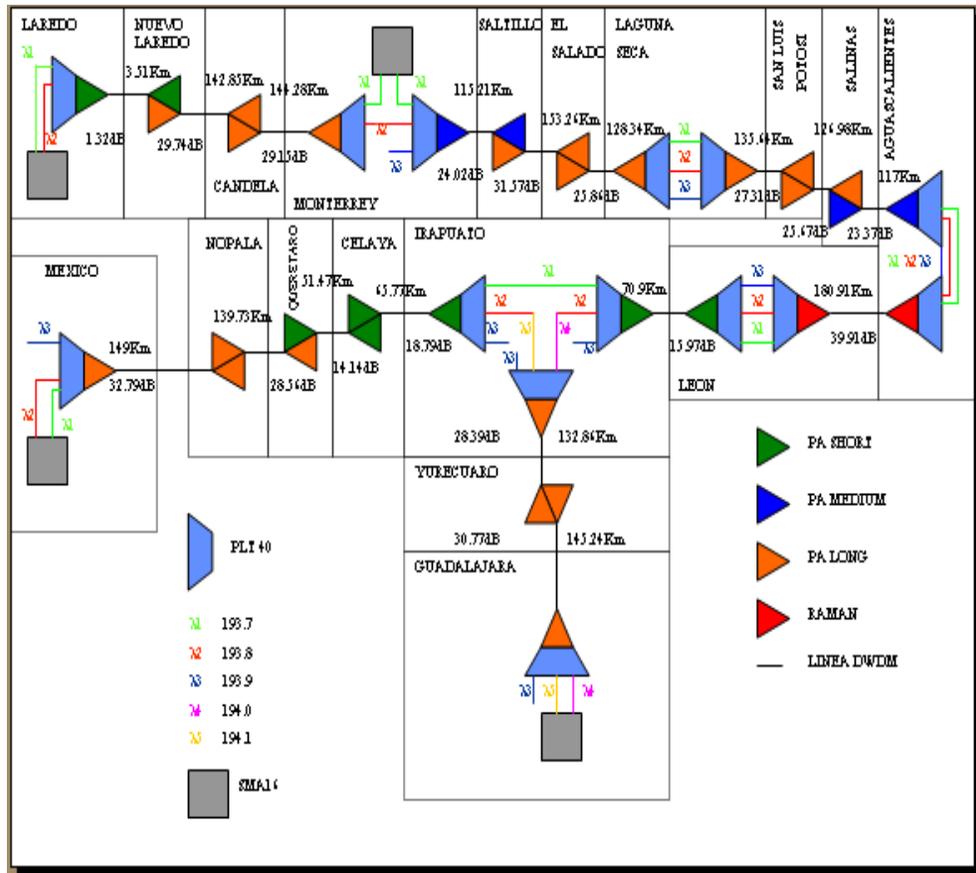


Figura 46. Topología de red para proyecto DWDM (México-Laredo) para la compañía Protel /MetroRed.

Los sitios solicitados donde se requiere bajar y subir información a la red son:

- México
- Guadalajara
- Monterrey
- Laredo USA

Y con posibilidades futuras de bajar y subir trafico en las siguientes ciudades que en este momento solo son parte de la red pero como enlace para llegar a otro punto.

- Irapuato
- León
- Aguascalientes
- Laguna Seca

Si bien en la práctica se construyo e implemento esta red en su totalidad en esta tesis solo se abordara a detalle el enlace entre México e Irapuato ya que para caso de estudio y entendimiento de la tecnología DWDM se considero suficiente, además de que cualquier otro tramo de esta red se implementa de la misma manera. El trafico con el que se arranco originalmente y que es el caso de estudio son tres longitudes de onda (Lambdas λ) de 2.5 Gb/s.

4.2 EQUIPO DE MEDICIÓN E IMPLEMENTACIÓN UTILIZADO EN EL PROYECTO

4.2.1 Generador de múltiples fuentes láser (ver figura 47)

Marca EXFO
Modelo IQS 505P
Características:



Figura 47. Generador de multiples fuentes láser Exfo.

4.2.2 Analizador OTDR. (ver figura 48)

Marca HP

Modelo E6000C

Características:

- High dynamic range - 40dB.
- Automatic event adjustment
- Automatic fibre characterisation
- Front connector check
- Built-in multi fibre test
- Compliant to Bellcore GR-196-CORE standard
- Fibre break locator mode
- Stabilised continuous wave (CW) source
- Full remote control
- Minimum sampling resolution - 8cm
- Simple one button operation
- 15 seconds power up cycle
- Context sensitive on-line help
- Small and light: < 2.8kg



Figura 48. Analizador OTDR HP

4.2.3 Analizador de PMD y Dispersión cromática (ver figura 49)

Marca Nettekst

Modelo FD440

Características:

- Optimized for CWDM and DWDM applications
- Fully portable for field and network testing
- Dynamic range up to 40dB
- 1310nm, 1550nm and L band operation
- Applicable to all single mode fibers including NDS, DS, NZDS and DC designs
- Spectral attenuation option



Figura 49. Analizador de PMD Nettekst

4.2.4 Analizador de espectros ópticos (OSA) (ver figura 50)

Marca Anritsu

Modelo MS9710C

Características:

- Wavelength range: 600 - 1750nm
- Dynamic range:
- 42dB (0.2nm from peak wavelength)
- 70dB (1nm from peak wavelength)
- Stand alone instrument
- GPIB, RS-232 and VGA connector

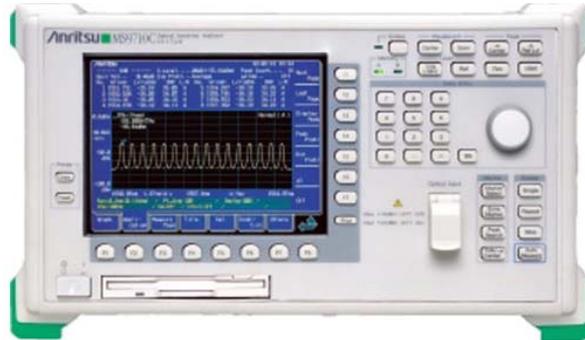


Figura 50. Analizador de espectro óptico Anritsu.

4.2.5 Atenuador variable (ver figura 51)

Marca Agilent Technologies
 Modelo N3977A
 Características. Ver tabla 7.

Calibration wavelengths	1310 nm and 1550 nm.
Wavelength dependence (1200 - 1600 nm): $Attenuation \approx A_{displayed} - 0.00027 \Delta\lambda \cdot (5 + A_{displayed})$ typ.	
where $A_{displayed}$ is the displayed attenuation in dB and $\Delta\lambda$ = wavelength difference from calibration wavelengths in nm.	
Wavelength Range	1200 to 1600 nm
Attenuation Range	2.50 to 60.00 dB
Repeatability	± 0.03 dB (at fixed polarization state)
Insertion loss at LOW position	< 2.5 dB
Linearity	± 0.003 dB/dB ± 0.05 dB (at fixed polarization state, for the specified attenuation range, no optical discontinuity during adjustment)
Warm-up period	None
Thermal stability	± 0.02 dB typical over temperature range, at fixed polarization state, exclusive of connector drift
Maximum input power	< 200 mW, +23 dBm
Applicable Fiber Type	9/125 μ m
Return Loss (typical)	< -40dB with physical-contact connectors of perfect quality
Operating Time	200 - 600 hour's typ depending on motor use (backlight off) from 2 alkaline C cells

Tabla 7. Características del atenuador variable Agilent Technologies.



Figura 51. Atenuador variable Agilent Technologies.

4.2.6 Atenuador fijo (ver figura 52)

Marca: Amphenol

Modelo: Varios porque depende del tipo de conector deseado y del valor de la atenuación requerida.

Características. Ver tabla 8

Longitud de onda de operación	1310 nm y 1550 nm			
Atenuación	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
Tolerancia	< ± 0,5 dB	< ± 1 dB	< ± 1.5 dB	< ± 2 dB
Perdida de retorno p/conectores FC-PC; SC-PC; ST-PC Y LC-PC	> 40 dB			
Perdida de retorno p/conectores E2000-APC	> 65			
Temperatura de operación	-40°C a 70 °C			

Tabla 8. Características técnicas de atenuadores fijos.



Figura 52. Atenuadores fijos Amphenol.

4.2.7 Generador de fuente láser (ver figura 53)

Marca Agilent Technologies
 Modelo N3974A
 Características. Ver tabla 9

Source Type	Fabry-Perot Laser
Center Wavelength ¹	1310 ± 20 nm 1550 ± 20 nm
Spectral Bandwidth (typical)	3 nm FWHM
Output Power	≥ -6 dBm
Short-term stability (typical) ²	± 0.02 dB
Long-term stability (typical) ³	± 0.15 dB
Operating Time (typical)	140 hours
Temperature coefficient (typical)	0.4 nm/°K
Applicable Fiber Type	9/125 μm
Optical Output	Removable Connector Adapters. Single port, Open beam

Tabla 9. Características técnicas del generador laser Agilent Technologies.



Figura 53. Generador laser Agilent Technologies

4.2.8 Medidor de potencia óptica (ver figura 54)

Marca Agilent Technologies

Modelo N3974A

Características. Ver tabla 10

Sensor Element	InGaAs
Wavelength Range	850 - 1650 nm
Calibration Wavelengths	850 ¹ , 1300, 1310, 1550 nm
Power Range	+ 5 to -60 dBm (850 nm) + 5 to -70 dBm (other wavelengths)
Maximum Input Power	+ 15 dBm
Uncertainty at reference conditions ²	±0.13 dB (± 3%)
Total Uncertainty ³	±0.3 dB (± 7%) ± 2 pW
Autotest sensitivity (typical) ⁴	-40 dBm (850 nm) -50 dBm (other wavelengths)
Operating Time (typical)	250 hours
Applicable Fiber Type	9/125 μm to 62.5/125 μm
Optical Input	Non-Contact, Removable Connector Adapters
Display Type	LCD, 4 digits
Display Resolution	0.01 dB, 3 digits in linear mode
Display Units	dB, dBm, nW, μW, mW

Tabla 10. Características técnicas del medidor de potencia óptica Agilent Technologies.



Figura 54. Medidor de potencia óptica Agilent Technologies.

4.2.9 Computadora con software para ecualización de espectro óptico.

Marca DELL
Modelo Latitud C840
Características:

CPU Intel Pentium 4 a 1.7 Mhz. (puede ser cualquiera con CPU Pentium III o superior).
Memoria: 1 Gb (256 Mb como mínimo).
Puerto serial RS232.

4.3 VIABILIDAD DEL MEDIO DE TRANSMISIÓN PARA UTILIZARSE CON TECNOLOGIA DWDM

4.3.1 Medición de atenuación en la fibra mediante OTDR

Esta medición se realiza en cada una de las fibras ópticas de punta a punta en cada tramo o enlace. De acuerdo a nuestro caso práctico de estudio vamos a analizar a detalle varios tramos de la red de fibra para la aplicación de DWDM con la finalidad de obtener un enlace para bajar y subir tráfico desde la ciudad de México hasta Irapuato Guanajuato, para lograr un enlace de esta magnitud se tiene que pasar por varios tramos o enlaces intermedios que analizaremos a continuación uno por uno.

- México – Nopala
- Nopala – Querétaro
- Querétaro – Celaya
- Celaya – Irapuato

Este proyecto fue realizado para la compañía Protel SA de CV mediante Marconi Communications de México SA de CV (ahora Ericsson), donde Protel entrego dos fibras subterráneas para implementar este sistema desde la CD. México hasta Laredo Texas USA designadas como fibra 5 y fibra 6 de un total de 60 fibras que llevan esta misma trayectoria.

Enlace intermedio México – Nopala

En las figuras 55 y 56 se muestran las graficas obtenidas del análisis OTDR para este enlace mostrando los resultados de la fibra 5 y 6 respectivamente.

Fibra 5

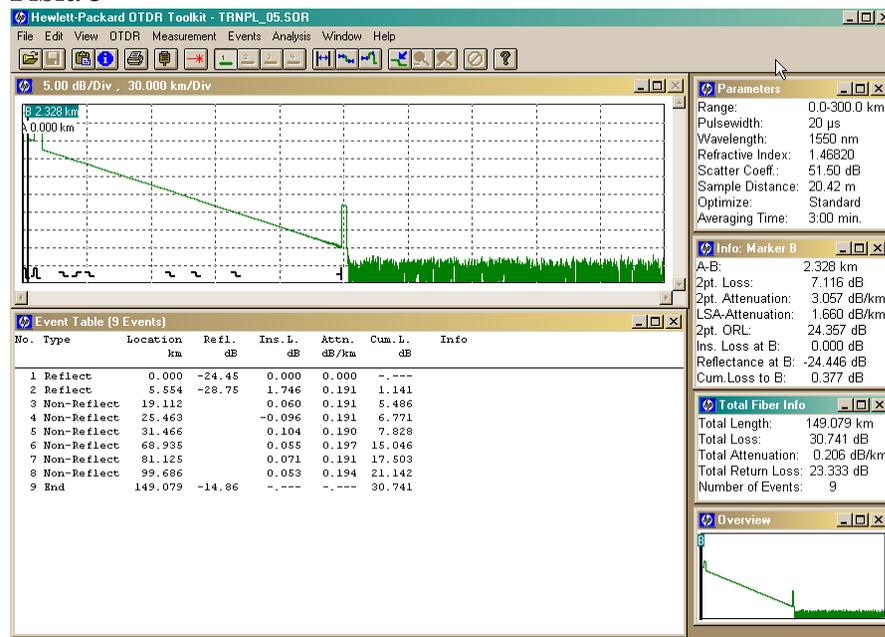


Figura 55. Grafica de resultados del estudio OTDR (fibra 5).

Fibra 6

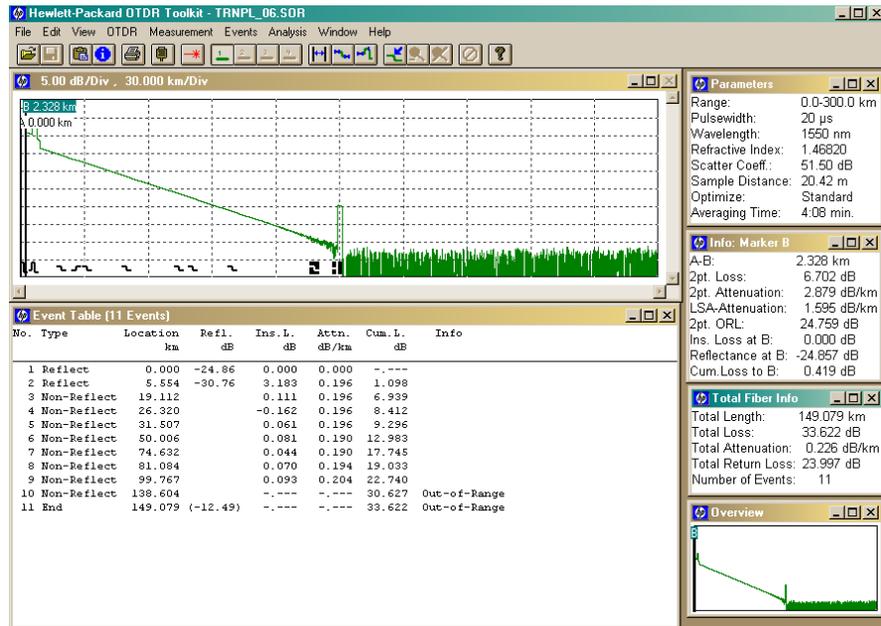


Figura 56. Grafica de resultados del estudio OTDR (fibra 6).

Enlace intermedio Nopala – Querétaro

En las figuras 57 y 58 se muestran las graficas obtenidas del análisis OTDR para este enlace mostrando los resultados de la fibra 5 y 6 respectivamente.

Fibra 5

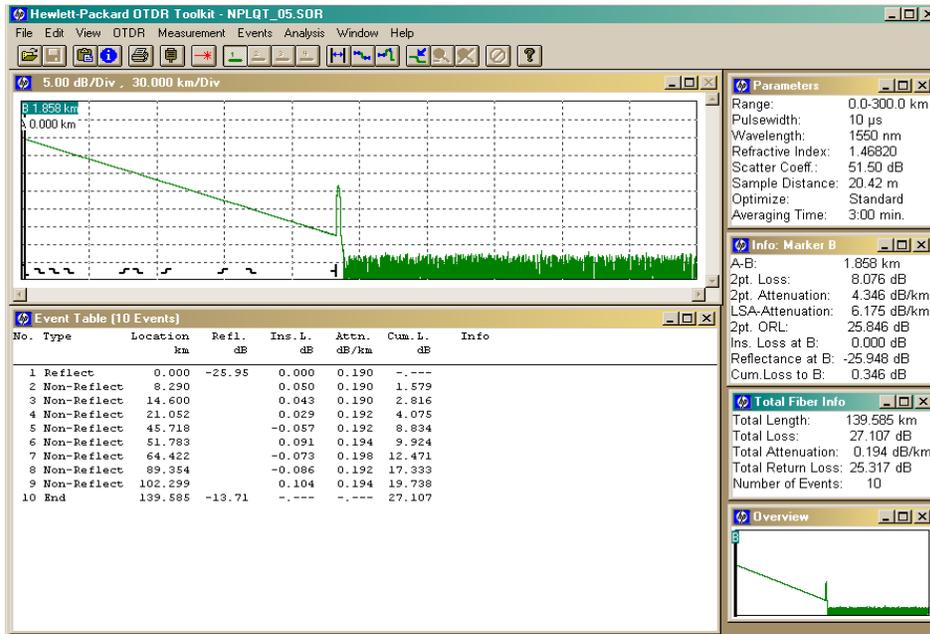


Figura 57. Grafica de resultados del estudio OTDR (fibra 5).

Fibra 6

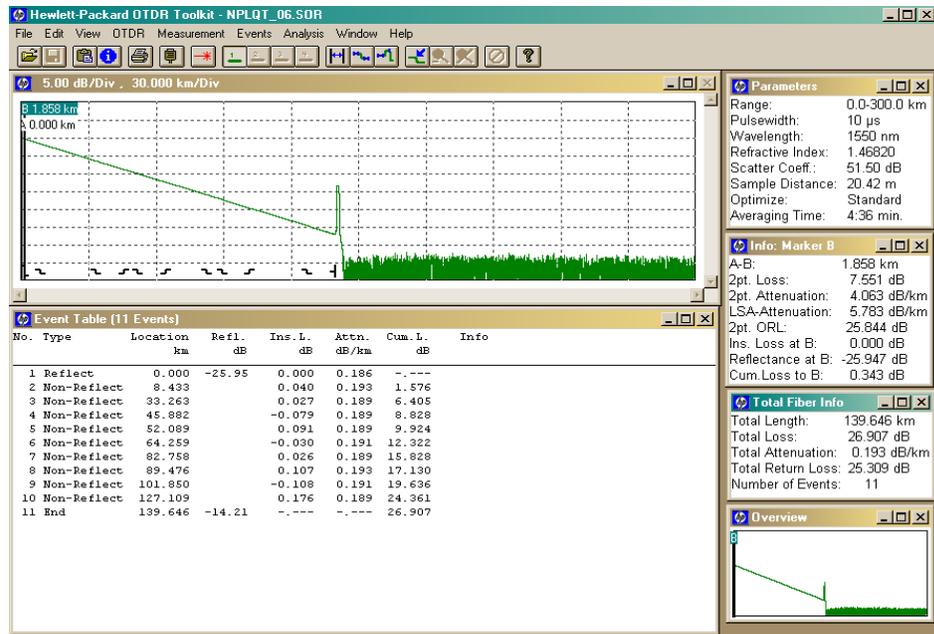


Figura 58. Grafica de resultados del estudio OTDR (fibra 6).

Enlace intermedio Querétaro – Celaya.

En las figuras 59 y 60 se muestran las graficas obtenidas del análisis OTDR para este enlace mostrando los resultados de la fibra 5 y 6 respectivamente.

Fibra 5

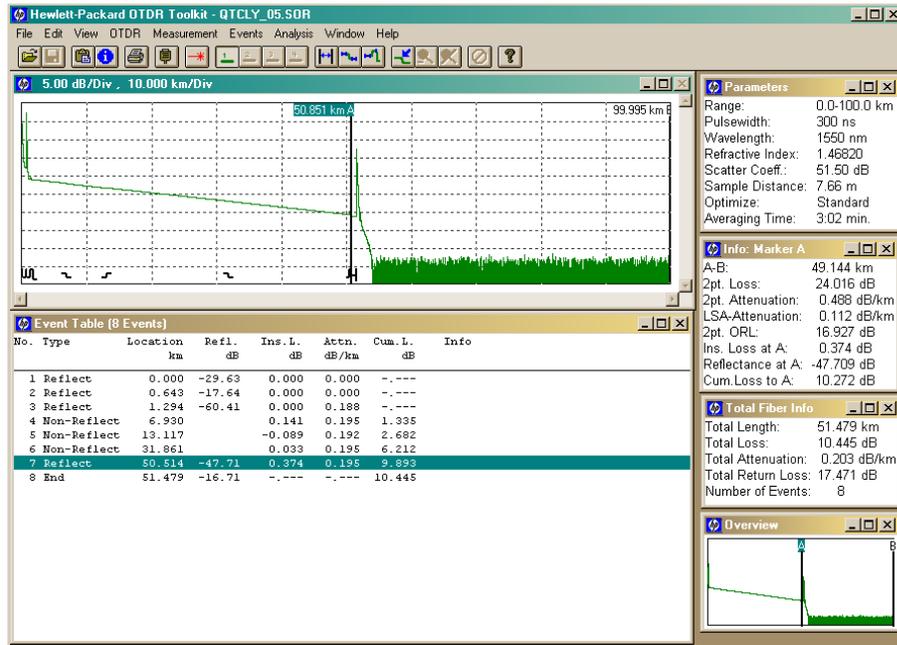


Figura 59. Grafica de resultados del estudio OTDR (fibra 5).

Fibra 6

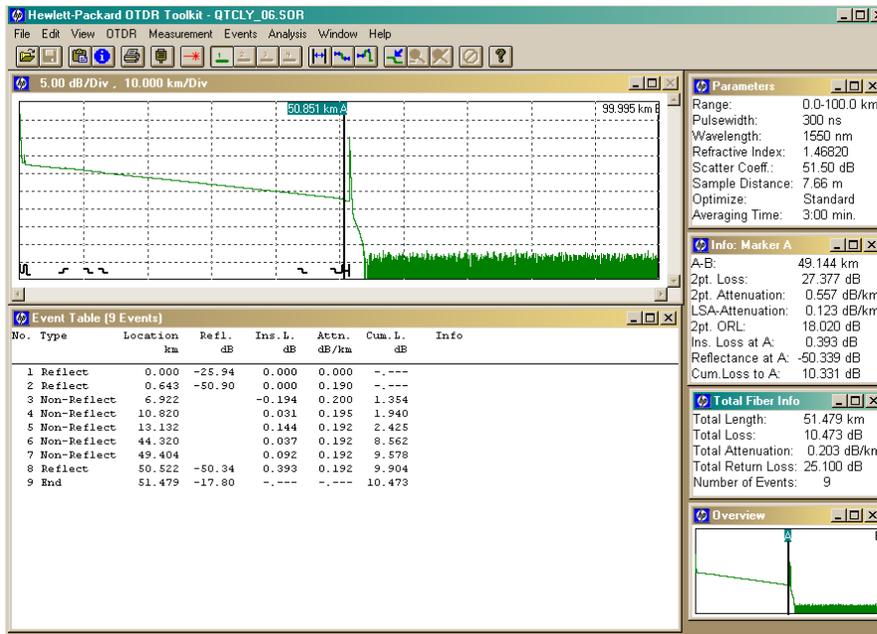


Figura 60. Grafica de resultados del estudio OTDR (fibra 6).

Enlace intermedio Celaya – Irapuato.

En las figuras 61 y 62 se muestran las graficas obtenidas del análisis OTDR para este enlace mostrando los resultados de la fibra 5 y 6 respectivamente.

Fibra 5

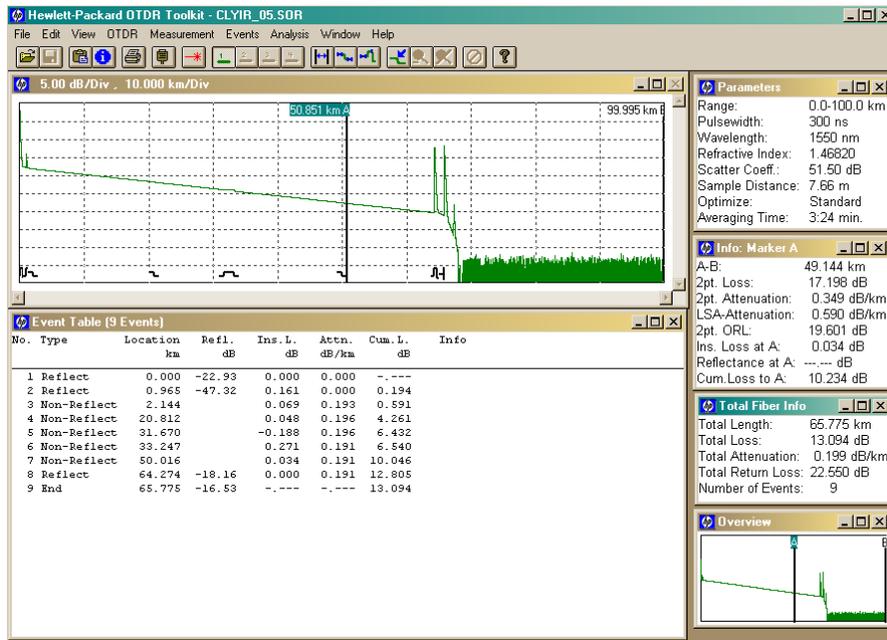


Figura 61. Grafica de resultados del estudio OTDR (fibra 5).

Fibra 6

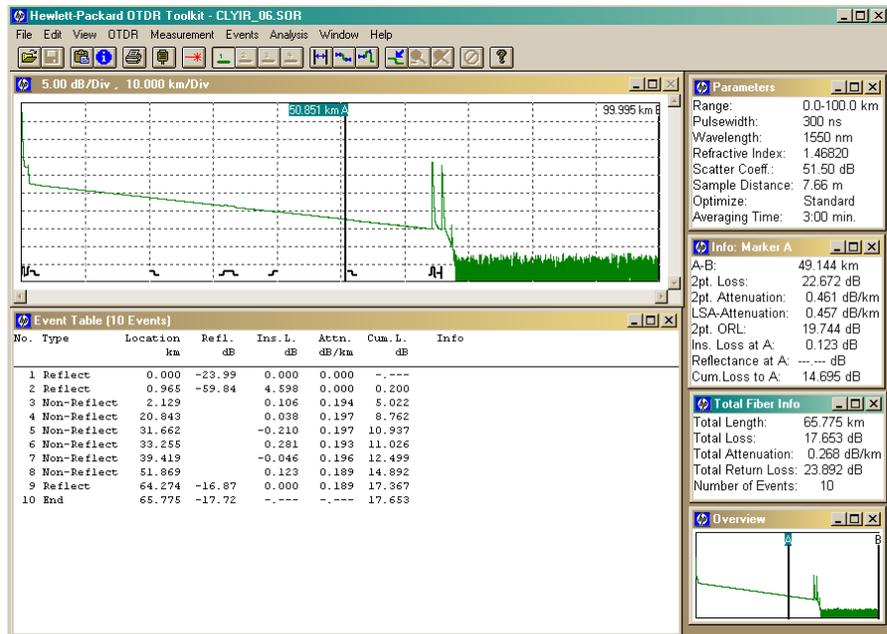


Figura 62. Grafica de resultados del estudio OTDR (fibra 6).

4.3.2 Análisis de resultados

Primeramente debemos de considerar la característica de la fibra óptica que estamos midiendo y sobre la cual se requiere implementar la tecnología DWDM. En la tabla 11 se muestran los datos generales tanto de la fibra utilizada en el caso práctico como del equipo con el que se realizó la medición OTDR.

Fabricante de fibra	Pirelli
Fabricante de cable	Corning SMF 28 Monomodo
Número de fibras	60
Equipo de Medición	MD440 HP
Longitud de onda	1550 nm

Tabla 11. Datos generales de la fibra utilizada en el caso práctico y del equipo de medición que aplico las pruebas de OTDR.

En la tabla 12 se muestran las características de la fibra utilizada en el caso práctico.

Cuadro comparativo de las características de las fibras ópticas		
Característica	Tipo de fibra monomodo	
	SMF-28 (TM-1, TM-3, TM-4, TM-6)	SMF/DS (TM-5, TM-7, TM-8, TM-10)
Dispersión	18 ps/nm-Km	5 ps/nm-Km
Área efectiva	80 μm^2	55 μm^2
Atenuación a 1310 nm	< 0.40 dB/Km	< 0.35 dB/Km
Atenuación a 1550 nm	< 0.30 dB/Km	< 0.25 dB/Km
Diámetro de modo de propagación a 1310 nm	9.3 μm	
Diámetro de modo de propagación a 1550 nm	10.5 μm	8.1 μm
Longitud de onda de dispersión cero	1310	1550
PMD en fibra	0.2 ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ Max. 0.1 ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ Enlace	0.5 ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ Max.

Tabla 12. Características de la fibra utilizada en el caso práctico.

En la tabla 13 se encuentran resumidas las mediciones de OTDR tomadas en los cuatro enlaces intermedios y se diagnostica en base a estos resultados si la fibra se encuentra dentro de los parámetros esperados.

Enlace	Perdida Fibra 5 (dB)	Perdida Fibra 6 (dB)	Perdida Promedio (dB)	Distancia KM	Atenuación dB/Km	Parametro Base	Funcionalidad DWDM
México – Nopala	30.741	33.622	32.1815	149.08	0.21	0.2 - 0.3	Adecuada
Nopala – Querétaro	27.107	26.907	27.007	139.6	0.194	0.2 - 0.3	Adecuada
Querétaro – Celaya	10.445	10.473	10.459	51.47	0.203	0.2 - 0.3	Adecuada
Celaya - Irapuato	13.094	17.653	15.3735	65.775	0.225	0.2 - 0.3	Adecuada

Tabla 13. Resumen de mediciones OTDR de México – Irapuato.

4.3.3 Medición de PMD

La medición de PMD se realiza fibra por fibra y enlace por enlace por lo que al igual que en el caso de OTDR se analizó la fibra 5 y 6 respectivamente.

Enlace intermedio México – Nopala.

Las figuras 63 y 64 muestran las graficas del análisis PMD realizado y en las tablas 14 y 15 se muestran los resultados a detalle.

Fibra 5

PMD REPORT

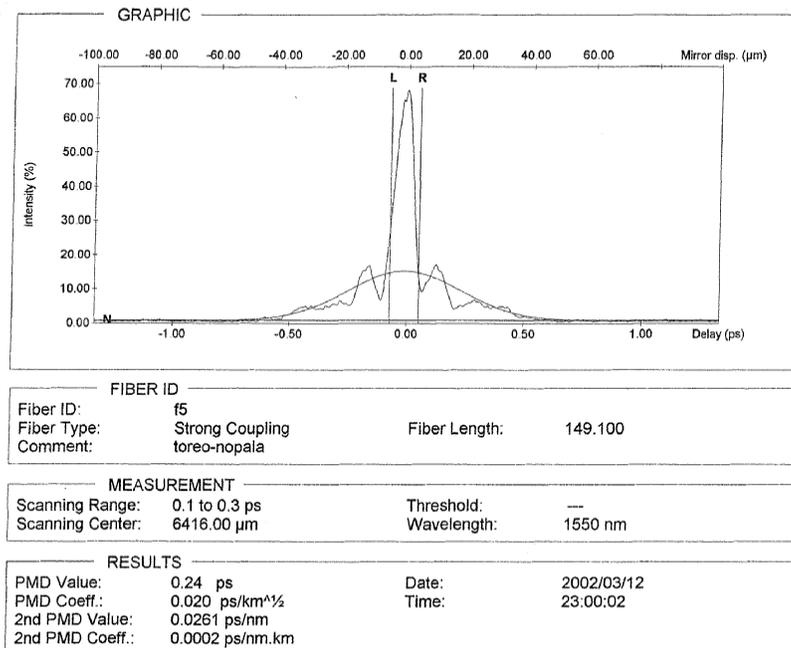


Figura 63. Grafica de resultados del estudio PMD (fibra 5).

Estadísticas

<u>wavelength</u>	<u>1550 nm</u>
Scan Mode	PMD
DUT Type	Strong
Mean PMD	Delay 0,23 Ps
Mean PMD	Coefficient 0.019 ps/km ^{1/2}
PMD Delay Standard Deviation	0.01123 ps
PMD Coefficient Standard Deviation	0 00092 ps/km ^{1/2}
Minimum PMD Delay	0.22 Ps
Maximum PMD Delay	025 Ps

Minimum PMD Coefficient	0.02 ps/km ^{1/2}
Maximum PMD Coefficient	0.02 ps/km ^{1/2}
OUT Count	5

Tabla 14. Resultados de PMD fibra 5.

Fibra 6

PMD REPORT

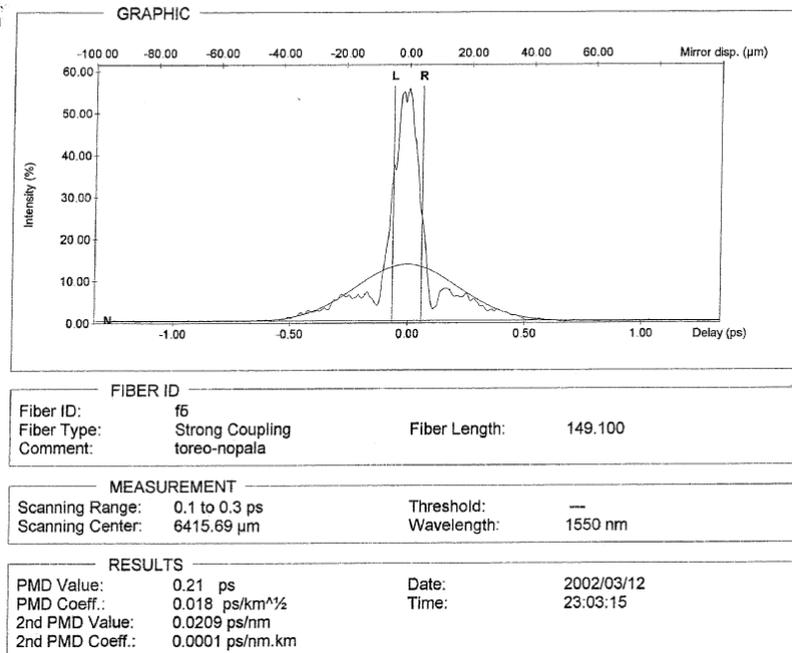


Figura 64. Grafica de resultados del estudio PMD (fibra 6).

Estadísticas

Wavelength	1550 nm
Scan Mode	PMD
DUTType	Strong

Mean PMD Delay	0.21 Ps
Mean PMD Coefficient	0.017 ps/km ^{1/2}
PMD Delay Standard Deviation	0.00319 Ps
PMD Coefficient Standard Deviation	0.00026 ps/km ^{1/2}
Minimum PMD Delay	0.21 Ps
Maximum PMD Delay	0.22 Ps
Minimum PMD Coefficient	0.02 ps/km ^{1/2}
Maximum PMD Coefficient	0.02 ps/km ^{1/2}
DUR Count	<u>5</u>

Tabla 15. Resultados de PMD fibra 6.

Enlace intermedio Nopala – Querétaro.

Las figuras 65 y 66 muestran las graficas del análisis PMD realizado y en las tablas 16 y 17 se muestran los resultados a detalle.

Fibra 5

PMD REPORT

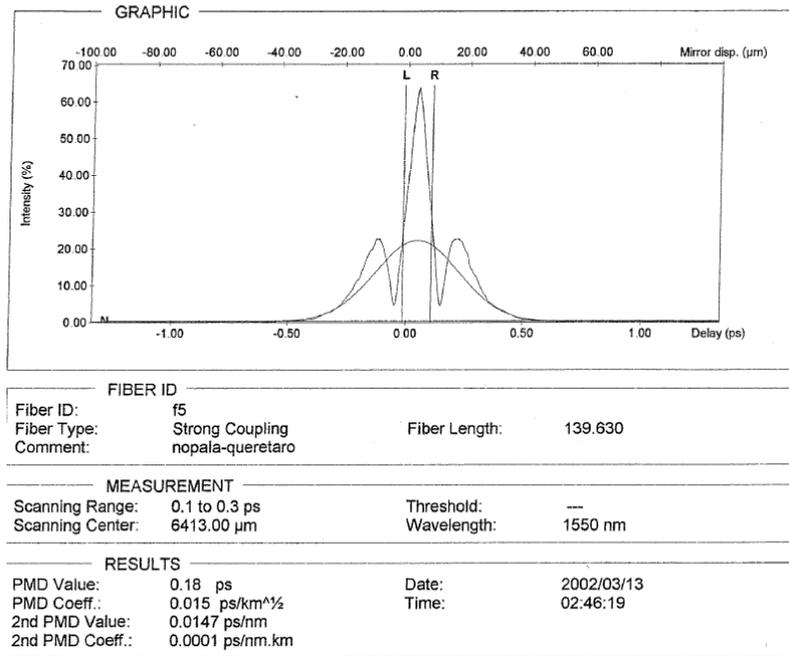


Figura 65. Grafica de resultados del estudio PMD (fibra 5).

Estadísticas

wavelength	1550 nm
Scan Mode	PMD
DUT Type	Strong
Mean PMD Delay	018 PS
Mean PMD Coefficient	0,015 ps/km ^{1/2}
PMD Delay Standard Deviation	0.00222 PS
PMD Coefficient Standard Deviation	0,00019 ps/km ^{1/2}
Minimum PMD Delay	0.18 PS
Maximum PMD Delay	0.18 Ps

Minimum PMD Coefficient	0.02 ps/km ^{1/2}
Maximum PMD Coefficient	0.02 ps/km ^{1/2}
DUT Count	5

Tabla 16. Resultados de PMD fibra 5.

Fibra 6

PMD REPORT

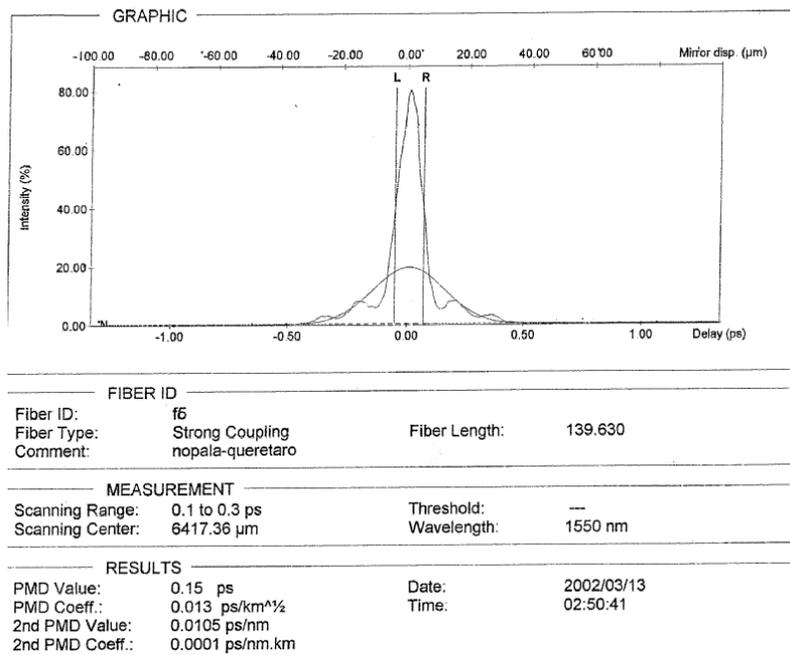


Figura 66. Grafica de resultados del estudio PMD (fibra 6).

Estadísticas

wavelength	1550 nm
Scan Mode	PMD
DUT Type	Strong
Mean PMD Delay	016 PS

Mean PMD Coefficient	0,013 ps/km ^½
PMD Delay Standard Deviation	0.00387 PS
PMD Coefficient Standard Deviation	0,00033 ps/km ^½
Minimum PMD Delay	0.15 PS
Maximum PMD Delay	0.16 Ps
Minimum PMD Coefficient	0 01 ps/km ^½
Maximum PMD Coefficient	001 ps/km ^½
DUT Count	5

Tabla 17. Resultados de PMD fibra 6.

Enlace intermedio Querétaro – Celaya.

Las figuras 67 y 68 muestran las graficas del análisis PMD realizado y en las tablas 18 y 19 se muestran los resultados a detalle.

Fibra 5

PMD REPORT

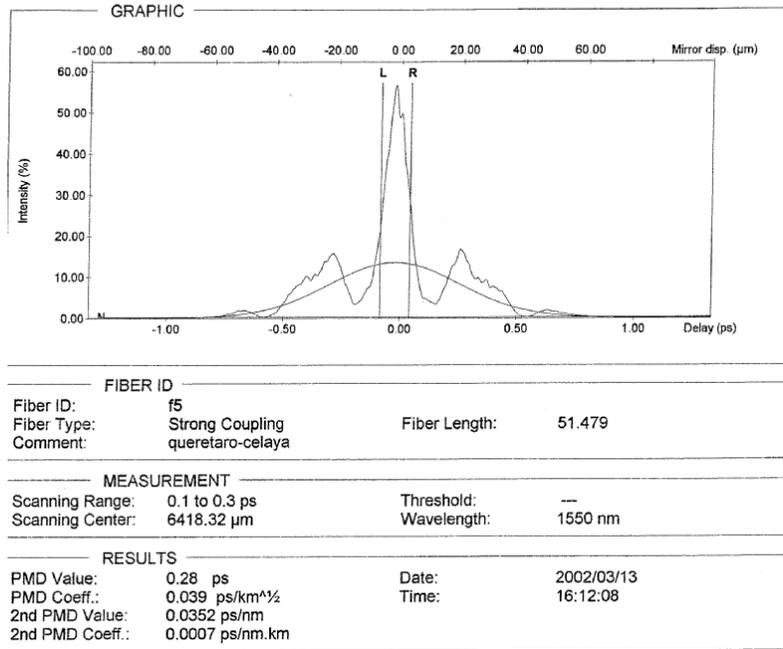


Figura 67. Grafica de resultados del estudio PMD (fibra 5).

Estadísticas

wavelength	1550 nm
Scan Mode	PMD
DUT Type	Strong
Mean PMD Delay	028 PS
Mean PMD Coefficient	0,039 ps/km ^{1/2}
PMD Delay Standard Deviation	0.00070 PS
PMD Coefficient Standard Deviation	0,00010 ps/km ^{1/2}
Minimum PMD Delay	0.28 PS
Maximum PMD Delay	0.28 Ps

Minimum PMD Coefficient	0.04 ps/km ^{1/2}
Maximum PMD Coefficient	0.04 ps/km ^{1/2}
DUT Count	5

Tabla 18. Resultados de PMD fibra 5.

Fibra 6

PMD REPORT

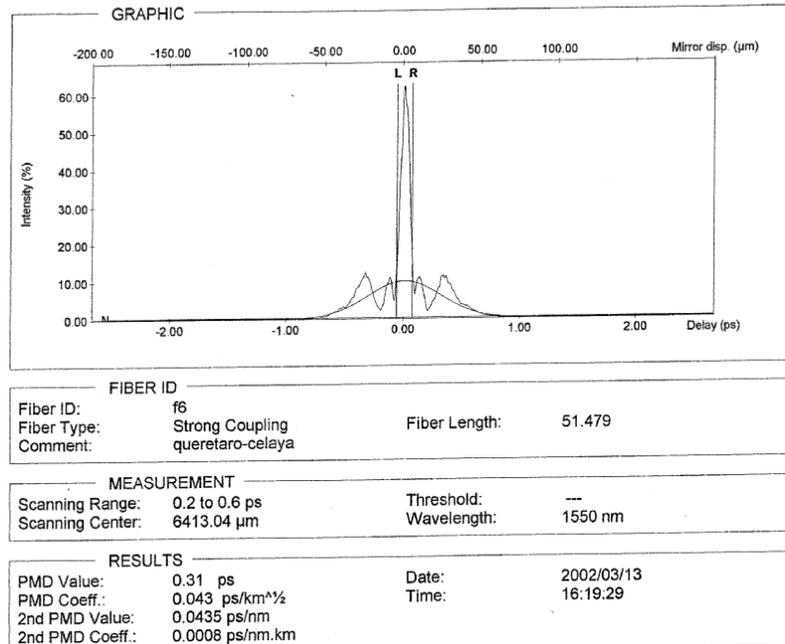


Figura 68. Grafica de resultados del estudio PMD (fibra 6).

Estadísticas

wavelength	1550 nm
Scan Mode	PMD
DUT Type	Strong

Mean PMD Delay	031 PS
Mean PMD Coefficient	0,043 ps/km ^{1/2}
PMD Delay Standard Deviation	0.00099 PS
PMD Coefficient Standard Deviation	0,00014 ps/km ^{1/2}
Minimum PMD Delay	0.31 PS
Maximum PMD Delay	0.31 Ps
Minimum PMD Coefficient	0 04 ps/km ^{1/2}
Maximum PMD Coefficient	004 ps/km ^{1/2}
DUT Count	5

Tabla 19. Resultados de PMD fibra 5.

Enlace intermedio Celaya – Irapuato.

Las figuras 69 y 70 muestran las graficas del análisis PMD realizado y en las tablas 20 y 21 se muestran los resultados a detalle.

Fibra 5

PMD REPORT

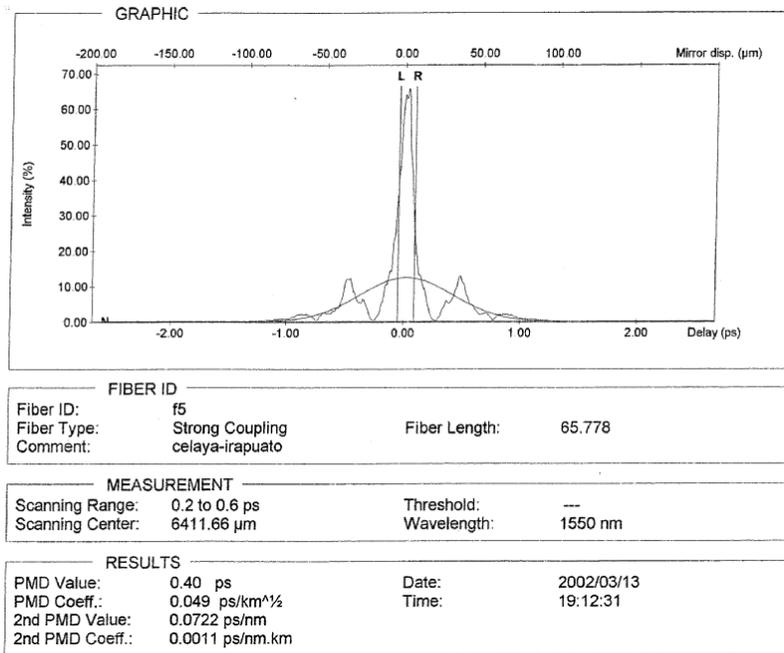


Figura 69. Grafica de resultados del estudio PMD (fibra 5).

Estadísticas

wavelength	1550 nm
Scan Mode	PMD
DUT Type	Strong
Mean PMD Delay	037 PS
Mean PMD Coefficient	0.046 ps/km ^{1/2}
PMD Delay Standard Deviation	0.02376 PS
PMD Coefficient Standard Deviation	0.00293 ps/km ^{1/2}
Minimum PMD Delay	0.35 PS
Maximum PMD Delay	0.40 Ps

Minimum PMD Coefficient	0.04 ps/km ^{1/2}
Maximum PMD Coefficient	0.05 ps/km ^{1/2}
DUT Count	5

Tabla 20. Resultados de PMD fibra 5.

Fibra 6

PMD REPORT

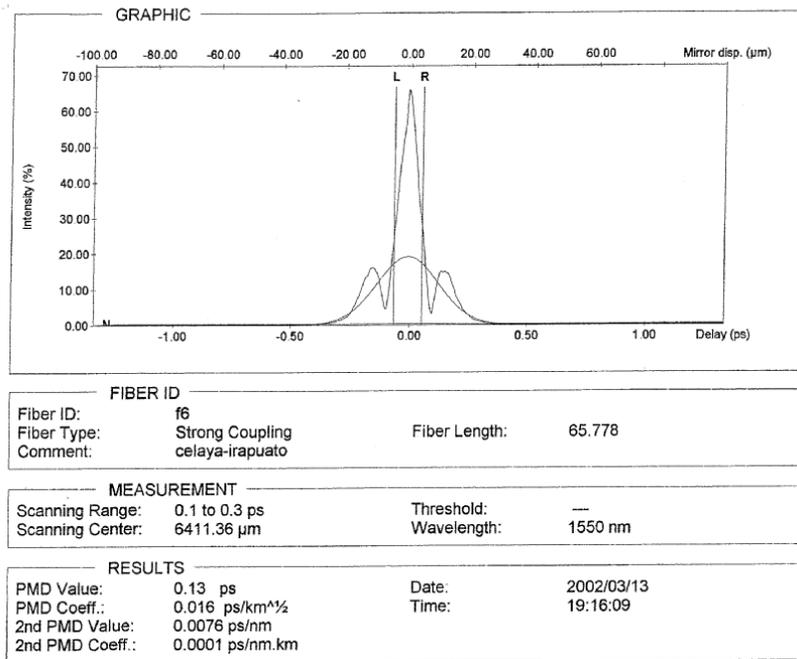


Figura 70. Grafica de resultados del estudio PMD (fibra 6).

Estadísticas

wavelength	1550 nm
Scan Mode	PMD
DUT Type	Strong
Mean PMD Delay	0.13 PS

Mean PMD Coefficient	0.016 ps/km ^{1/2}
PMD Delay Standard Deviation	0.00630 PS
PMD Coefficient Standard Deviation	0.00078 ps/km ^{1/2}
Minimum PMD Delay	0.12 PS
Maximum PMD Delay	0.13 Ps
Minimum PMD Coefficient	0 01 ps/km ^{1/2}
Maximum PMD Coefficient	002 ps/km ^{1/2}
DUT Count	5

Tabla 21. Resultados de PMD fibra 5.

4.3.4 Análisis de resultados

Coefficiente de PMD.

En la tabla 22 se muestran los resultados en resumen del análisis PMD de ambas fibras y lo comparamos contra los valores dados por la tabla 12, donde se encuentran las características de la fibra utilizada en el caso práctico, con esta información determinamos si las fibras son viables para DWDM o no.

Enlace	FIBRA 5		FIBRA 6		PARÁMETRO BASE FIBRA SMF 28 (ps/km ^{1/2})	Función para DWDM
	PMD (ps)	COEFICIENTE PMD (ps/km ^{1/2})	PMD (ps)	COEFICIENTE PMD (ps/km ^{1/2})		
México - Nopala	0.24	0.02	0.21	0.018	0.1 - 0.2	Adecuado
Nopala - Querétaro	0.18	0.015	0.15	0.013	0.1 - 0.3	Adecuado
Querétaro - Celaya	0.28	0.039	0.31	0.043	0.1 - 0.4	Adecuado
Celaya - Irapuato	0.4	0.049	0.13	0.016	0.1 - 0.5	Adecuado
TOTAL	1.1	0.123	0.8	0.09	0.1 - 0.6	Adecuado

Tabla 22. Resultados de PMD para el enlace México - Irapuato.

Calculo del PMD Total

La formula 8 nos indica como obtener el PMD total. Calcularemos solo para la fibra 5 ya que contiene el valor mas alto de PMD y la otra por consiguiente el resultado será aun mejor que para esta.

$$PMD = \sqrt{PMD1^2 + PMD2^2 + \dots PMDn^2}$$

Formula 8

Tenemos:

$$PMD = \sqrt{((0.24)^2 + (0.18)^2 + (0.28)^2 + (0.4)^2} = \sqrt{0.3284}$$

PMD = 0.57 ps.

Comparando este valor de acuerdo a la normatividad ITU-T o con la información práctica mostrada en el capitulo 3.4 y conociendo que el tipo de trama a trasmitirse será de 2.5 Gb/s tenemos:

ITU_T

2.5 Gb/s (STM-16) PMD Max = **40 ps** el valor de **0.57 ps** es correcto

10 Gb/s (STM-64) PMD Max = **10 ps** el valor de **0.57 ps** es correcto

Práctica

2.5 Gb/s (STM-16) PMD Max = **20 ps** el valor de **0.57 ps** es correcto

10 Gb/s (STM-64) PMD Max = **5 ps** el valor de **0.57 ps** es correcto

4.3.5 Mediciones de Dispersión Cromática

Las pruebas de dispersión cromática se realizan en cada una de las fibras ópticas y enlace intermedio por enlace intermedio.

Enlace intermedio México – Nopala

La tabla 23 y 25 muestran la configuración realizada en el equipo de medición para analizar la dispersión cromática del enlace intermedio.

Las figuras 71 y 72 muestran la grafica de la dispersión cromática obtenida de la prueba realizada. En las tablas 24 y 26 se detallan los valores del muestreo de la dispersión cromática.

Fibra 5

FD440 Chromatic Dispersion Results (resultados de dispersión cromática).

Date of measurement	12 March 2002 at 20.08.29
System ID	25522
Fiber length :	149.100000 km
Fiber ID :	f 5
Message	México - Nopala
Operator	sirti
Test file	[1] test 1510 a 1610
Results file name	C:\EG&G\400\Results\ProteRtoreo-nopala\f5 WS D
Start power	6.030dB at 1600.0 nm
End power	3.109 dB
Data fit	Linear Fit

Tabla 23. Configuración de equipo de medición para dispersión cromática.

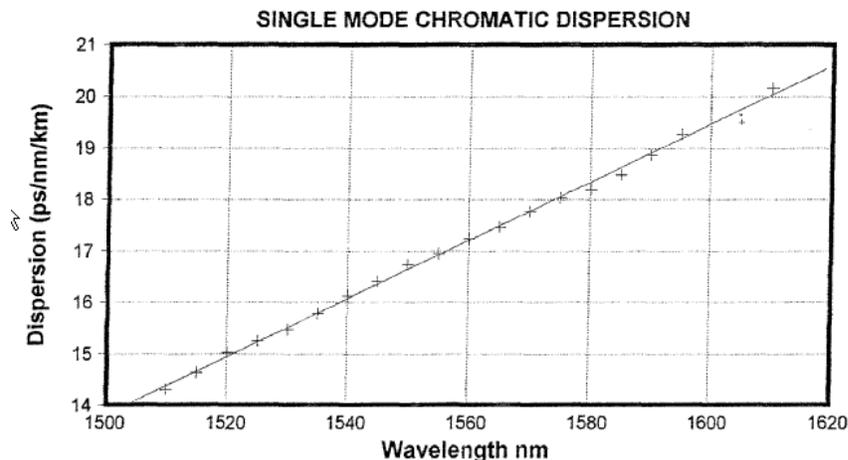


Figura 71. Grafica de dispersión cromática.

VALORES DE MUESTREO

WAVELENGTH nm	DISPERSION ps/nm/km	TIME DELAY ps/km	SLOPE ps.nm-2.km-1	TOTAL DISPERSION ps/nm
1510.000	14.305	0.000	0.0565	2132.804
1515.000	14.639	72.359	0.0565	2182.678
1520.000	15.019	146.503	0.0565	2239.283
1525.000	15.253	222.182	0.0565	2274.227
1530.000	15.482	299.019	0.0565	2308.324
1535.000	15.785	377.187	0.0565	2353.595
1540.000	16.134	456.986	0.0565	2405.605
1545.000	16.413	538.355	0.0565	2447.238
1550.000	16.723	621.195	0.0565	2493.389
1555.000	16.943	705.361	0.0565	2526.233
1560.000	17.236	790.809	0.0565	2569.891
1565.000	17.459	877.546	0.0565	2603.131
1570.000	17.764	965.604	0.0565	2648.626
1575.000	18.035	1055.101	0.0565	2688.974
1580.000	18.190	1145.662	0.0565	2712.067
1585.000	18.482	1237.341	0.0565	2755.706
1590.000	18.850	1330.673	0.0565	2810.604
1595.000	19.271	1425.976	0.0565	2873.292
1600.000	24.364	1535.063	0.0565	3632.659
1605.000	19.498	1644.718	0.0565	2907.141
1610.000	20.160	1743.862	0.0565	3005.831

Tabla 24. Valores de muestreo

Fibra 6

Date of measurement	12 March 2002 at 20.24.08
System ID	25522
Fiber length :	149.100000 km
Fiber ID :	f 6
Message	toreo-nopala
Operator	sirti
Test file	[1] test 1510 a 1610
Results file name	C:\EG&G\400\Results\ProteRtoreo-nopala\f6 WS D
Start power	9.131dB at 1600.0 nm
End power	6.008 dB
Data fit	Linear Fit

Tabla 25. Configuración de equipo de medición para dispersión cromática.

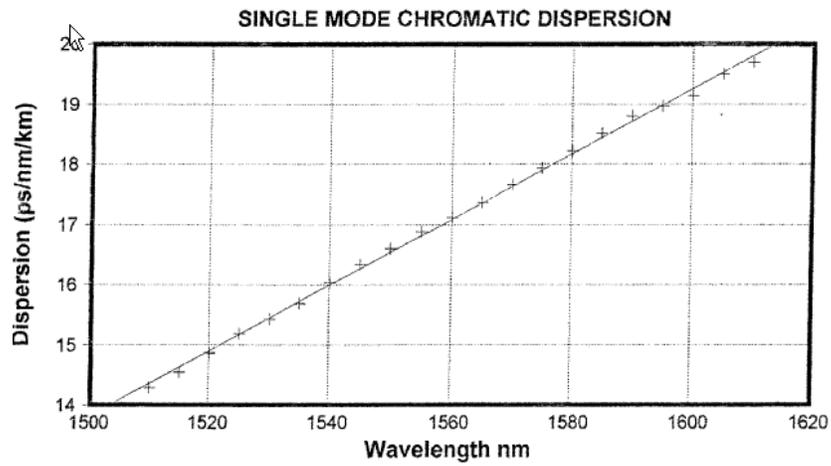


Figura 72. Grafica de dispersión cromática.

VALORES DE MUESTREO

WAVELENGTH nm	DISPERSION ps/nm/km	TIME DELAY ps/km	SLOPE ps.nm-2.km-1	TOTAL DISPERSION ps/nm
1510.000	14.289	0.000	0.0545	2130.529
1515.000	14.553	72.105	0.0545	2169.796
1520.000	14.872	145.665	0.0545	2217.357
1525.000	15.187	220.812	0.0545	2264.376
1530.000	15.429	297.352	0.0545	2300.488
1535.000	15.689	375.148	0.0545	2339.239
1540.000	16.043	454.478	0.0545	2392.049
1545.000	16.336	535.427	0.0545	2435.700
1550.000	16.605	617.779	0.0545	2475.778
1555.000	16.882	701.496	0.0545	2517.137
1560.000	17.112	786.481	0.0545	2551.377
1565.000	17.372	872.691	0.0545	2590.187
1570.000	17.662	960.277	0.0545	2633.432
1575.000	17.939	1049.281	0.0545	2674.735
1580.000	18.226	1139.694	0.0545	2717.495
1585.000	18.516	1231.548	0.0545	2760.672
1590.000	18.803	1324.843	0.0545	2803.497
1595.000	18.966	1419.266	0.0545	2827.855
1600.000	19.141	1514.534	0.0545	2853.913
1605.000	19.503	1611.430	0.0545	2907.889

1610	19.692	1709.131	0.0545	2936.085
------	--------	----------	--------	----------

Tabla 26. Valores de muestreo.

Enlace intermedio Nopala – Querétaro.

La tabla 27 y 29 muestran la configuración realizada en el equipo de medición para analizar la dispersión cromática del enlace intermedio.

Las figuras 73 y 74 muestran la grafica de la dispersión cromática obtenida de la prueba realizada. En las tablas 28 y 30 se detallan los valores del muestreo de la dispersión cromática.

FD440 Chromatic Dispersion Results (resultados de dispersión cromática).

Fibra 5

Date of measurement	12 March 2002 at 00.47.02
System ID	25522
Fiber length :	139.000000 km
Fiber ID :	f 5
Message	Nopala - Querétaro
Operator	Sirti
Test file	[1] test 1510 a 1610
Results file name	C:\EG&G\400\Resuits\nopala-queretaro\f5 WS D
Start power	17.670dB at 1600.0 nm
End power	18.435 dB
Data fit	Driff 3 Term Sellmeier

Tabla 27. Configuración de equipo de medición para dispersión cromática.

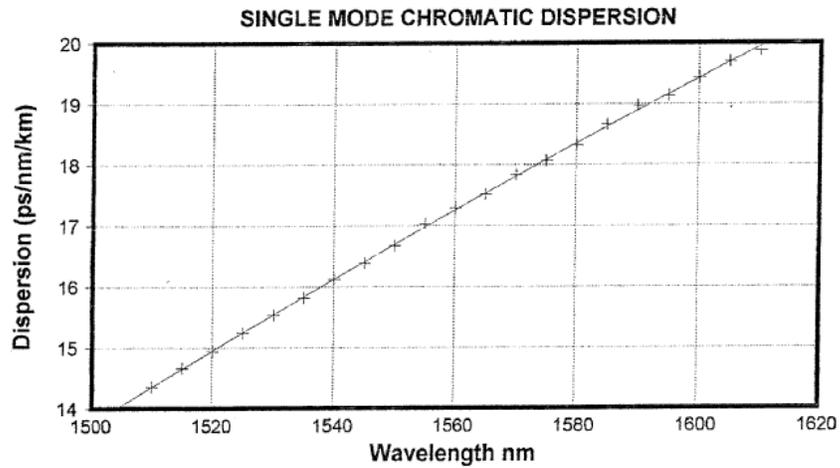


Figura 73. Grafica de dispersión cromática.

VALORES DE MUESTREO

WAVELENGTH nm	DISPERSION ps/nm/km	TIME DELAY ps/km	SLOPE ps.nm ⁻² .km ⁻¹	TOTAL DISPERSION ps/nm
1510.000	14.354	0.000	0.0605	2004.264
1515.000	14.666	72.550	0.06	2047.811
1520.000	14.947	146.583	0.0595	2087.086
1525.000	15.248	222.071	0.059	2129.061
1530.000	15.539	299.039	0.0585	2169.722
1535.000	15.825	377.448	0.058	2209.582
1540.000	16.130	457.334	0.0576	2252.223
1545.000	16.387	538.627	0.0571	2288.148
1550.000	16.675	621.281	0.0567	2328.281
1555.000	17.027	705.536	0.0562	2377.483
1560.000	17.293	791.336	0.0558	2414.617
1565.000	17.523	878.374	0.0554	2446.668
1570.000	17.841	966.782	0.0549	2491.086
1575.000	18.067	1056.552	0.0545	2522.753
1580.000	18.325	1147.532	0.0541	2558.655
1585.000	18.668	1240.015	0.0537	2606.679
1590.000	18.976	1334.126	0.0533	2649.605
1595.000	19.135	1429.403	0.0529	2671.847
1600.000	19.435	1525.828	0.0526	2713.672
1605.000	19.694	1623.650	0.0522	2749.884
1610	19.877	1722.577	0.0518	2775.359

Tabla 28. Valores de muestreo.

Fibra 6

Date of measurement	12 March 2002 at 01.02.25
System ID	25522
Fiber length :	139.100000 km
Fiber ID :	f 6
Message	Nopala - Queretaro
Operator	Sirti
Test file	[1] test 1510 a 1610
Results file name	C:\EG&G\400\Resuits\nopala-queretaro\f6 WS D
Start power	17.080dB at 1600.0 nm
End power	17.908 dB
Data fit	Driff 3 Term Sellmeier

Tabla 29. Configuración de equipo de medición para dispersión cromática.

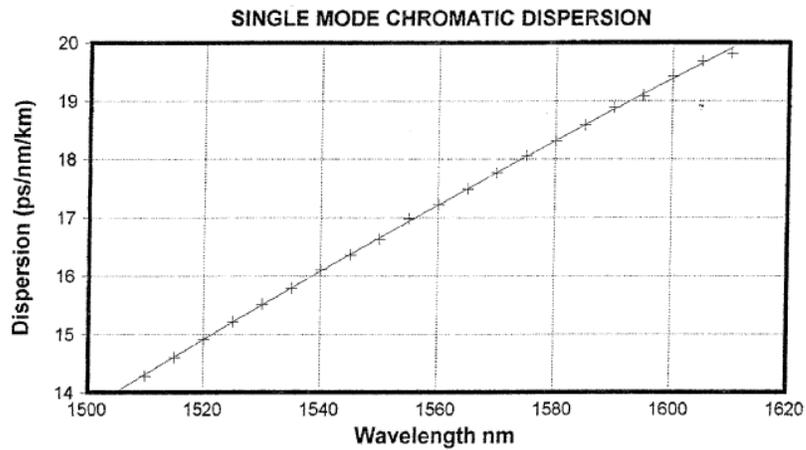


Figura 74. Grafica de dispersión cromática.

VALORES DE MUESTREO

WAVELENGHT nm	DISPERSION ps/nm/km	TIME DELAY ps/km	SLOPE ps.nm-2.km-1	TOTAL DISPERSION ps/nm
1510.000	14.282	0.000	0.0605	1994.193
1515.000	14.602	72.210	0.06	2038.867
1520.000	14.924	146.026	0.0595	2083.905
1525.000	15.225	221.399	0.059	2125.825
1530.000	15.522	298.267	0.0585	2167.395
1535.000	15.793	376.555	0.0581	2205.193

1540.000	16.108	456.308	0.0576	2249.129
1545.000	16.360	537.477	0.0571	2284.353
1550.000	16.633	619.960	0.0567	2322.503
1555.000	16.986	704.007	0.0562	2371.686
1560.000	17.221	789.522	0.0558	2404.506
1565.000	17.494	876.308	0.0554	2442.627
1570.000	17.772	964.472	0.055	2481.531
1575.000	18.063	1054.061	0.0545	2522.162
1580.000	18.318	1145.013	0.0541	2557.703
1585.000	18.591	1237.284	0.0537	2595.842
1590.000	18.890	1330.987	0.0533	2637.643
1595.000	19.094	1425.949	0.053	2666.157
1600.000	19.425	1522.248	0.0526	2712.353
1605	19.682	1620.016	0.0522	2748.159
1610	19.822	1718.775	0.0518	2767.758

Tabla 30. Valores de muestreo.

Enlace intermedio Querétaro – Celaya.

La tabla 31 y 33 muestran la configuración realizada en el equipo de medición para analizar la dispersión cromática del enlace intermedio.

Las figuras 75 y 76 muestran la grafica de la dispersión cromática obtenida de la prueba realizada. En las tablas 32 y 34 se detallan los valores del muestreo de la dispersión cromática.

FD440 Chromatic Dispersion Results (resultados de dispersión cromática).

Fibra 5

Date of measurement	13 March 2002 at 13.30.59
System ID	25522
Fiber length :	51.450000 km
Fiber ID :	f 5
Message	Queretaro - Celaya
Operator	sirti
Test file	[1] test 1510 a 1610
Results file name	C:\EG&G\400\Resuits\queretaro-celaya\f5 WS D
Start power	42.540dB at 1600.0 nm

End power	42.562 dB
Data fit	Drift 3 Term Sellmeier

Tabla 31. Configuración de equipo de medición para dispersión cromática.

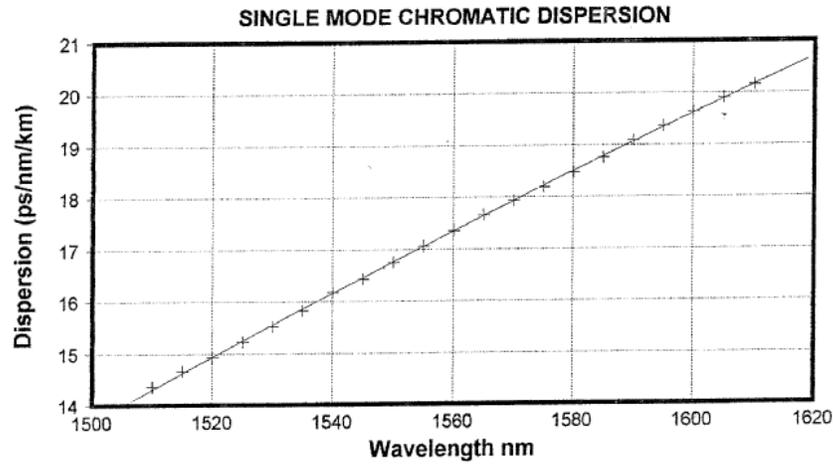


Figura 75. Grafica de dispersión cromática.

VALORES DE MUESTREO

WAVELENGTH nm	DISPERSION ps/nm/km	TIME DELAY ps/km	SLOPE ps.nm ⁻² .km ⁻¹	TOTAL DISPERSION ps/nm
1510	14.358	0	0.0633	738.801
1515	14.664	72.555	0.0628	754.56
1520	14.937	146,559	0.0623	768.615
1525	15.23	221.978	0.0617	783.696
1530	15.513	298.836	0.0612	798.212
1535	15.824	377.177	0.0607	814.241
1540	16.175	457.173	0.0603	832.278
1545	16.43	538.686	0.0598	845.446
1550	16.75	621.636	0.0593	861.863
1555	17.061	706.161	0.0588	877.869
1560	17.354	792.199	0.0584	892.988
1565	17.651	879.713	0.0579	908.264
1570	17.937	968.683	0.0575	922.954
1575	15.184	1058.984	0.0571	935.666
1580	18.476	1150.634	0.0566	950.714
1585	18.753	1243.707	0.0562	964.939

1590	19.082	1338.292	0.0558	981.861
1595	19.361	1434.398	0.0554	996.224
1600	19.633	1531.882	0.055	1010.24
1605	19.909	1630.736	0.0546	1024.412
1610	20.155	1730.895	0.0542	1037.09

Tabla 32. Valores de muestreo.

Fibra 6

Date of measurement	13 March 2002 at 13.11.57
System ID	25522
Fiber length :	51.456000 km
Fiber ID :	f 6
Message	Queretaro - Celaya
Operator	sirti
Test file	[1] test 1510 a 1610
Results file name	C:\EG&G\400\Results\queretaro-celaya\f6 WS D
Start power	25.916dB at 1600.0 nm
End power	25.959 dB
Data fit	Driff 3 Term Sellmeier

Tabla 33. Configuración de equipo de medición para dispersión cromática.

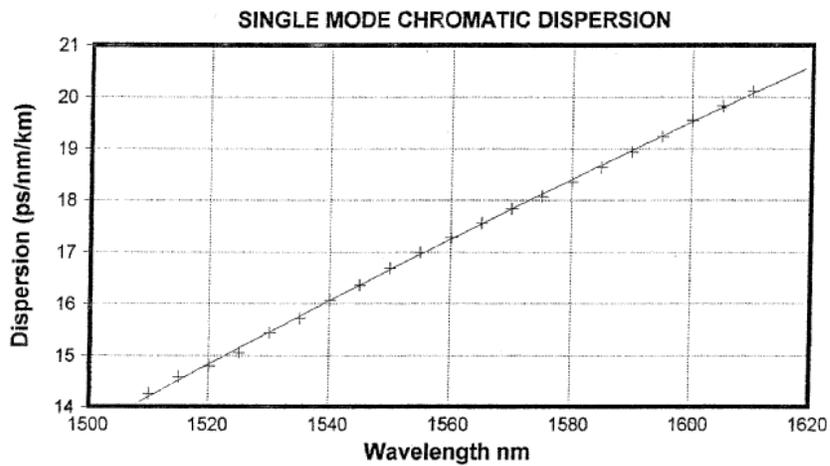


Figura 76. Grafica de dispersión cromática.

VALORES DE MUESTREO

WAVELENGHT nm	DISPERSION ps/nm/km	TIME DELAY ps/km	SLOPE ps.nm-2.km-1	TOTAL DISPERSION ps/nm
1510	14.263	0	0.0635	733.937
1515	14.585	72.121	0.0629	750.483
1520	14.795	146	0.0624	761.306
1525	15.054	220.194	0.0619	774.604
1530	15.44	296.429	0.0614	794.497
1535	15.723	374.337	0.0609	809.036
1540	16.063	453.803	0.0604	826.563
1545	16.359	534.859	0.0599	841.776
1550	16.69	617.481	0.0594	858.782
1555	16.992	701.686	0.059	874.354
1560	17.276	787.358	0.0585	888.975
1565	17.556	874.44	0.058	903.385
1570	17.836	962.922	0.0576	917.787
1575	18.079	1052.711	0.0572	930.292
1580	18.359	1143.808	0.0567	944.69
1585	18.635	1236.293	0.0563	958.879
1590	18.939	1330.228	0.0559	974.533
1595	19.229	1425.649	0.0555	989.452
1600	19.546	1522.586	0.0551	1005.755
1605	19.823	1621.009	0.0547	1020.011
1610	20.11	1720.84	0.0543	1034.769

Tabla 34. Valores de muestreo.

Enlace intermedio Celaya – Irapuato.

La tabla 35 y 37 muestran la configuración realizada en el equipo de medición para analizar la dispersión cromática del enlace intermedio.

Las figuras 77 y 78 muestran la grafica de la dispersión cromática obtenida de la prueba realizada. En las tablas 36 y 38 se detallan los valores del muestreo de la dispersión cromática.

FD440 Chromatic Dispersion Results (resultados de dispersión cromática).

Fibra 5

Date of measurement	13 March 2002 at 16.45.52
System ID	25522
Fiber length :	65.778000 km
Fiber ID :	f 5
Message	Celaya - Irapuato
Operator	sirti
Test file	[1] test 1510 a 1610
Results file name	C:\EG&G\400\Results\celaya-irapuato\f5 WS D
Start power	35.233dB at 1600.0 nm
End power	34.964 dB
Data fit	Drift 3 Term Sellmeier

Tabla 35. Configuración de equipo de medición para dispersión cromática.

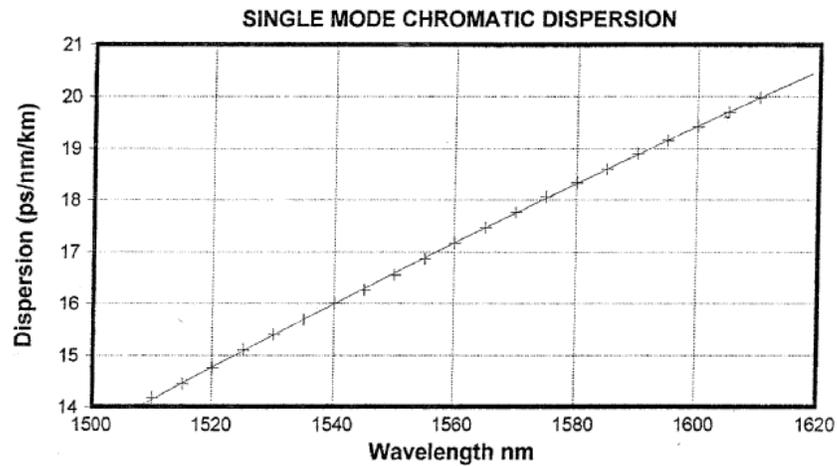


Figura 77. Grafica de dispersión cromática.

VALORES DE MUESTREO

WAVELENGTH nm	DISPERSION ps/nm/km	TIME DELAY ps/km	SLOPE ps.nm ⁻² .km ⁻¹	TOTAL DISPERSION ps/nm
1510	14.179	0	0.063	932.641
1515	14.453	71.58	0.0625	950.721
1520	14.757	144.607	0.0619	970.709
1525	15.107	219.268	0.0614	993.717

1530	15.401	295.54	0.0609	1013.075
1535	15.667	373.26	0.0604	1031.831
1540	16.009	452.5	0.06	1053.072
1545	16.263	533.182	0.0595	1069.76
1550	16.546	615.206	0.059	1088.387
1555	16.872	698.752	0.0585	1109.81
1560	17.162	783.838	0.0581	1128.909
1565	17.473	870.425	0.0576	1149.314
1570	17.759	958.504	0.0572	1168.129
1575	18.061	1048.052	0.0568	1187.991
1580	18.338	1139.047	0.0563	1206.21
1585	18.591	1231.369	0.0559	1222.894
1590	18.901	1325.1	0.0555	1243.277
1595	19.149	1420.226	0.0551	1259.608
1600	19.417	1516.641	0.0547	1277.182
1605	19.693	1614.415	0.0543	1295.36
1610	19.977	1713.59	0.0539	1314.051

Tabla 36. Valores de muestreo.

Fibra 6

Date of measurement	13 March 2002 at 16.51.04
System ID	25522
Fiber length :	65.778000 km
Fiber ID :	f 6
Message	Celaya - Irapuato
Operator	sirti
Test file	[1] test 1510 a 1610
Results file name	C:\EG&G\400\Resuits\celaya-irapuato\f6 WS D
Start power	41.679dB at 1600.0 nm
End power	41.591 dB
Data fit	Driff 3 Term Sellmeier

Tabla 37. Configuración de equipo de medición para dispersión cromática.

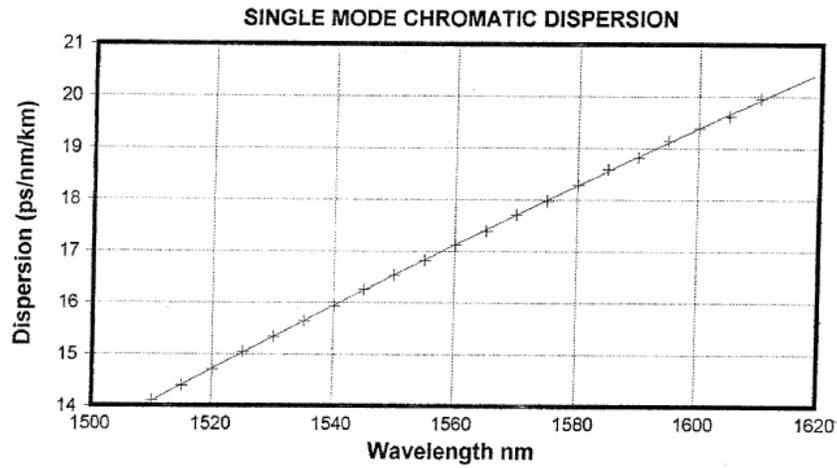


Figura 78. Grafica de dispersión cromática.

VALORES DE MUESTREO

WAVELENGTH nm	DISPERSION ps/nm/km	TIME DELAY ps/km	SLOPE ps.nm-2.km-1	TOTAL DISPERSION ps/nm
1510	14.111	0	0.0631	928.185
1515	14.398	71.272	0.0626	947.074
1520	14.707	144.034	0.0821	967.368
1525	15.049	218.423	0.0615	989.903
1530	15.342	294.402	0.061	1009.181
1535	15.842	371.862	0.0605	1028.899
1540	15.938	450.811	0.0801	1048.343
1545	16.257	531.296	0.0596	1069.322
1550	16.537	613.281	0.0591	1087.799
1555	16.827	696.693	0.0588	1106.857
1580	17.419	781.559	0.0582	1126.084
1565	17.391	887.838	0.0577	1143.955
1570	17.703	955.57	0.0573	1164.451
1575	17.977	1044.77	0.0589	1182.483
1580	18.275	1138.4	0.0584	1202.124
1585	18.59	1227.565	0.056	1222.83
1590	18.812	1321.069	0.0556	1237.383
1595	19.134	1415.933	0.0552	1258.6
1600	19.385	1512.231	0.0548	1275.125
1605	19.612	1609.725	0.0544	1290.049
1610	19.523	1708.634	0.054	1312.376

Tabla 38. Valores de muestreo.

4.3.6 Análisis de resultados

Primeramente hay que considerar el tipo de tráfico que va a ser transportado por el enlace, en nuestro caso es de 2.5 Gb/s. posteriormente necesitamos ubicar los resultados obtenidos del estudio de dispersión cromática en la grafica ilustrada en la figura 78 en esta grafica veremos la distancia máxima de enlace intermedio que se puede alcanzar sin generar errores en la trama de transmisión de acuerdo con los datos de dispersión y tipo de tráfico. Adicionalmente en la grafica también podemos observar de acuerdo a la distancia del enlace intermedio que otro tipo de tráfico podemos cursar con estos valores de dispersión.

Los valores que debemos de considerar de las tablas de resultados de dispersión cromática son de acuerdo a la banda (longitudes de onda) en la que vamos a poner a funcionar el sistema DWDM y sobre la cual vamos a estar sintonizados, en nuestro caso de es la Banda C que se encuentra de (1529.94 a 1560.61) nm o de la frecuencia 192.1 a 195.95 (Thz).

En la tabla 39 se muestra la distribución de longitudes de onda para la Banda C.

C Band														
RED 2			RED 1			MASTER			BLUE 1			BLUE 2		
Ch	F (THz)	λ (nm)	Ch	F (THz)	λ (nm)	Ch	F (THz)	λ (nm)	Ch	F (THz)	λ (nm)	Ch	F (THz)	λ (nm)
41	192,05	1561,01	49	192,85	1554,54	57	193,65	1548,11	65	194,45	1541,75	73	195,25	1535,43
1	192,1	1560,61	9	192,9	1554,13	17	193,7	1547,72	25	194,5	1541,35	33	195,3	1535,04
42	192,15	1560,2	50	192,95	1553,73	58	193,75	1547,32	66	194,55	1540,95	74	195,35	1534,64
2	192,2	1559,79	10	193	1553,33	18	193,8	1546,92	26	194,6	1540,56	34	195,4	1534,25
43	192,25	1559,39	51	193,05	1552,93	59	193,85	1546,52	67	194,65	1540,16	75	195,45	1533,86
3	192,3	1558,98	11	193,1	1552,52	19	193,9	1546,12	27	194,7	1539,77	35	195,5	1533,47
44	192,35	1558,58	52	193,15	1552,12	60	193,95	1545,72	68	194,75	1539,37	76	195,55	1533,07
4	192,4	1558,17	12	193,2	1551,72	20	194	1545,32	28	194,8	1538,98	36	195,6	1532,68
45	192,45	1557,77	53	193,25	1551,32	61	194,05	1544,92	69	194,85	1538,58	77	195,65	1532,29
5	192,5	1557,36	13	193,3	1550,92	21	194,1	1544,53	29	194,9	1538,19	37	195,7	1531,9
46	192,55	1556,96	54	193,35	1550,52	62	194,15	1544,13	70	194,95	1537,79	78	195,75	1531,51
6	192,6	1556,55	14	193,4	1550,12	22	194,2	1543,73	30	195	1537,4	38	195,8	1531,12
47	192,65	1556,15	55	193,45	1549,72	63	194,25	1543,33	71	195,05	1537	79	195,85	1530,72
7	192,7	1555,75	15	193,5	1549,32	23	194,3	1542,94	31	195,1	1536,61	39	195,9	1530,33
48	192,75	1555,34	56	193,55	1548,91	64	194,35	1542,54	72	195,15	1536,22	80	195,95	1529,94
8	192,8	1554,94	16	193,6	1548,51	24	194,4	1542,14	32	195,2	1535,82	40	196	1529,55

Tabla 39. Distribución de longitudes de onda para la banda C.

En la tabla 40 se muestra la distribución de longitudes de onda para la Banda L, que no va a ser utilizada en nuestro caso práctico pero se pone para que se conozca.

L Band														
RED 2			RED 1			MASTER			BLUE 1			BLUE 2		
Ch	F (THz)	λ (nm)	Ch	F (THz)	λ (nm)	Ch	F (THz)	λ (nm)	Ch	F (THz)	λ (nm)	Ch	F (THz)	λ (nm)
41	186,95	1603,60	49	187,75	1596,78	57	188,55	1589,99	65	189,35	1583,27	73	190,15	1576,61
1	187	1603,17	9	187,8	1596,34	17	188,6	1589,57	25	189,4	1582,85	33	190,2	1576,20
42	187,05	1602,74	50	187,85	1595,91	58	188,65	1589,15	66	189,45	1582,44	74	190,25	1575,78
2	187,1	1602,31	10	187,9	1595,49	18	188,7	1588,73	26	189,5	1582,02	34	190,3	1575,37
43	187,15	1601,88	51	187,95	1595,06	59	188,75	1588,30	67	189,55	1581,60	75	190,35	1574,95
3	187,2	1601,46	11	188	1594,64	19	188,8	1587,88	27	189,6	1581,18	35	190,4	1574,54
44	187,25	1601,03	52	188,05	1594,22	60	188,85	1587,46	68	189,65	1580,77	76	190,45	1574,13
4	187,3	1600,60	12	188,1	1593,79	20	188,9	1587,04	28	189,7	1580,35	36	190,5	1573,71
45	187,35	1600,17	53	188,15	1593,37	61	188,95	1586,62	69	189,75	1579,93	77	190,55	1573,30
5	187,4	1599,75	13	188,2	1592,95	21	189	1586,20	29	189,8	1579,52	37	190,6	1572,89
46	187,45	1599,32	54	188,25	1592,52	62	189,05	1585,78	70	189,85	1579,10	78	190,65	1572,48
6	187,5	1598,89	14	188,3	1592,10	22	189,1	1585,36	30	189,9	1578,69	38	190,7	1572,06
47	187,55	1598,47	55	188,35	1591,68	63	189,15	1584,95	71	189,95	1578,27	79	190,75	1571,65
7	187,6	1598,04	15	188,4	1591,26	23	189,2	1584,53	31	190	1577,86	39	190,8	1571,24
48	187,65	1597,62	56	188,45	1590,83	64	189,25	1584,11	72	190,05	1577,44	80	190,85	1570,83
8	187,7	1597,19	16	188,5	1590,41	24	189,3	1583,69	32	190,1	1577,03	40	190,9	1570,42

Tabla 40. Distribución de longitudes de onda para la banda L.

Si observamos la figura 78 los límites de distancia dependen del tipo de tráfico y al coeficiente de dispersión cromática. En la tabla 41 podemos encontrar cuales son nuestros resultados derivados de las mediciones del coeficiente de dispersión cromática obtenido en el caso práctico. Sabemos que el coeficiente máximo en general estuvo alrededor de 17 ps/nm/km para la banda C.

Coeficiente de Dispersión Cromática	L [km]		
	2.5 Gb/s	10 Gb/s	40 Gb/s
1	12800	1600	200
2	6400	800	100
4	3200	400	50
6	2133	267	33

8	1600	200	25
10	1280	160	20
15	853	107	13
17	753	94	12
20	640	80	10

Tabla 41. Distancia máxima derivada del coeficiente de dispersión y tipo de tráfico.

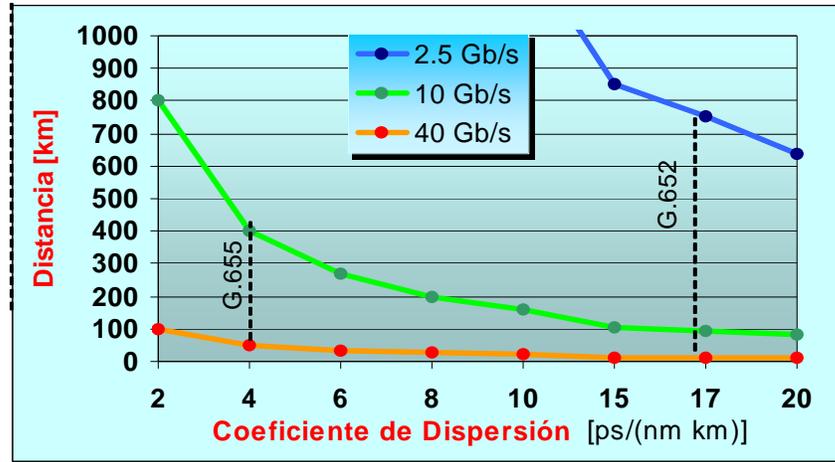


Figura 78. Gráfica de dispersión cromática en relación de la distancia y tipo de tráfico.

En la tabla 42 se muestran los resultados máximos de dispersión tomados en el caso práctico y se compara si la distancia real del enlace es adecuada para el tipo de tráfico a transportar.

Coeficiente de Dispersión Máximo en banda C				Análisis de Resultados Tráfico / Distancia		
Nombre del Sitio	Fibra 5	Fibra 6	Distancia de enlace L [Km]	Viabilidad por tipo de tráfico		
	Max	Max		2.5 Gb/s	10 Mb/s	40 Gb/s
México - Nopala	17.236	17.112	149.1	Correcto	No apto	No apto
Nopala - Queretaro	17.293	17.221	139.63	Correcto	No apto	No apto
Queretaro - Celaya	17.354	17.276	51.45	Correcto	Correcto	No apto
Celaya - Irapuato	17.162	17.119	65.77	Correcto	Correcto	No apto

Tabla 42. Resumen de resultados de las pruebas de dispersión cromática para el caso práctico.

4.3.7 Conclusiones de viabilidad del medio

El enlace de fibra óptica para transportar tráfico de 2.5 Gb/s entre la ciudad de México e Irapuato Guanajuato resulta ser apropiado para utilizarlo mediante la tecnología DWDM, por lo que se podrán transportar hasta 80 canales de 2.5 Gb/s con un solo par de fibras ópticas o mas dependiendo del equipo a utilizar. La limitante de canales a transportar será el equipo DWDM y no el medio de transporte, ya que fue probado y puede funcionar adecuadamente para transportar tráfico de 2.5 Gb/s de acuerdo a las mediciones de realizadas de OTDR, PMD y Dispersión Cromática.

Debido a que el medio de transporte es adecuado, podemos proceder con la implementación del equipo DWDM como se mostrará en el subcapítulo 4.4.

4.4 PROCEDIMIENTO PARA LA IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA EN SERVICIO DE UN SISTEMA DWDM

Con los resultados obtenidos en la viabilidad del medio hay que realizar un diseño de red de acuerdo al tipo y cantidad de trafico que se quiere transportar, así como también adecuándonos a las necesidades específicas del usuario final como por ejemplo se tiene que saber donde quiere tener equipos terminales y donde solo repetidores, adicional a esto y derivado del estudio se requiere realizar la elección de los amplificadores a utilizar en cada parte del sistema DWDM y en general se planea el equipamiento a utilizar. El diseño final nos dará una topología de red.

4.4.1 Topología de red

Para el enlace de México – Irapuato el diseño de red quedo de acuerdo a la figura 79, el significado de la simbología se encuentra en la figura 80.

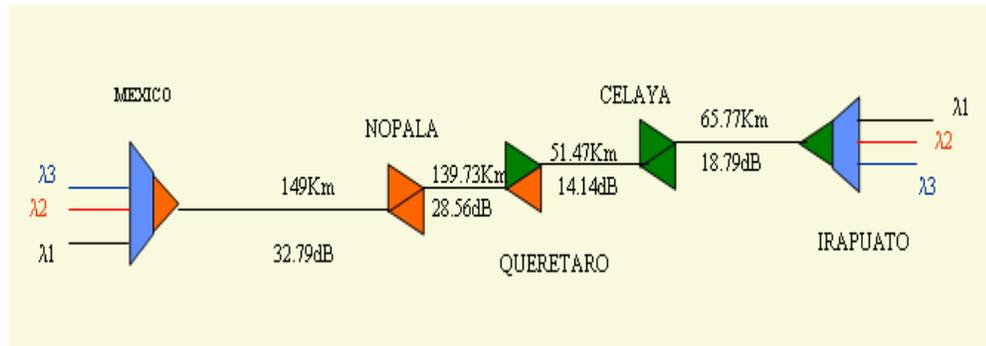


Figura 79. Topología de red para México - Irapuato.

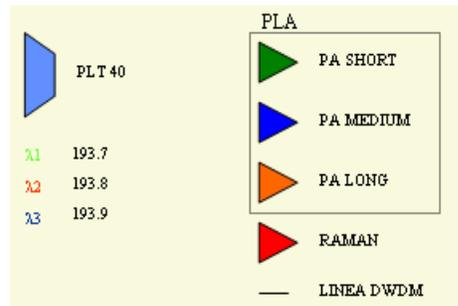


Figura 80. Simbología de topología de red.

4.4.2 Instalación de equipo

Se instaló un equipo marca Marconi (Ericsson) modelo PLT 40 para 40 canales de 2,5 Gb/s. De acuerdo a la topología se requirió instalar 2 equipos terminales PLT 40 que funcionan para bajar y subir tráfico de 2.5 Gb/s entre México e Irapuato y 3 repetidores duales PLA para la regeneración de la señal en Nopala, Querétaro y Celaya.

Se realizó la instalación mecánica de todos los gabinetes y equipo de acuerdo a los estándares de instalación de equipo óptico de telecomunicaciones. La instalación del equipo a detalle no se tocó en esta tesis debido a que se considera un tema aparte del estudio de la tecnología DWDM.

Los componentes y el flujo de señal en el gabinete principal “Core” se muestran en la figura 82.

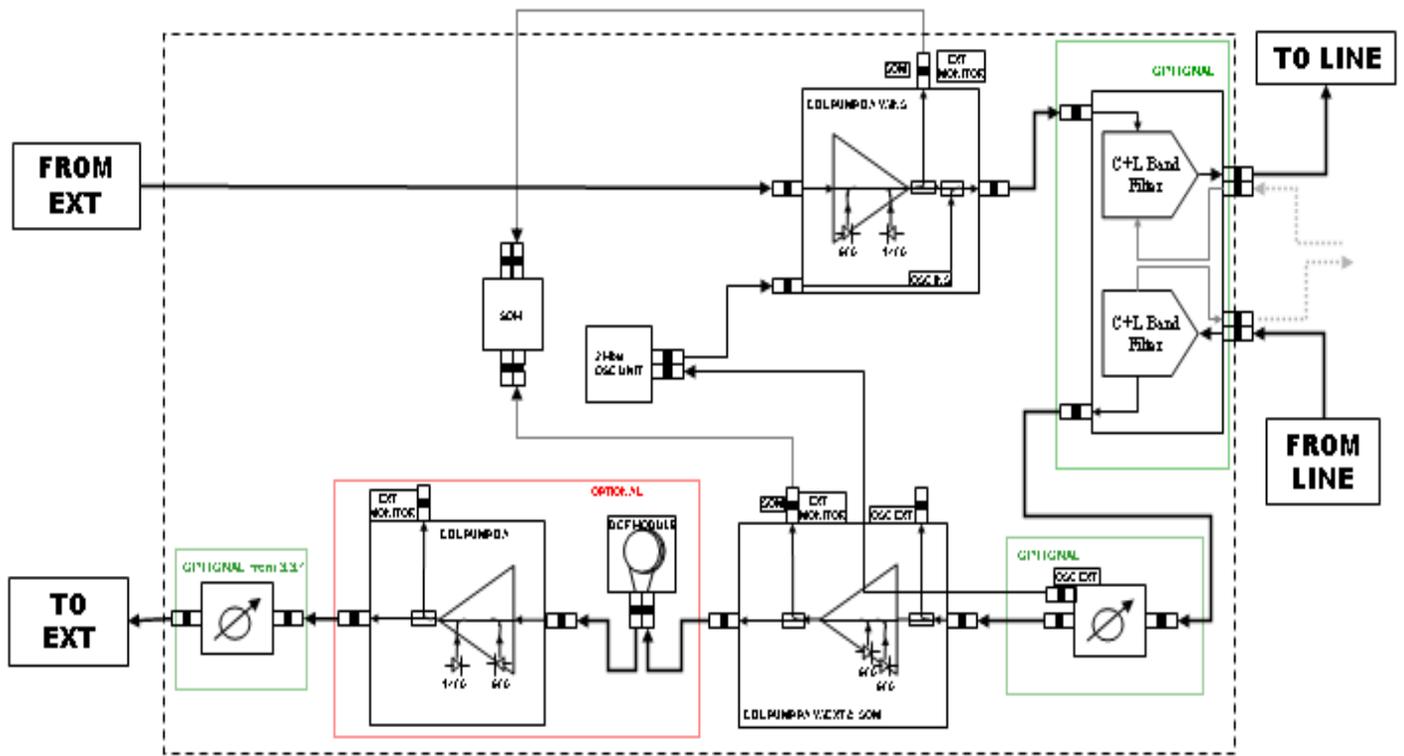


Figura 82. Componentes y flujo de señal en el gabinete principal “core”.

El flujo de señal y los componentes del gabinete “extension” se encuentran en la figura 83.

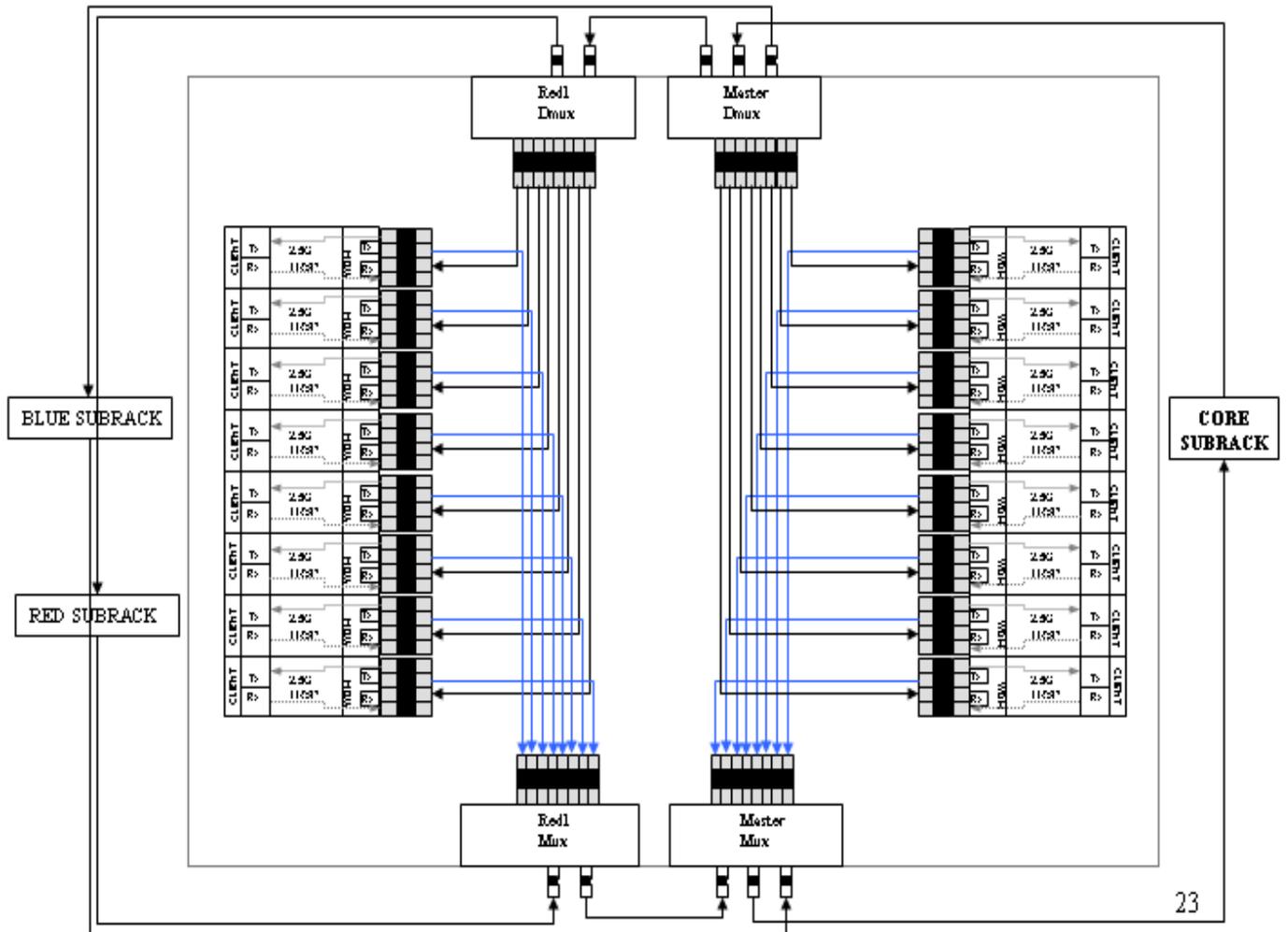


Figura 83. Componentes y flujo de señal en el gabinete de "extension"

4.4.3 Pruebas internas del equipo (Stand Alone)

Estas pruebas se deben de hacerse en cada sitio involucrado en la red e incluyen la revisión preliminar de lo siguiente.

- Revisión del inventario e inspección visual de todas las tarjetas electrónicas del equipo y de las fibras requeridas para la implementación de acuerdo al diseño.
- Revisión de la documentación del diseño para compararla con lo instalado en sitio para evitar tener faltantes o equivocaciones durante la puesta en servicio.
- Revisión del etiquetado y conectividad de las fibras que sea correcto y de acuerdo a diseño.
- Revisión de la polaridad conectada al panel de alimentación del equipo para evitar daños al sistema.
- Encendido del equipo y revisión visual de que ninguna tarjeta este alarmada visualmente con un diodo led rojo indicando falla de unidad.
- Revisar que el nivel de software solicitado y liberado por los documentos de diseño sea el adecuado y de no ser así proceder a cargar el que sea compatible con lo esperado.
- Configuración de las direcciones NSAP para monitoreo remoto del equipo.
- Asegurarse que las alarmas generadas son correctamente reportadas en el software de la aplicación.

Posteriormente se realizan las pruebas de hardware, estas pruebas son realizadas para verificar el correcto funcionamiento de las tarjetas opto-electrónicas sobre todo para determinar si la potencia de los láser se mantiene en todo el rango de operación que determina las características de cada amplificador ya que por ser una red de alta disponibilidad y confiabilidad se requiere asegurar que al realizar un incremento o decremento de canales en el equipo la potencia se pueda mantener regulada sin afectación general al tráfico.

Las principales tarjetas que se prueban son:

Transponder (convertidor de longitud de onda) y acopladoras de tráfico.

Pre-amplificadores PAL / PAS (Pre-amplificador long / Short) corto o largo alcance.

Booster Amplifier (BA Tx) Bomba de amplificación para transmisión.

VOA (Rx) Atenuador variable en recepción.

Otras funciones de prueba son la simulación y monitoreo de alarmas generadas en el equipo con la finalidad de observar si al ser generadas se reflejan en el software para poder ser monitoreadas posteriormente por un centro de monitoreo llamado sistema de gestión.

A continuación se muestran los resultados de las pruebas internas “stand alone” realizadas a cada uno de los equipos involucrados en el enlace México – Irapuato. Estas pruebas se realizan en las siguientes tarjetas ópticas.

- Transponders (TP).
- Pre-amplificadores (PA).

- Amplificadores de alta potencia de transmisión (BA Tx).
- Amplificadores de alta potencia de recepción (BA Rx).

Pruebas internas para el equipo del sitio México (equipo terminal PLT)

Transponder

Se mide la salida de potencia óptica activando el láser del transponder para verificar que exista señal de alimentación hacia el lado cliente. Posteriormente se realiza la prueba de B.E.R. (Bit Error Rate) y llena la sección correspondiente.

La tabla 43 muestra los resultados de la prueba interna en los transponders para el lado cliente.

TP frequency- (frecuencia)	TP type – (Tipo de transponder)	Link mode / Terminal mode – (modo de enlace)	Slot position (posición de ranura)	O/P power[d Bm] (potencia óptica medida)	BER test satisfactory (prueba de BER. Satisfactoria)
193.70 THz	2.5 G/s	Terminal mode	25	-3.0	Yes
193.8 THz	2.5 Gb/s	Terminal mode	9	-4.0	Yes
193.9 Thz	2.5 Gb/s	Terminal mode	23	-3.0	Yes

Tabla 43. Resultados de la prueba interna a transponders en el lado cliente.

La medición del transponder del lado del canal óptico se realiza apagando todos los transponders excepto el que va a estar en prueba, se varía la potencia mediante software y se verifica con un medidor de potencia que la salida corresponda a la seleccionada mediante el software en la salida de la tarjeta MUX del DWDM. La tabla 44 muestra los resultados de la prueba.

TP Frequency (Thz) (frecuencia)	Slot Position (posición de ranura)	LCT Set Power (dBm) potencia seleccionada por computadora	Mux Attenuation (dBm) (atenuación derivada del MUX)	Measured O/P Power (dBm) (potencia óptica medida)
193.7	25	-2	~ 8.0	-10
		-6	~ 8.0	-14
		-12	~ 8.0	-20.13
193.8	9	-2	~ 8.0	-10
		-6	~ 8.0	-14
		-12	~ 8.0	-20.2
193.9	23	-2	~ 8.0	-10
		-6	~ 8.0	-14
		-12	~ 8.0	20.23

Tabla 44. Resultados de la prueba interna a transponders del lado canal óptico.

PA (pre-amplificador)

Primeramente se inyecta la potencia de entrada más baja aceptada por la tarjeta para llevarla al límite máximo de sensibilidad y amplificación. Posteriormente se inyecta una potencia variable a la entrada del pre-amplificador este deberá controlar su potencia de salida de acuerdo a la potencia seleccionada por software. La tabla 45 muestra los resultados.

Unit type (tipo de unidad)	I/P power (potencia de entrada)	LCT set (potencia óptica seleccionada)	Measured (mediciones)	Test cable (atenuación derivada de la fibra)	Actual O/P power (potencia óptica de salida)
	[dBm]	O/P power [dBm]	O/P power [dBm]	attenuation [dB]	[dBm]
PA	~ -28	+6	-4.8	11.0	6.2
	~ -28	+10	-0.6	11.0	10.4
	~ -28	+13	2.6	11.0	13.6
	~ -28	+15	4.78	11.0	15.78
PA	~ -8	+6	-4.85	11.0	6.15
	~ -15.2	+6	-4.81	11.0	6.19
	~ -28	+6	0.76	11.0	6.17
	~ -5	+6	2.8	11.0	6.17

Tabla 45. Resultados de la prueba interna en los preamplificadores PA.

BA Tx (Amplificador de alta potencia para transmisión)

Se realiza la prueba aplicando una inyección de potencia a la entrada del PA y conectando su salida a entrada del BA Tx, posteriormente se seleccionan diversas salidas de potencia vía software y se verifica que la salida corresponda con la seleccionada mediante un medidor de potencia óptica. La tabla 46 muestra los resultados de la prueba.

Unit type (tipo de unidad)	I/P power (potencia de entrada)	LCT set (potencia óptica seleccionada)	Measured (mediciones)	Test cable (atenuación derivada de la fibra)	Actual O/P power (potencia óptica de salida)
	[dBm]	O/P power [dBm]	O/P power [dBm]	attenuation [dB]	[dBm]
BA-TX	N/A	+10	-0.47	11	10.63
	N/A	+13	2.72	11	13.72
	N/A	+16	0.78	16	16.78
	N/A	+19.5	3.3	16	19.3

Tabla 46. Resultados de la prueba interna en los amplificadores de alta potencia de transmisión BA.

BA Rx (amplificador de alta potencia en recepción)

Se realiza la misma prueba que la anterior pero inyectando la salida del PA a la entrada del amplificador BA Rx. La tabla 47 muestra los resultados de la prueba.

Unit type (tipo de unidad)	I/P power (potencia de entrada)	LCT set (potencia óptica seleccionada)	Measured (mediciones)	Test cable (atenuación derivada de la fibra)	Actual O/P power (potencia óptica de salida)
	[dBm]	O/P power [dBm]	O/P power [dBm]	attenuation [dB]	[dBm]
BA-RX	NA	10	-5.43	16	10.57
	NA	13	-2.3	16	13.7
	NA	16	0.87	16	16.87
	NA	19.5	4.72	16	20.72

Tabla 47. Resultados de la prueba interna en los amplificadores de alta potencia para recepción.

Nopala (equipo repetidor o amplificador PLA)

Debido a que esta unidad es un regenerador doble se realizan pruebas a ambas rutas de equipamiento. La prueba inicia inyectando la potencia mas baja aceptada por el pre-amplificador y se seleccionan varias potencias de salida para verificar que el pre-amplificador puede amplificar la señal aun y con la potencia mas baja a su entrada. Posteriormente se inyectan diferentes potencias a la entrada del pre-amplificador y se selecciona una salida constante, de esta forma se verifica que puede mantener y controlar la salida aunque se varié la potencia de entrada. La tabla 48 muestra los resultados de la prueba interna en los pre-amplificadores.

PA Este y Oeste

Unit type (tipo de unidad)	I/P power (potencia de entrada)	LCT set (potencia óptica seleccionada)	Measured (mediciones)	Test cable (atenuación derivada de la fibra)	Actual O/P power (potencia óptica de salida)
	[dBm]	O/P power	O/P power	attenuation	[dBm]
		[dBm]	[dBm]	[dB]	
PA EAST	~ -22.9	+6	-14.2	-20	5.8
	~ 22.9	+10	-8.88	-20	11.12
	~ 22.9	+13	-5.77	-20	14.23
	~ 22.9	+15	-3.60	-20	16.4
PA EAST	~ -8.4	10	-9.71	-20	10.29
	-19.5	10	-9.58	-20	10.42
	~ -22	10	-9.31	-20	10.69
	~ -25	10	-9.11	-20	10.89
PA WEST	-19.5	6	-13.62	-20	6.38
	-19.5			-20	20
	-19.5	10	-9.55	-20	10.45
	-19.5			-20	20

	-19.5	13	-6.49	-20	13.51
	-19.5			-20	20
	-19.5	15	-4.43	-20	15.57
PA WEST	-8.7	10	-9.68	-20	10.32
	-19.5	10	-9.43	-20	10.57
	~ -22	10	-9.28	-20	10.72
	~ -25	10	-9.04	-20	10.96

Tabla 48. Resultados de la prueba interna en los pre amplificadores PA.

BA Tx (OLA Este y Oeste)

Se inyecta potencia fija baja a la entrada del PA y la salida del mismo se inyecta a la entrada del BA, la finalidad es verificar que la potencia de salida del BA sea muy cercana a la potencia que se selecciona vía software. La tabla 49 y 50 muestran los resultados de la prueba.

Unit type (tipo de unidad)	I/P power (potencia de entrada)	LCT set (potencia óptica seleccionada)	Measured (mediciones)	Test cable (atenuación derivada de la fibra)	Actual O/P power (potencia óptica de salida)
	[dBm]	O/P power	O/P power	attenuation	[dBm]
		[dBm]	[dBm]	[dB]	
BA OLA WEST	NA	10	-9.73	-20	10.27
	NA	13	-6.68	-20	13.32
	NA	16	-3.63	-20	16.37
	NA	19.5	0.07	-20	20.07

Tabla 49. Resultados de la prueba interna en el amplificador de alta potencia BA OLA oeste.

Unit type (tipo de unidad)	I/P power (potencia de entrada)	LCT set (potencia óptica seleccionada)	Measured (mediciones)	Test cable (atenuación derivada de la fibra)	Actual O/P power (potencia óptica de salida)

	[dBm]	O/P power	O/P power	attenuation	[dBm]
		[dBm]	[dBm]	[dB]	
BA OLA EAST	NA	10	-9.56	-20	10.44
	NA	13	-6.54	-20	13.46
	NA	16	-3.52	-20	16.48
	NA	19.5	0.07	-20	20.07

Tabla 50. *Resultados de la prueba interna en el amplificador de alta potencia BA OLA lado este.*

Querétaro (equipo repetidor o amplificador PLA)

Las técnicas de medición para un nodo repetidor o amplificador “PLA” se explicaron anteriormente y solo nos concretaremos a plasmar los resultados encontrados en las tablas 51, 52 y 53.

PA Este y Oeste

Unit type (tipo de unidad)	I/P power (potencia de entrada)	LCT set (potencia óptica seleccionada)	Measured (mediciones)	Test cable (atenuación derivada de la fibra)	Actual O/P power (potencia óptica de salida)
	[dBm]	O/P power	O/P power	attenuation	[dBm]
		[dBm]	[dBm]	[dB]	
PA EAST	~ -22.9	+6	-14.0	-20	6.0
	~ 22.9	+10	-8.90	-20	11.1
	~ 22.9	+13	-5.75	-20	14.25
	~ 22.9	+15	-3.8	-20	16.2
PA EAST	~ -8.4	10	-9.75	-20	10.25
	-19.5	10	-9.57	-20	10.43
	~ -22	10	-9.38	-20	10.62
	~ -25	10	-9.10	-20	10.90
PA WEST	-19.5	6	-13.65	-20	6.35
	-19.5	10	-9.55	-20	10.45
	-19.5	13	-6.49	-20	13.51
	-19.5	15	-4.43	-20	15.57
PA WEST	-8.7	10	-9.64	-20	10.36
	-19.5	10	-9.40	-20	10.6
	~ -22	10	-9.25	-20	10.75

	~ -25	10	-9.1	-20	10.9
--	-------	----	------	-----	------

Tabla 51. Resultados de la prueba interna en los pre amplificadores PA.

BA Tx (OLA Este – Oeste)

Unit type (tipo de unidad)	I/P power (potencia de entrada)	LCT set (potencia óptica seleccionada)	Measured (mediciones)	Test cable (atenuación derivada de la fibra)	Actual O/P power (potencia óptica de salida)
	[dBm]	O/P power	O/P power	attenuation	[dBm]
		[dBm]	[dBm]	[dB]	
BA OLA WEST	NA	10	-9.79	-20	10.21
	NA	13	-6.64	-20	13.36
	NA	16	-3.63	-20	16.37
	NA	19.5	0.04	-20	20.06

Tabla 52. Resultados de la prueba interna en el amplificador de alta potencia BA OLA oeste.

Unit type (tipo de unidad)	I/P power (potencia de entrada)	LCT set (potencia óptica seleccionada)	Measured (mediciones)	Test cable (atenuación derivada de la fibra)	Actual O/P power (potencia óptica de salida)
	[dBm]	O/P power	O/P power	attenuation	[dBm]
		[dBm]	[dBm]	[dB]	
BA OLA EAST	NA	10	-9.45	-20	10.65
	NA	13	-6.51	-20	13.49
	NA	16	-3.42	-20	16.68
	NA	19.5	0.04	-20	20.05

Tabla 53. Resultados de la prueba interna en el amplificador de alta potencia BA OLA lado este.

Celaya (equipo repetidor o amplificador PLA).

Las técnicas de medición para un nodo PLA se explicaron anteriormente y solo nos concretaremos a plasmar los resultados encontrados en las tablas 54, 55 y 56.

PA Este y Oeste

Unit type (tipo de unidad)	I/P power (potencia de entrada)	LCT set (potencia óptica seleccionada)	Measured (mediciones)	Test cable (atenuación derivada de la fibra)	Actual O/P power (potencia óptica de salida)
	[dBm]	O/P power	O/P power	attenuation	[dBm]
		[dBm]	[dBm]	[dB]	
PA EAST	~ -22.9	+6	-14.6	-20	5.4
	~ 22.9	+10	-8.95	-20	11.05
	~ 22.9	+13	-5.65	-20	14.35
	~ 22.9	+15	-3.86	-20	16.24
PA EAST	~ -8.4	10	-9.78	-20	10.22
	-19.5	10	-9.51	-20	10.49
	~ -22	10	-9.25	-20	10.75
	~ -25	10	-9.05	-20	10.15
PA WEST	-19.5	6	-13.85	-20	6.15
	-19.5	10	-9.75	-20	10.15
	-19.5	13	-6.49	-20	13.51
	-19.5	15	-4.45	-20	15.55
PA WEST	-8.7	10	-9.69	-20	10.31
	-19.5	10	-9.35	-20	10.65
	~ -22	10	-9.20	-20	10.80
	~ -25	10	-9.9	-20	10.1

Tabla 54. Resultados de la prueba interna en los pre amplificadores PA.

BA Tx (OLA Este – Oeste)

Unit type (tipo de unidad)	I/P power (potencia de entrada)	LCT set (potencia óptica seleccionada)	Measured (mediciones)	Test cable (atenuación derivada de la fibra)	Actual O/P power (potencia óptica de salida)
	[dBm]	O/P power	O/P power	attenuation	[dBm]
		[dBm]	[dBm]	[dB]	
BA OLA WEST	NA	10	-9.85	-20	10.15
	NA	13	-6.55	-20	13.45
	NA	16	-3.64	-20	16.36
	NA	19.5	0.02	-20	20.08

Tabla 55. Resultados de la prueba interna en el amplificador de alta potencia BA OLA oeste.

Unit type (tipo de unidad)	I/P power (potencia de entrada)	LCT set (potencia óptica seleccionada)	Measured (mediciones)	Test cable (atenuación derivada de la fibra)	Actual O/P power (potencia óptica de salida)
	[dBm]	O/P power	O/P power	attenuation	[dBm]
		[dBm]	[dBm]	[dB]	
BA OLA EAST	NA	10	-9.40	-20	10.60
	NA	13	-6.45	-20	13.55
	NA	16	-3.49	-20	16.61
	NA	19.5	0.04	-20	20.02

Tabla 56. Resultados de la prueba interna en el amplificador de alta potencia BA OLA lado este.

Irapuato (equipo terminal PLT)

Transponder

Las técnicas de medición son las mismas utilizadas en el nodo PLT de México por lo tanto solo se muestran los resultados en la tabla 57, 58, 59, 60 y 61.

TP frequency- (frecuencia)	TP type – (Tipo de transponder)	Link mode / Terminal mode – (modo de enlace)	Slot position (posición de ranura)	O/P power[d Bm] (potencia óptica medida)	BER test satisfactory (prueba de BER. Satisfactoria)
193.70 THz	2.5 G/s	Terminal mode	25	-3.2	Yes
193.8 THz	2.5 Gb/s	Terminal mode	9	-4.1	Yes
193.9 Thz	2.5 Gb/s	Terminal mode	23	-3.4	Yes

Tabla 57. Resultados de la prueba interna a transponders en el lado cliente.

TP Frequency (Thz)	Slot Position	LCT Set Power (dBm)	Mux Attenuation (dBm)	Measured O/P Power (dBm)
193.7	25	-2	~ 8.0	-10
		-6	~ 8.0	-14
		-12	~ 8.0	-20.03
193.8	9	-2	~ 8.0	-10
		-6	~ 8.0	-14
		-12	~ 8.0	-20.24
193.9	23	-2	~ 8.0	-10.1
		-6	~ 8.0	-14
		-12	~ 8.0	-20.23

Tabla 58. Resultados de la prueba interna a transponders del lado canal óptico.

PA (pre-amplificador)

Unit type	I/P power [dBm]	LCT set O/P power [dBm]	Measured O/P power [dBm]	Test cable attenuation [dB]	Actual O/P power [dBm]
PA	~ -28	+6	-4.9	11.0	6.1
	~ -28	+10	-0.5	11.0	10.5
	~ -28	+13	2.7	11.0	13.7
	~ -28	+15	4.78	11.0	15.78
PA	~ -8	+6	-4.85	11.0	6.15
	~ -15.2	+6	-4.81	11.0	6.19
	~ -28	+6	0.76	11.0	6.17
	~ -5	+6	2.8	11.0	6.17

Tabla 59. Resultados de la prueba interna en los preamplificadores PA.

BA Tx (amplificador de alta potencia)

Unit type	I/P power [dBm]	LCT set O/P power [dBm]	Measured O/P power [dBm]	Test cable Attenuation [dB]	Actual power [dBm]	O/P
BA-TX	N/A	+10	-0.47	11	10.63	
	N/A	+13	2.72	11	13.72	
	N/A	+16	0.78	16	16.78	
	N/A	+19.5	3.3	16	19.3	

Tabla 60. Resultados de la prueba interna en los amplificadores de alta potencia de transmisión BA.

BA Rx (amplificador de alta potencia en recepción)

Unit type	I/P power	LCT set	Measured	Test cable	Actual	O/P
	[dBm]	O/P power	O/P power	Attenuation	[dBm]	
		[dBm]	[dBm]	[dB]		
BA-RX	NA	10	-5.43	16		10.57
	NA	13	-2.3	16		13.7
	NA	16	0.87	16		16.87
	NA	19.5	4.72	16		20.72

Tabla 61. Resultados de la prueba interna en los amplificadores de alta potencia para recepción.

4.4.4 Integración con la red

4.4.4.1 Configuración

Para realizar la integración se requieren realizar las configuraciones básicas que caracterizaran al equipo y lo diferenciarán de todos los demás dentro de la red como son:

- nombre que se asignara al equipo (típicamente es el nombre del sitio o ciudad donde operara).
- dirección NSAP que permitirá gestionarlo remotamente
- activación y selección de los canales de comunicación a utilizar para comunicación remota entre cualquier equipo en la red.
- selección de tipo de tráfico a ser manejado por los transponders (si el equipo es de tipo terminal PLT)
- selección de la forma en que se sincronizara en la red.

4.4.4.2 Calibración

Una vez que la configuración se a completado en todos los sitios del enlace el siguiente proceso es critico y esencial ya que es la calibración del sistema en todo el enlace llamado calibración de estado interno (Inter-Stage Calibration). La calibración es extremadamente necesaria ya que como se ha comentado en capítulos anteriores esta tecnología es muy sensible por la gran capacidad y complejidad de la misma, de no calibrarse existirían efectos no deseables en estos sistemas. El procedimiento involucra el uso de un generador de fuentes Láser típicamente un EXFO IQ2403 o compatible el cual contiene 8 fuentes Láser y debe de ser colocado en la parte más lejana del enlace. El enlace entonces será calibrado tramo por tramo hasta el otro extremo del enlace, se utiliza un equipo analizador de espectros (OSA). Una vez realizado el procedimiento en una dirección deberá ser repetido en la dirección opuesta ya que la transmisión de retorno llegara por la otra fibra y por lo tanto también debe de ser calibrado el sistema en sentido opuesto al iniciado. La siguiente figura 84 muestra como se conecta el generador de 8 fuentes Láser al enlace para la realización de la calibración.

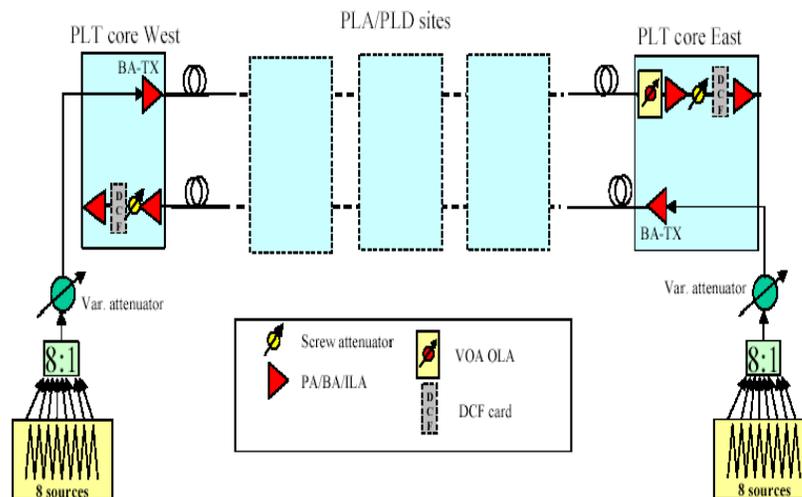


Figura 84. Conexión de fuentes laser al sistema DWDM para calibrarlo.

Nota: Para realizar la calibración del enlace es necesario poner el sistema a toda la carga es decir se tienen que poner los amplificadores a su máxima potencia. Esto corresponde al peor escenario de funcionamiento en términos de variación de la ganancia (GN Gain Variation) y por lo tanto se requiere seleccionar el sistema para trabajar con la máxima capacidad de canales que pueda manejar, en nuestro caso de estudio son 40 Canales. Para evitar un alto costo en el equipo de prueba para realizar esta actividad se elije probar con solo 8 fuentes Láser repartidas de manera uniforme dentro de todo el ancho de banda de la banda C, es así como prácticamente se puede probar el comportamiento previsto por el equipo y la red sin contar con todos los Láser de la banda C (ni equipados dentro del DWDM ni en el equipo de prueba para realizar la calibración), mediante este método de calibración, garantizamos el buen funcionamiento en todo el espectro del sistema aún y cuando el DWDM no sea equipado desde el inicio a su máxima capacidad y con esto damos un gran beneficio y confianza al usuario final desde el punto de vista de escalabilidad es decir, que una vez calibrado a su máxima capacidad el sistema el usuario puede estar seguro que puede incrementar el numero de lambdas (canales) sin un gran disturbio ni riesgo con una alta eficiencia y disponibilidad de red. El procedimiento de calibración también incluye el pronóstico de envejecimiento del sistema y de la misma fibra óptica mediante la inserción de un atenuador fijo en los pre-amplificadores en cada tramo que simulara esta condición calculada para la vida media del sistema, garantizado que continúe trabajando de una manera optima a lo largo de toda su vida útil. Evidentemente si por alguna razón ocurriera una degradación no esperada durante su funcionamiento en cualquier etapa el sistema generará una alarma indicando que hay una condición fuera de lo proyectado y por lo tanto será necesario realizar una investigación de las causas y por ende aplicar las soluciones particulares al problema donde una de ellas pudiera requerirse una nueva calibración.

Instrumentación y material requerido para la calibración.

- Fuente Láser de 8 longitudes de onda con distribución en la banda C, mostrada en la tabla 62.

Fuente	Frecuencia Nominal / lambda	
1	196.0 (THz)	1529,55 (nm)
2	195,5 (THz)	1533,47 (nm)
3	195.0 (THz)	1537,40 (nm)
4	194,4 (THz)	1542,14 (nm)
5	193,8 (THz)	1546,92 (nm)
6	193,2 (THz)	1551,72 (nm)
7	192,6 (THz)	1556,55 (nm)
8	192,1 (THz)	1560,61 (nm)

Tabla 62. Distribución de las 8 fuentes láser utilizadas en el proceso de calibración para la banda C.

Parámetros.

- Dither modulation activada
- Frecuencia = 7Khz
- Corriente = 1mA
- Forma de Onda = Diente de sierra
- Potencia de salida por cada Láser debe ser mayor a 5 dB.

▪ Analizador de espectro óptico (OSA).

Parámetros.

- Resolución de ancho de banda = 0.1 nm
 - Ancho de banda de video ≤ 1 KHz
 - Puntos de muestra ≥ 2001
 - Aplicación de WDM (con canal OSNR, Picos and variación de ganancia GV) activada
 - Medición de OSNR con $\Delta\lambda = 0.4$ nm.
-
- Atenuador variable; con perdida de inserción < 1.5 dB.
 - Medidor de potencia óptica (potencia max de entrada ≥ 20 dBm).
 - Tarjeta mezcladora de 8 fuentes Láser 8:1; con perdida de inserción < 11.5 dB.
 - Fibra óptica para monitoreo con compensador.

- **Atenuadores SC fijos de 1 a 20 dB con diferencia de 1 dB entre cada uno. El valor del atenuador fijo será determinado de acuerdo al campo para la calibración del enlace intermedio “span”.**
- **Atenuadores SC fijos de 1 a 3 dB para la calibración de la vida media del sistema y fibra óptica.**
- **Dos atenuadores fijos SC de 20 dB.**

El procedimiento de calibración puede ser realizado únicamente hasta que todo el enlace esta conectado y todas las fibras ópticas y “path cords” (conexiones de fibra interna del sistema) han sido limpiadas cuidadosamente y verificadas mediante microscopio de que no exista ninguna suciedad ni mal formación en los conectores de fibra. Después de esta verificación no se permiten cambios de ningún tipo durante la calibración es decir no se puede cambiar ninguna fibra, ni conector incluso ni quitar y poner alguna conexión óptica debido a que puede contaminarse, cambiar alguna conexión daría por resultado una calibración probablemente no adecuada y por consiguiente seria recomendable realizarla nuevamente.

Configuración inicial del enlace a carga total

1. Insertar un atenuador fijo de 20 dB en el puerto de entrada de la tarjeta DEMUX para evitar que la condición de BLS (Back Láser Reflection) (apagado del láser por reflexión) se presente. Esta condición se presenta cuando el sensor receptor del láser capta demasiada potencia de retorno debida a la alta refracción de luz, por lo que para evitar su daño físico se apaga aislándose del sistema.

En la figura 85 se muestra la configuración física de conexión.

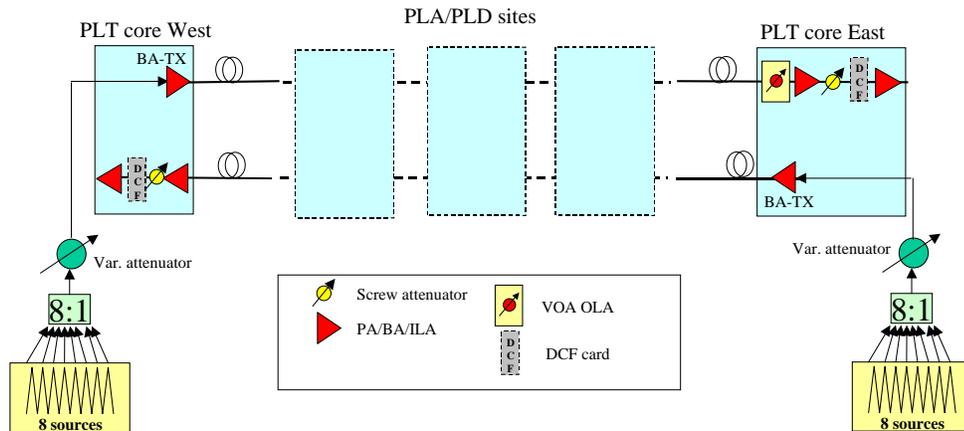


Figura 85. Diagrama de conexión de las fuentes láser y atenuadores.

2. Seleccionar las 8 fuentes Láser para entregar una potencia de salida en conjunto en el rango de (-0.5; +0.5) dB, esta potencia será la entrada del amplificador BA (Booster Amplifier) y simulara la entrada de las 40 Lambdas, para lograr estar dentro del rango de potencia de salida se coloca un atenuador variable que permite esta operación.
3. Ecuilizar las 8 fuentes láser de tal forma que al medir la variación de ganancia (Gain Variation) con el analizador de espectro (OSA) se encuentre por debajo o igual a 0.2 dB.
4. Revisar que la atenuación del enlace (Span Attenuation) sea mayor a 17 dB porque de no ser así será necesario agregar un atenuador fijo en la entrada de la tarjeta OSC IN ya que de no hacerlo debido a la alta potencia de transmisión al seleccionar el sistema a 40 Lambdas se dañaría el receptor óptico de la tarjeta OSC que sirve y contiene los canales de comunicación. La formula para su calculo es la siguiente:

$$\text{Fixed-Att} = \text{Nearest Integer} (17 \text{ dB} - \text{BOLA}) \quad [\text{dB}]$$

Este atenuador debe de ser removido después de que la calibración sea completada.

5. Encender todos los amplificadores involucrados en el enlace y seleccionar su potencia de salida acorde con una carga de 40 canales en el sistema.
6. Para prevenir daños en los receptores ópticos configurar la potencia de salida de la tarjeta VOA RX en el sitio Terminal al valor mínimo.

Calibración de enlace intermedio (Span Calibration)

El procedimiento de calibración del enlace consiste principalmente en la revisión de la amplificación del sistema, ajustando la atenuación del enlace si es requerido, seleccionando los parámetros de de la tarjeta de atenuación variable (VOA-OLA) y calibrando la ganancia de amplificación. Existen diferentes configuraciones y combinaciones a la hora de implementar una red de DWDM y por lo tanto el procedimiento para la calibración difiere en algunos puntos pero la que utilizamos en nuestro caso de estudio es la más común y se muestra a continuación:

PLT-PLA con tarjeta de atenuador variable VOA-OLA

En esta configuración, puede existir un pre-amplificador (PA) o un amplificador de línea (ILA) en nuestro caso utilizamos un PA como se muestra en la figura 86.

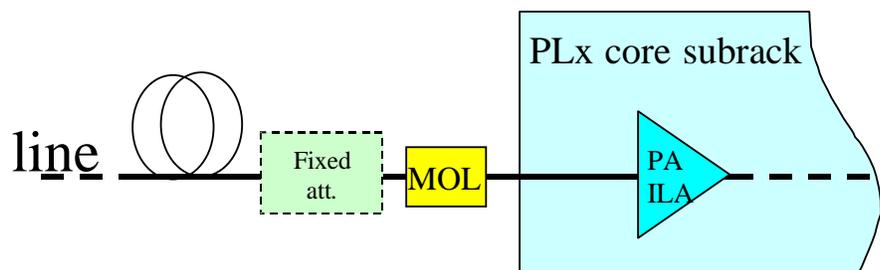


Figura 86. Diagrama de conexión de la fibra de entrada en un Pre-amplificador PA.

La calibración del enlace se realiza con la ayuda de una herramienta automática llamada “Link Calibration Tool Rel. 3.2.2 – C-band” donde los datos a ingresar y resultados son los siguientes.

1. El primer paso es ingresar la configuración del sitio en la herramienta
 - Seleccionar el tipo apropiado de amplificador en la celda “Amplifier Type”
 - Seleccionar “No” en la celda de VOA-OLA
 - Seleccionar el tipo de configuración de sitio en la celda “Configuration”
2. El segundo paso es ingresar los datos en las celdas correspondientes
 - Ingresar la lectura de la potencia óptica de entrada que aparece en el software LCT (Local Craft Terminal) del sistema para la tarjeta PA en la celda “PA input power”.
 - Ingresar el margen de enlace (Span Margin) dado por el personal de diseño de la red en la celda correspondiente.
3. El tercer paso es leer el resultado correspondiente en la celda “Amplifier Check”
 - Si el resultado es = a OK el amplificador colocado es correcto, si no es correcto será necesario cambiar el tipo de amplificador por el que muestre la herramienta.
4. El cuarto paso es revisar la necesidad de utilizar un atenuador fijo si el enlace es muy corto, para esto se lee la celda atenuador fijo “Fixed attenuator”
 - Si el resultado de la celda es no requiere “No required” significa que el enlace es adecuado y no requiere atenuador par funcionar adecuadamente.
 - Si hay un rango presente en el resultado significa que necesitamos ingresar un atenuador para evitar daños en los receptores por sobre potencia óptica, el atenuador debe de ser del valor que muestre la herramienta y colocado a la entrada del pre-amplificador (PA)
5. Ponga un atenuador fijo en la entrada del pre-amplificador (PA) que llamaremos MOL vida media (Middle of Life) típicamente entre 2 y 3 dB.

El propósito de este atenuador MOL es calibrar el enlace cuando no se incluye una tarjeta compensadora automática de envejecimiento de la red (VOA OLA) por lo que permite tener un valor aproximado a la mitad de la vida útil del sistema para limitar las consecuencias de variación de ganancia (GV) en este tiempo.

Nota: Este atenuador debe de ser usado únicamente durante el proceso de calibración y deberá ser retirado una vez terminado este proceso.

6. Lea el resultado en la celda de fin de vida “EOL span loss” y compárela con la atenuación dada por el diseño de red (SBA) para el link., si el valor que entrega la herramienta es mayor que el de diseño de red entonces es altamente probable que exista un problema en la fibra o en algún conector por lo que hay que revisar a detalle. Y de no existir ningún problema se tiene que informar al ingeniero de diseño para hacer una doble revisión.

En la tabla 63 se puede ver un ejemplo de la herramienta solo para darnos una idea de su visualización ya que más adelante se muestra a detalle con los resultados.

SPAN CALIBRATION TOOL Rel. 3.2.2		
Conf	Amplifier Type	PA LONG
	VOA - OLA	NO
	CONFIGURATION	PLT/PLA
Input Data	PA input power [dBm]	-6.5
	Span Margin M [dB]	1.0
Output	Amplifier Check	OK
	Fixed Attenuator [dB]	Not Required
	VOA OLA Theoretic TX [dBm]	N/A
	VOA OLA Offset [dB]	N/A
	EOL span loss [dB]	27
Step	Description	
1	Enter the Configuration cells (double-click)	
2	Enter the Input Data cells	
3	Read the Amplifier check result: * if the result is "Longer Amplifier Needed" or "PA-Long + DS required", restart from step 1) entering the proper amplifier type in the Amplifier type cell	
4	Read the Fixed attenuator output cell * if a value is present then put the fixed attenuator as indicated and restart from step 2)	
5	Set the VOA OLA (if present) according to VOA OLA output cells. Note: Offset is settable in the range (-3,+3 dB) If an Inconsistency Warning appears, contact Network Design Team	
6	If the EOL span loss given by the tool is higher than the Network Design one, contact Network design team! Note: in sites with Raman, EOL value is not available!	

Tabla 63. Pantalla de la herramienta “link calibration tool”.

4.4.4.3 Etapa Interna de Calibración (Inter-Stage Calibration)

El equipo PLx40 tiene varias posibilidades de configuración en la amplificación, depende del tipo de sub-rack, características del enlace, tipo de fibra, etc. Estas configuraciones pueden tener un solo amplificador (ILA) o un doble amplificador (PA + BA, PA + ILA, ILA + BA). Dos tipos de calibración en la etapa interna pueden ser calibrados pero depende de la configuración del equipo, en nuestro caso utilizamos un arreglo de doble amplificador PA + BA.

Para realizar esta calibración interna (Inter-amplifier Interstage) se utiliza el procedimiento con la configuración de doble amplificador y se calibra mediante un atenuador variable de acción mecánica.

Configuraciones de equipamiento PLA / PLT (PLA= Amplificadores o regeneradores, PLT= Terminales).

Existen tres diferentes arreglos que se muestran en la figura 87.

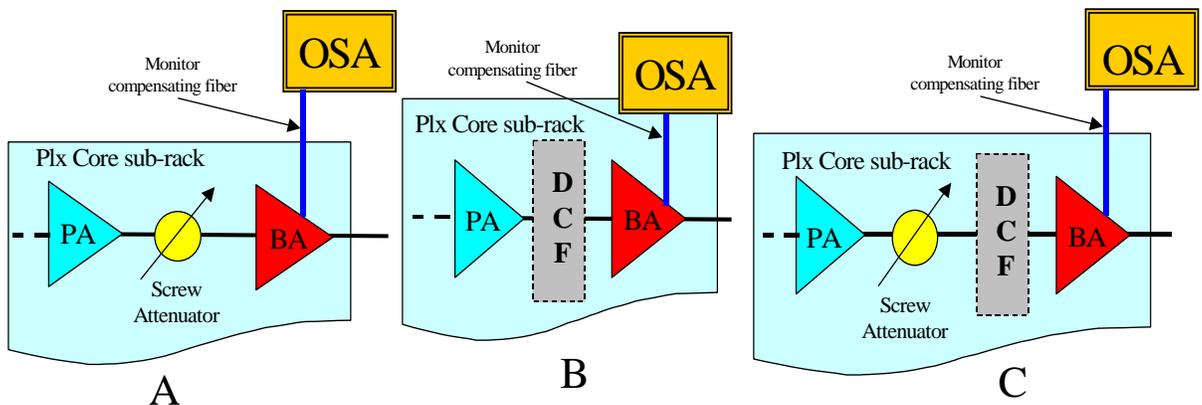


Figura 87. Tipos de configuración para equipo DWDM PLA y PLT.

Para el caso práctico utilizamos la primera opción de izquierda a derecha que es PA (S/M/L) + BA (TX,OLA,RX) donde (S/M/L) significa pre-amplificador pequeño, mediano o largo según sean las indicaciones de diseño y (TX, OLA, RX) significa transmisión, amplificador de línea o recepción.

En nuestra configuración no incluimos el modulo DCF (compensador de dispersión cromática) ya que no tuvimos problemas en el estudio de dispersión cromática por lo cual los pasos para la calibración interna se enlistan a continuación.

1. Conectar el atenuador variable (Screw Attenuator) entre la tarjeta PA y BA y poner su atenuación en el rango de 11 dB o 12 dB.
2. Se ajusta la atenuación interna moviendo el atenuador variable hasta encontrar el mínimo valor de la ganancia mediante la ayuda y monitoreo del analizador de espectro óptico en el puerto de monitoreo de la tarjeta BA.
3. Se lee la potencia de entrada registrada en la tarjeta BA (P_{IN-BA}) mediante el software del equipo y se verifica lo siguiente:
 - Si $P_{NOM-BA} - 5 \leq P_{IN-BA} \leq P_{NOM-BA} + 5$ [dBm] \rightarrow La calibración esta completa
 - Si $P_{IN-BA} > P_{NOM-BA} + 5$ [dBm] \rightarrow ajuste VOA hasta obtener $P_{IN-BA} = P_{NOM-BA} + 5$ [dBm]
 - Si $P_{IN-BA} < P_{NOM-BA} - 5$ [dBm] \rightarrow ajuste VOA hasta obtener $P_{IN-BA} = P_{NOM-BA} - 5$ [dBm]
4. Al terminar la calibración se guarda la pantalla del espectro obtenido para documentar la memoria de datos.

4.4.4.4 Revisión final de variación de ganancia (GV) para la vida media del sistema (MOL)

Una vez terminada la calibración del enlace completo en una dirección (Norte – Sur o Sur – Norte) hay que revisar dos resultados de la variación de ganancia (GV) para asegurar la calidad de la calibración. Si los dos resultados son revisados

y concuerdan con las tablas la calibración del enlace entonces estará terminada correctamente. Esta revisión final debe de ser realizada en ambas direcciones del enlace.

Revisión de la variación de ganancia GV de acuerdo a parámetros esperados.

Esta revisión debe de ser realizada justo al terminar la calibración del último PLT (RX), manteniendo los atenuadores fijos para el envejecimiento de la fibra (MOL). Para verificar la variación de ganancia en este punto se realiza:

- Medir la variación de ganancia de las 8 fuentes láser en el monitor de la tarjeta VOA-OLA o en el monitor de la tarjeta BA (RX) al final del enlace (GV_{CAL}).
- Dependiendo del número de saltos de red y de la configuración del enlace lea la variación de ganancia esperada (GV_{EXP}) y verifique el resultado de acuerdo a la tabla 64. El resultado se analizará en el subcapítulo 4.4.4.6.

<i>spans</i>	<i>NO-PLD</i>	<i>1 PLD</i>	<i>>1 PLD</i>	<i>Raman</i>
1	3,0	3,5	4,5	5,0
2	3,7	4,2	5,2	5,7
3	4,2	4,7	5,7	6,2
4	4,6	5,1	6,1	6,6
5	5,0	5,5	6,5	7,0
6	5,4	5,9	7,0	7,5
7	5,7	6,2	-	-
8	6,0	-	-	-

Tabla 64. Variación de la ganancia esperada en todo el enlace.

- Si $GV_{CAL} > GV_{EXP}$ entonces la calibración es peor a la esperada: revise de nuevo la calibración y repita todo el proceso si es necesario
- Si $GV_{CAL} \leq GV_{EXP}$ entonces el punto de calibración es correcto

4.4.4.5 Revisión final de variación de ganancia (GV) al inicio de la vida del sistema (BOL)

Esta revisión consiste en verificar la variación de ganancia al inicio de la vida del sistema (desde luego primero hay que remover los atenuadores utilizados para simular la vida media del sistema MOL) esta verificación representa la mas alta variación de ganancia esperada por el sistema durante su vida.

Se necesita remover los atenuadores fijos utilizados para la vida media del sistema (MOL) y con esta operación lo ponemos a funcionar en el estado de inicio de vida (BOL) (Beging of live).

Se mide la variación de ganancia (GV) de las 8 fuentes láser en el monitor de la tarjeta VOA-OLA o BA (RX) al final del enlace (GV_{BOL}) y se compara con la ganancia estimada dada por el diseño de red (GV_{DESIGN}).

Si por diseño de red no se cuenta con este dato use la máxima variación de ganancia como parámetro base que se muestra en la tabla 65.

Configuration	PLx40	PLx80
<i>Unprotected</i>	10,1	8,2
<i>Protected</i>	7	8

Tabla 65. Máxima variación de ganancia del enlace total.

- Si $GV_{BOL} > GV_{DESIGN}$ entonces el procedimiento de calibración no es correcto y necesita repetirse.
- Si $GV_{BOL} \leq GV_{DESIGN}$ entonces la calibración es correcta.

En este punto toda la calibración a sido terminada y los atenuadores de 20 dB que se colocaron para evitar daños en la tarjetas DEMUX debe de ser retirado.

El análisis de los resultados obtenidos en el caso práctico se verá en el subcapítulo 4.4.4.6.

4.4.4.6 Memoria de resultados de Calibración

México – Nopala

Calibración de enlace (Span Calibration)

SPAN CALIBRATION TOOL Rel. 3.2.2		
Conf	Amplifier Type	PA LONG
	VOA - OLA	NO
	CONFIGURATION	PLT/PLA
Input Data	PA input power [dBm]	-14.5
	Span Margin M [dB]	2.0
Output	Amplifier Check	OK
	Fixed Attenuator [dB]	Not Required
	VOA OLA Theoretic TX [dBm]	N/A
	VOA OLA Offset [dB]	N/A
	EOL span loss [dB]	36
Step	Description	
1	Enter the Configuration cells (double-click)	
2	Enter the Input Data cells	
3	Read the Amplifier check result:	
	* if the result is "Longer Amplifier Needed" or "PA-Long + DS required", restart from step 1) entering the proper amplifier type in the Amplifier type cell	
4	Read the Fixed attenuator output cell	
	* if a value is present then put the fixed attenuator as indicated and restart from step 2)	
5	Set the VOA OLA (If present) according to VOA OLA output cells. Note: Offset is settable in the range (-3,+3 dB) If an Inconsistency Warning appears, contact Network Design Team	
6	If the EOL span loss given by the tool is higher than the Network Design one, contact Network design team! Note: in sites with Raman, EOL value is not available!	

Tabla 66. Herramienta “link calibration tool” mostrando que no se requiere atenuador en el enlace intermedio.

De las celdas que están encerradas en el círculo de la tabla 66 decimos que el pre-amplificador seleccionado esta correcto y que el enlace no requiere ningún atenuador para acondicionar el enlace.

Etapa interna de calibración (Inter-Stage Calibration)

Al monitorear la entrada de la señal compuesta de toda la banda C sin haber iniciado esta calibración la grafica del espectro óptico se ve en la figura 88.

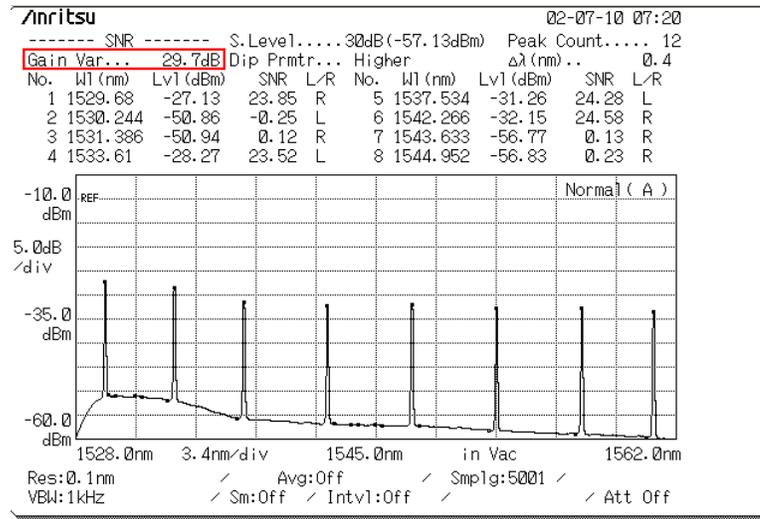


Figura 88. Grafica de espectro óptico sin calibración.

Debido a esta alta variación en la ganancia se tienen muchos problemas de distorsión de la señal por lo que se debe arreglar mediante el ajuste de ganancia que permite el atenuador variable mecánico del equipo. En la práctica se mueve el atenuador variable hacia un lado y otro hasta lograr una variación de ganancia mínima como se muestra en la figura 89.

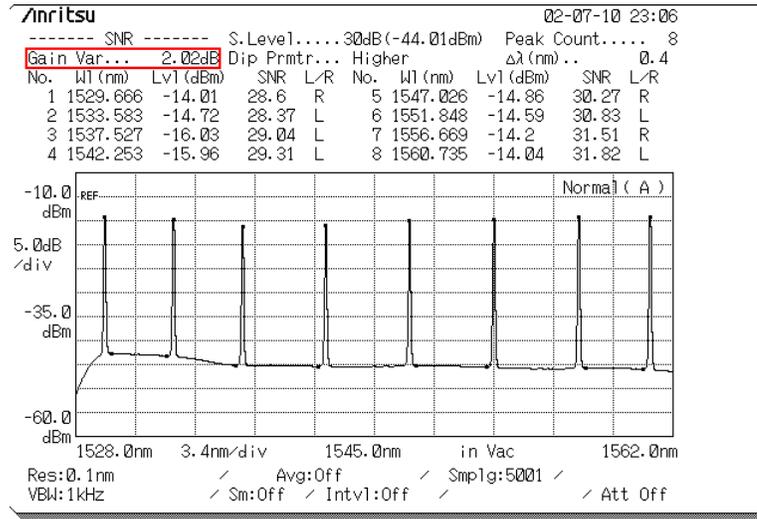


Figura 89. Grafica de espectro óptico con calibración de salida.

Nopala – Queretaro

Calibración de enlace (Span Calibration)

SPAN CALIBRATION TOOL Rel. 3.2.2		
Conf	Amplifier Type	PA LONG
	VOA - OLA	NO
	CONFIGURATION	PLT/PLA
Input	PA input power (dBm)	-9.5
Data	Span Margin M (dB)	2.0
Output	Amplifier Check	OK
	Fixed Attenuator (dB)	Not Required
	VOA OLA Theoretic TX (dBm)	N/A
	VOA OLA Offset (dB)	N/A
	EOL span loss (dB)	31
Step	Description	
1	Enter the Configuration cells (double-click)	
2	Enter the Input Data cells	
3	Read the Amplifier check result: * if the result is "Longer Amplifier Needed" or "PA-Long + DS required", restart from step 1) entering the proper amplifier type in the Amplifier type cell	
4	Read the Fixed attenuator output cell * if a value is present then put the fixed attenuator as indicated and restart from step 2)	
5	Set the VOA OLA (if present) according to VOA OLA output cells. Note: Offset is settable in the range (-3,+3 dB) If an Inconsistency Warning appears, contact Network Design Team	
6	If the EOL span loss given by the tool is higher than the Network Design one, contact Network design team! Note: in sites with Raman, EOL value is not available!	

Tabla 67. Herramienta "link calibration tool" mostrando que no se requiere atenuador en el enlace intermedio.

De las celdas que están encerradas en el círculo de la tabla 67 decimos que el pre-amplificador seleccionado esta correcto y que el enlace no requiere ningún atenuador para ser acondicionado.

Etapa interna de calibración (Inter-Stage Calibration)

El monitoreo de la señal compuesta de toda la banda C siempre será altamente similar al del sitio anterior por lo que se omitirá su presentación en los demás links y solo se incluirá la grafica final de la calibración ya que este es el objetivo

Debido a la alta variación en la ganancia se tienen muchos problemas de distorsión de la señal por lo que se debe arreglar mediante el ajuste de ganancia que da el atenuador variable del equipo. En la práctica se mueve el atenuador variable hacia un lado y otro hasta lograr una variación de ganancia mínima como se muestra en la figura 90.

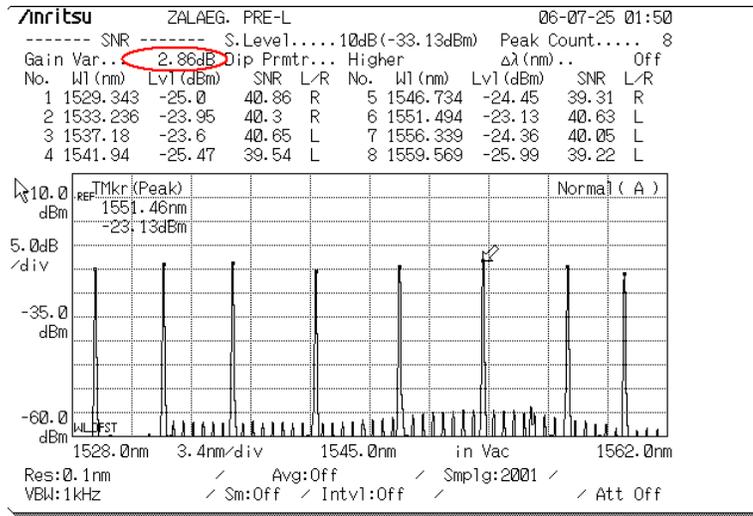


Figura 90. Grafica de espectro óptico calibrado.

Querretaro – Celaya (pendiente)

Calibración de enlace (Span Calibration)

SPAN CALIBRATION TOOL Rel. 3.2.2		
Conf	Amplifier Type	PA SHORT
	VOA - OLA	NO
	CONFIGURATION	PLT/PLA
Input Data	PA input power [dBm]	7.5
	Span Margin M [dB]	2.0
Output	Amplifier Check	OK
	Fixed Attenuator [dB]	6
	VOA OLA Theoretic TX [dBm]	N/A
	VOA OLA Offset [dB]	N/A
	EOL span loss [dB]	N/A
Step	Description	
1	Enter the Configuration cells (double-click)	
2	Enter the Input Data cells	
3	Read the Amplifier check result:	
	* if the result is "Longer Amplifier Needed" or "PA-Long + DS required", restart from step 1) entering the proper amplifier type in the Amplifier type cell	
4	Read the Fixed attenuator output cell	
	* if a value is present then put the fixed attenuator as indicated and restart from step 2)	
5	Set the VOA OLA (if present) according to VOA OLA output cells. Note: Offset is settable in the range (-3,+3 dB) If an Inconsistency Warning appears, contact Network Design Team	
6	If the EOL span loss given by the tool is higher than the Network Design one, contact Network design team! Note: in sites with Raman, EOL value is not available!	

Tabla 68. Herramienta "link calibration tool" mostrando que no se requiere atenuador en el enlace intermedio.

De las celdas que están encerradas en el círculo de la tabla 68 decimos que el pre-amplificador seleccionado esta correcto y que el enlace si requiere atenuador para acondicionar el enlace de un valor de 6 dB o superior, como tópicamente no se encuentra atenuadores de 6 dB se instalo uno de 10 dB.

Etapa interna de calibración (Inter-Stage Calibration)

La grafica de corrección a la distorsión de los amplificadores se muestra en la figura 91.

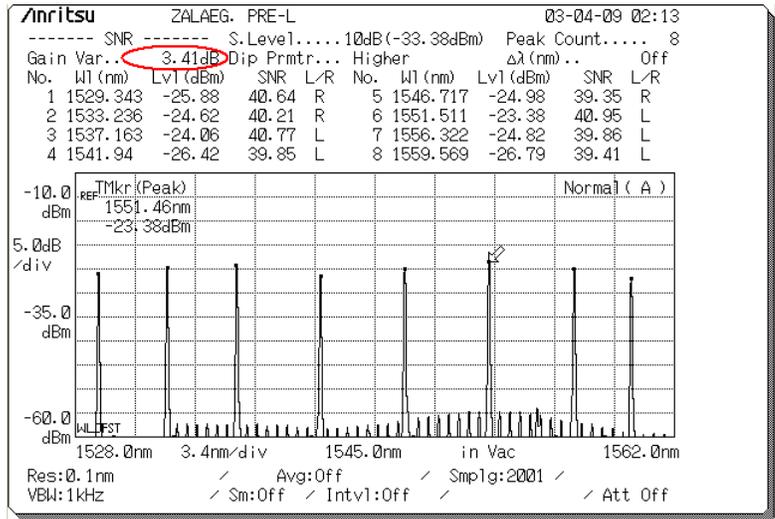


Figura 91. Grafica de espectro óptico calibrado.

Celaya – Irapuato

Calibración de enlace (Span Calibration)

SPAN CALIBRATION TOOL Rel. 3.2.2		
Conf	Amplifier Type	PA SHORT
	VOA - OLA	NO
	CONFIGURATION	PLT/PLA
Input Data	PA input power [dBm]	1.5
	Span Margin M [dB]	2.0
Output	Amplifier Check	OK
	Fixed Attenuator [dB]	Not Required
	VOA OLA Theoretic Tx [dBm]	N/A
	VOA OLA Offset [dB]	N/A
	EOL span loss [dB]	20
Step	Description	
1	Enter the Configuration cells (double-click)	
2	Enter the Input Data cells	
3	Read the Amplifier check result:	
	* if the result is "Longer Amplifier Needed" or "PA-Long + DS required", restart from step 1) entering the proper amplifier type in the Amplifier type cell	
4	Read the Fixed attenuator output cell	
	* if a value is present then put the fixed attenuator as indicated and restart from step 2)	
5	Set the VOA OLA (if present) according to VOA OLA output cells. Note: Offset is settable in the range (-3,+3 dB) If an Inconsistency Warning appears, contact Network Design Team	
6	If the EOL span loss given by the tool is higher than the Network Design one, contact Network design team! Note: in sites with Raman, EOL value is not available!	

Tabla 69. Herramienta "link calibration tool" mostrando que no se requiere atenuador en el enlace intermedio.

De las celdas que están encerradas en el círculo de la tabla 69 decimos que el pre-amplificador seleccionado esta correcto y que el enlace no requiere ningún atenuador para ser acondicionado.

Etapa interna de calibración (Inter-Stage Calibration)

La grafica de corrección a la distorsión de los amplificadores se muestra en la figura 92.

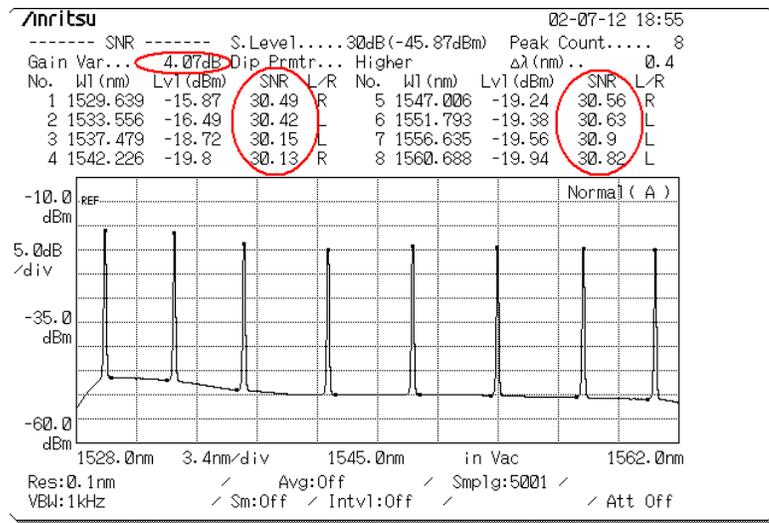


Figura 92. Grafica del espectro óptico calibrado al final del enlace para MOL.

Revisión final de variación de ganancia (GV) para la vida media del sistema (MOL) “middle of life”.

El enlace analizado en este caso práctico consta de cuatro spans o enlaces intermedios (Toreo-Nopala, Nopala-Querétaro, Querétaro-Celaya, Celaya-Irapuato) por lo que de acuerdo a la tabla 70 tomando la columna de (No PLD) como referencia y el valor de cuatro spans o enlaces intermedios se puede verificar si la calibración a sido correcta. Se escoge la columna (No PLD) por que en los enlaces intermedios no contamos con inserción o entrega de tráfico.

Del monitoreo de la señal en la tarjeta BA (RX) al final del enlace que se muestra en la figura 92 obtenemos el valor de la variación de ganancia (GV_{CAL}) para ser comparado con el dato esperado de acuerdo a la tabla 70.

(GV_{EXP})

<i>spans</i>	<i>NO- PLD</i>	<i>1 PLD</i>	<i>>1 PLD</i>	<i>Raman</i>
1	3,0	3,5	4,5	5,0
2	3,7	4,2	5,2	5,7
3	4,2	4,7	5,7	6,2
4	4,6	5,1	6,1	6,6
5	5,0	5,5	6,5	7,0
6	5,4	5,9	7,0	7,5
7	5,7	6,2	-	-
8	6,0	-	-	-

Tabla 70. Variación de la ganancia esperada en todo el enlace de acuerdo a los 4 “spans” del caso práctico.

El resultado de Gain variation=4.06 db comparándolo con el resultado esperado de la tabla 70 se verifica de acuerdo a la siguiente expresión:

- si $GV_{CAL} > GV_{EXP}$ entonces la calibración es peor a la esperada: revise de nuevo la calibración y repita todo el proceso si es necesario
- si $GV_{CAL} \leq GV_{EXP}$ entonces el punto de calibración es correcto

Entonces $4.07 \text{ db} \leq 4.6 \text{ db}$, por lo tanto se comprueba que la ingeniería y calibración se han realizado correctamente y el equipo puede operar sin ningún problema en todo el rango de espectro de luz de la banda C.

Revisión final de variación de ganancia (GV) al inicio de la vida del sistema (BOL) “Begin of life”.

Para realizar esta verificación se monitorea en el mismo punto de la verificación anterior solo que en esta ocasión se retiran los atenuadores que simulan la vida media del sistema y que fueron colocados a la entrada de los pre-amplificadores (PA) y se observa el resultado del Gain Variation y se compara con la tabla 71.

Configuration	PLx40	PLx80
Unprotected	10,1	8,2
Protected	7	8

Tabla 71. Máxima variación de ganancia esperada del enlace total.

La grafica de la variación de ganancia de toda la ruta analizada al inicio de la vida del sistema se muestra en la figura 93.

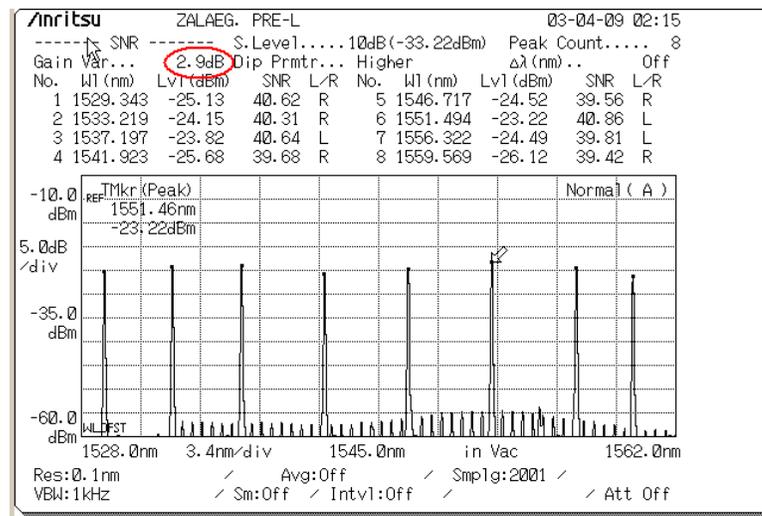


Figura 93. Grafica del espectro óptico calibrado al final del enlace para el inicio de vida "BOL".

En nuestro caso el enlace no cuenta con protección de ruta por lo que se toma el primer renglón para comparar el valor de la tabla 71 con el valor de la variación ganancia mostrada en la grafica del espectro óptico.

De acuerdo al resultado y a la siguiente expresión tenemos

- Si $GV_{\text{BOL}} > GV_{\text{DESIGN}}$ entonces el procedimiento de calibración no es correcto y necesita repetirse.
- **Si $GV_{\text{BOL}} \leq GV_{\text{DESIGN}}$ entonces la calibración es correcta.**

Entonces $2.9 \leq 10.1$, por lo tanto se comprueba que la ingeniería y calibración se han realizado correctamente y el equipo puede operar sin ningún problema en todo el rango de espectro de luz de la banda C y a lo largo de toda la vida del sistema.

Otro dato importante que se muestra en la grafica de la figura 93 es la relación señal a ruido (SNR) de los 8 canales distribuidos en la banda C que se encuentran entre 39 y 40 db, ese dato significa que la señal real de cada longitud de onda esta 39 o 40 db por encima del ruido lo cual es excelente ya que eso permitirá que los receptores y decodificadores en el sistema reconozcan perfectamente las señales de trafico real en contra de las señales de ruido, por lo que seguramente cuando se pongan en funcionamiento las longitudes de onda reales su relación será igual o mejor que la del proceso de calibración y esto es una de las partes mas importantes de un sistema DWDM ya que si hubiera pobre relación de señal a ruido se vería seriamente afectado todo su desempeño y calidad en el servicio.

4.4.4.7 Ecuación

En enlaces de DWDM, el incremento o decremento de canales ópticos (transponders / longitudes de onda) hacen que exista un cambio en la potencia óptica recibida y por ende transmitida lo que obliga a realizar el ajuste de Ecuación con la finalidad de evitar problemas no lineales en la transmisión de los canales tanto como sea posible.

Dos son los principales requerimientos que tienen que cumplirse:

- Mantener todos los amplificadores trabajando en el punto mas optimo
- Evitar tener diferencia de potencia óptica entre los canales para la prevención de efectos no lineales extremadamente perjudiciales para el desempeño de calidad del sistema.

La primera meta es particularmente esencial cuando el número de canales es superior o igual a 3, en estos casos se inserta una tarjeta de atenuación variable antes de los amplificadores para tratar de evitar en lo posible la variación en ganancia (GV)

El segundo requerimiento se deriva del hecho de que existe un límite superior en el que podemos transmitir en la fibra óptica por cada canal sin que aparezcan los efectos no lineales. La correcta selección de potencia de los amplificadores evitara este problema.

Esta ecualización se realiza mediante la ayuda de una herramienta que se llama Link Manager que básicamente es un software diseñado para realizar esta tarea automáticamente de una manera muy eficiente en la ecualización de enlaces de DWDM. Ecualizar significa obtener una distribución uniforme del valor de OSNR (Relación señal a ruido) de cada canal en el lado de recepción, esto se logra por medio de ajustes muy finos en la potencia de transmisión de los láser de salida del lado remoto.

La diferencia de OSNR en cada canal es debido a la suma de múltiples factores como: respuesta no lineal de los amplificadores, uniformidad en la etapa MUX/DEMUX y evidentemente a las características no lineales en la fibra óptica. Debido a estos factores, algunos canales ópticos una vez que son demultiplexados pueden ser recibidos con un buen Bit Error Rate (B.E.R.) que básicamente

significa que están dentro de parámetros internacionales aceptables para la buena transmisión de la señal y por ende su recepción será muy buena, pero puede haber otros canales que la relación OSNR sea tan baja que dificulte interpretar la señal a la salida o incluso sea imposible recuperarla.

El procedimiento de ecualización consiste en la lectura de los valores de OSNR pero con los canales que realmente se van a transmitir es decir que si recordamos en todos los procesos anteriores se utilizó un generador de fuentes Láser que cubriera todo el espectro de la banda C en este caso se desconecta todo ese sistema que simulaba esa condición y se conecta el equipo tal y como va a quedar al final funcionando es decir con la cantidad de canales reales, frecuencia de transmisión definitiva y potencia necesaria de los amplificadores del sistema. La lectura se realiza con la ayuda nuevamente de un OSA (analizador de espectros ópticos), el programa lee primeramente las potencias actuales del sistema y posteriormente mediante un algoritmo calcula la potencia ideal de cada amplificador y modifica remotamente todos los valores necesarios para obtener el mejor punto de operación. El software realiza esta operación por sí mismo pero tomara algo de tiempo su realización ya que tiene que consultar, calcular y cambiar valores.

El programa también se encargara de la ecualización de los amplificadores y pre-amplificadores de potencia de todo el sistema (BA, PA, etc.) tomando en cuenta el número de canales a ser transmitidos y el número de enlaces intermedios “spans” en la red para optimizar de la mejor manera el punto de operación del sistema.

La ecualización de los canales y la potencia de los amplificadores tiene que ser realizada durante la etapa de configuración del equipo y cada vez que la cantidad

de canales cambie en el sistema debido a que el cambio en si mismo puede dar lugar a una descompensación irregular.

Finalmente, otro factor es en si mismo el tiempo de uso de la red ya que se envejece con el tiempo. Las condiciones de trabajo de un sistema DWDM cambian durante su vida ya que por citar un ejemplo en algunos países se tienen problemas para conservar las líneas de transmisión óptica funcionando sin interrupciones ya que muchas veces ocurre que son cortadas intencionalmente o accidentalmente y esto si ocurre muchas veces los empalmes para reparar el daño cada ves afectaran mas y mas al medio de transmisión que incluso muchas veces las compañías telefónicas se ven obligados a cambiar grandes cantidades de tramos de fibra para recuperar la calidad de transmisión por lo que al final este factor nos llevara irremediamente a realizar ecualizaciones periódicas para continuar en lo posible con la mejor eficiencia del sistema.

En las figuras 94 y 95 se muestra en bloques el proceso en la ecualización:

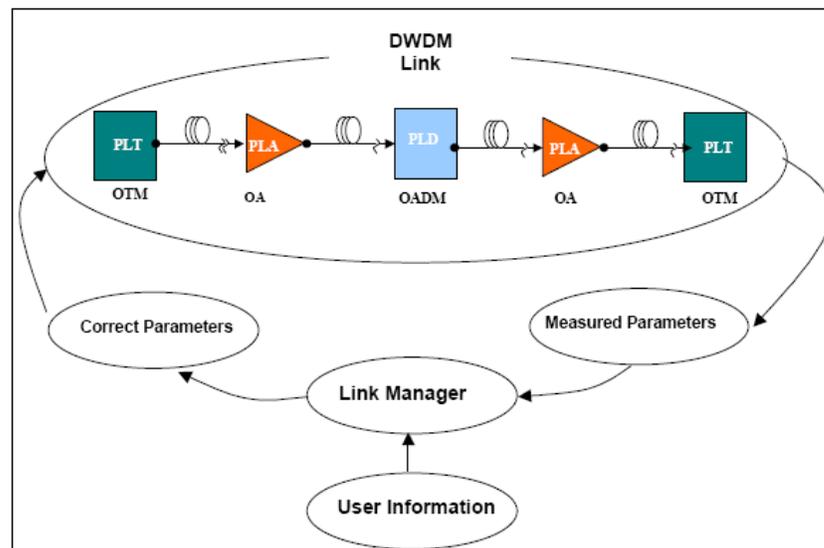


Figura 94. Esquema grafico del proceso de ecualización.

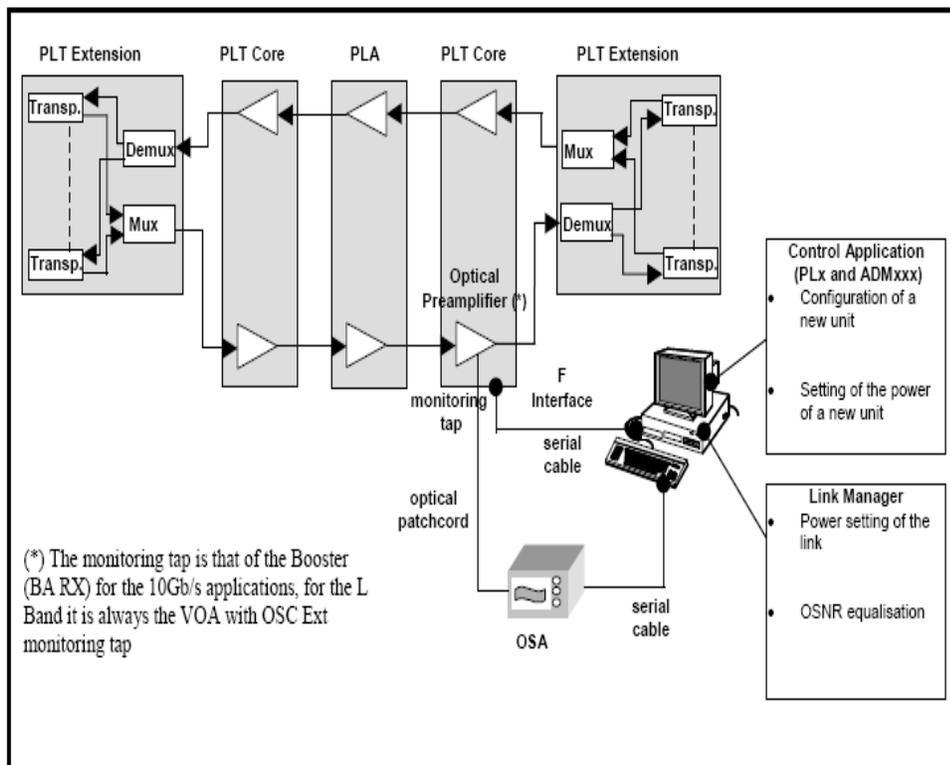


Figura 95. Diagrama de bloques para la calibración DWDM.

4.4.4.8 Memoria de Resultados de Ecuación

La figura 96 muestra los datos obtenidos al inicio de la ecuación.

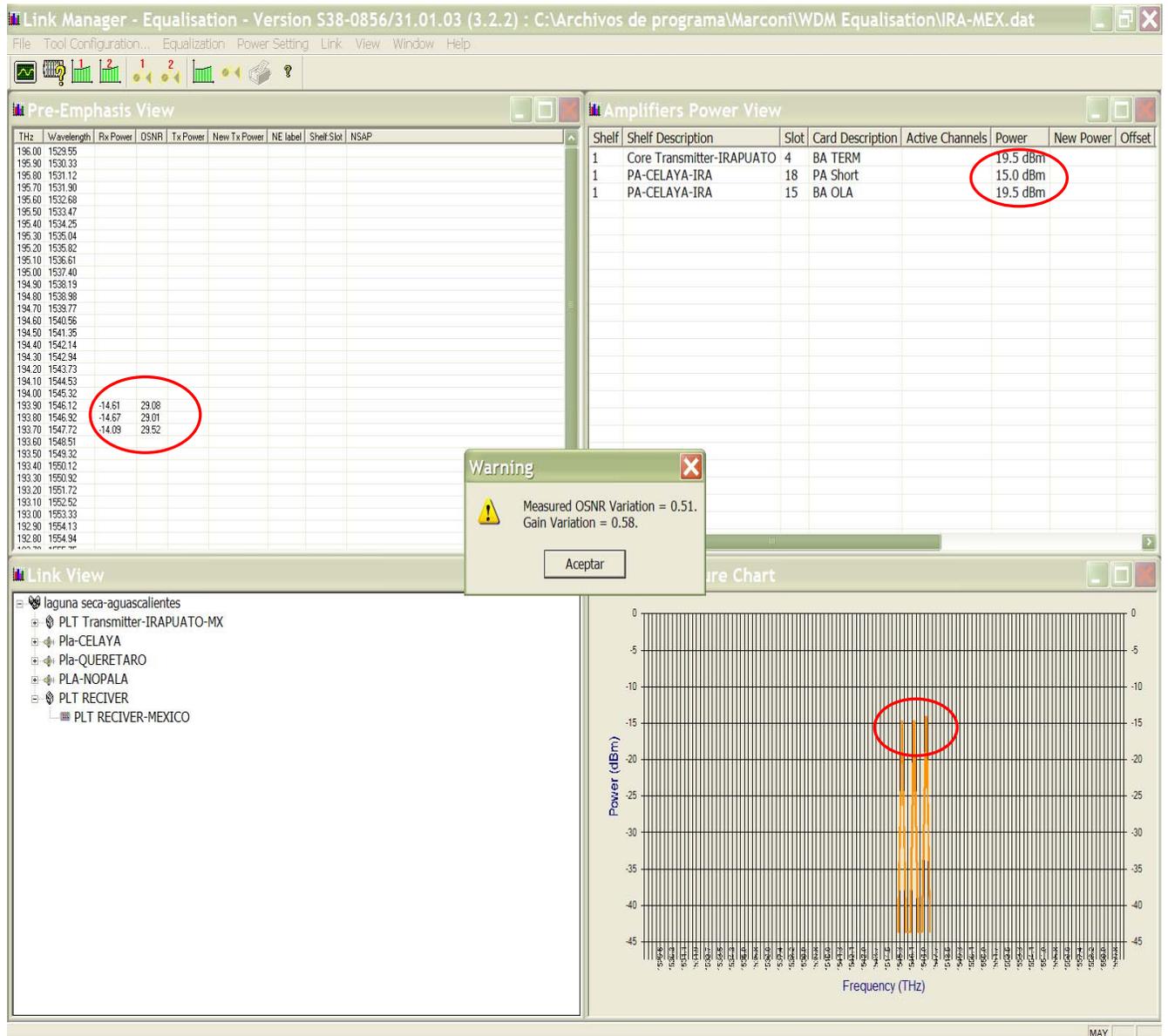


Figura 96. Grafica de resultados de la equalización inicial mediante la herramienta de calibración automática.

Note que en las columnas de la figura 96 de New Tx Power (nueva potencia de Tx) no se encuentra ninguna información debido a que en este paso solo se han

leído los valores pero el siguiente paso es que el sistema realice sus cálculos, proponga sus modificaciones y las ejecute.

Los datos propuestos por el sistema tanto para la potencia de los transponders (canales de transmisión) y los amplificadores de potencia quedan mostrados en la figura 97.

Note que ahora si ya se muestran valores propuestos de Tx en la columna de (New Tx Power)

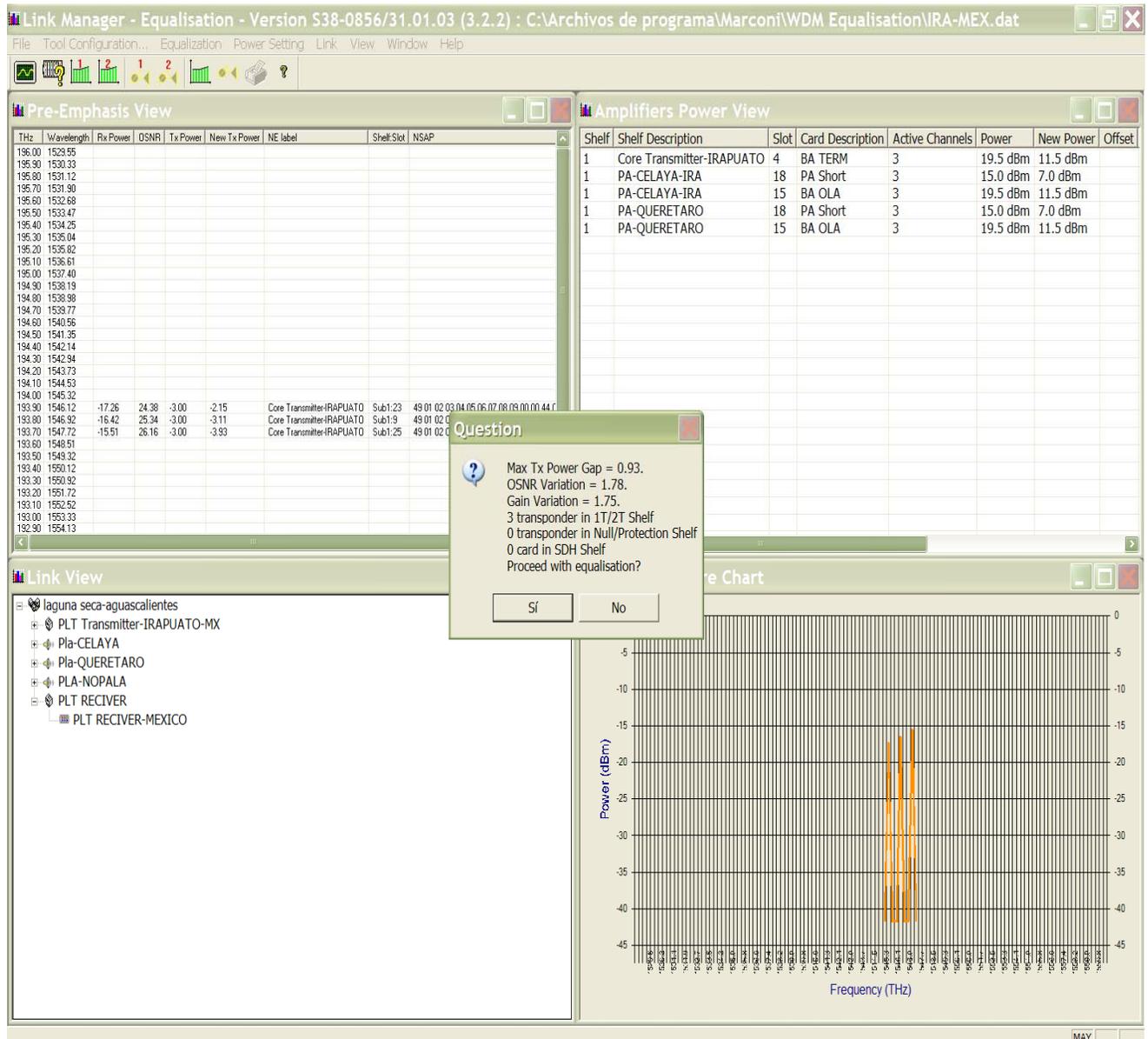


Figura 97. Grafica de resultados de la primera ecualización mediante la herramienta de calibración automática.

Después de esta primera ecualización se pueden realizar otras mas hasta lograr el valor buscado en nuestro caso realizamos otra más para buscar una mejor operación del sistema. Los resultados de esta segunda ecualización se muestran en la figura 98.

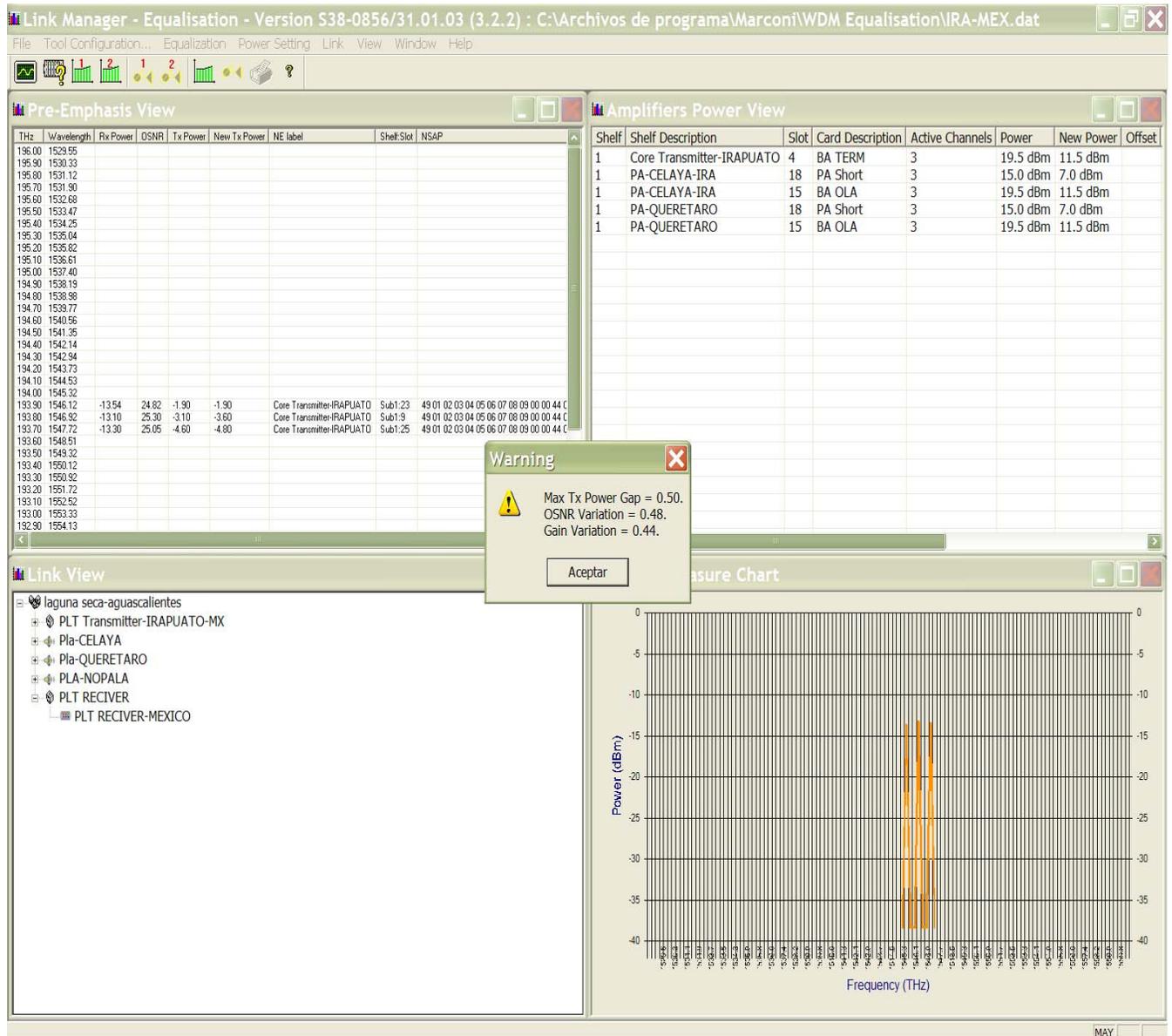


Figura 98. Grafica de resultados de la segunda ecualización mediante la herramienta de calibración automática.

Los valores finales para las potencias de los amplificadores y transponders se muestran en la figura 99. Como se puede observar en la grafica del 4º cuadrante donde están las 3 longitudes de onda reales puestas en el sistema, sus niveles en amplitud son casi idénticos por lo que la variación de ganancia óptica entre ellas es muy baja 0.44 db tal y como se mostró en la figura 98.

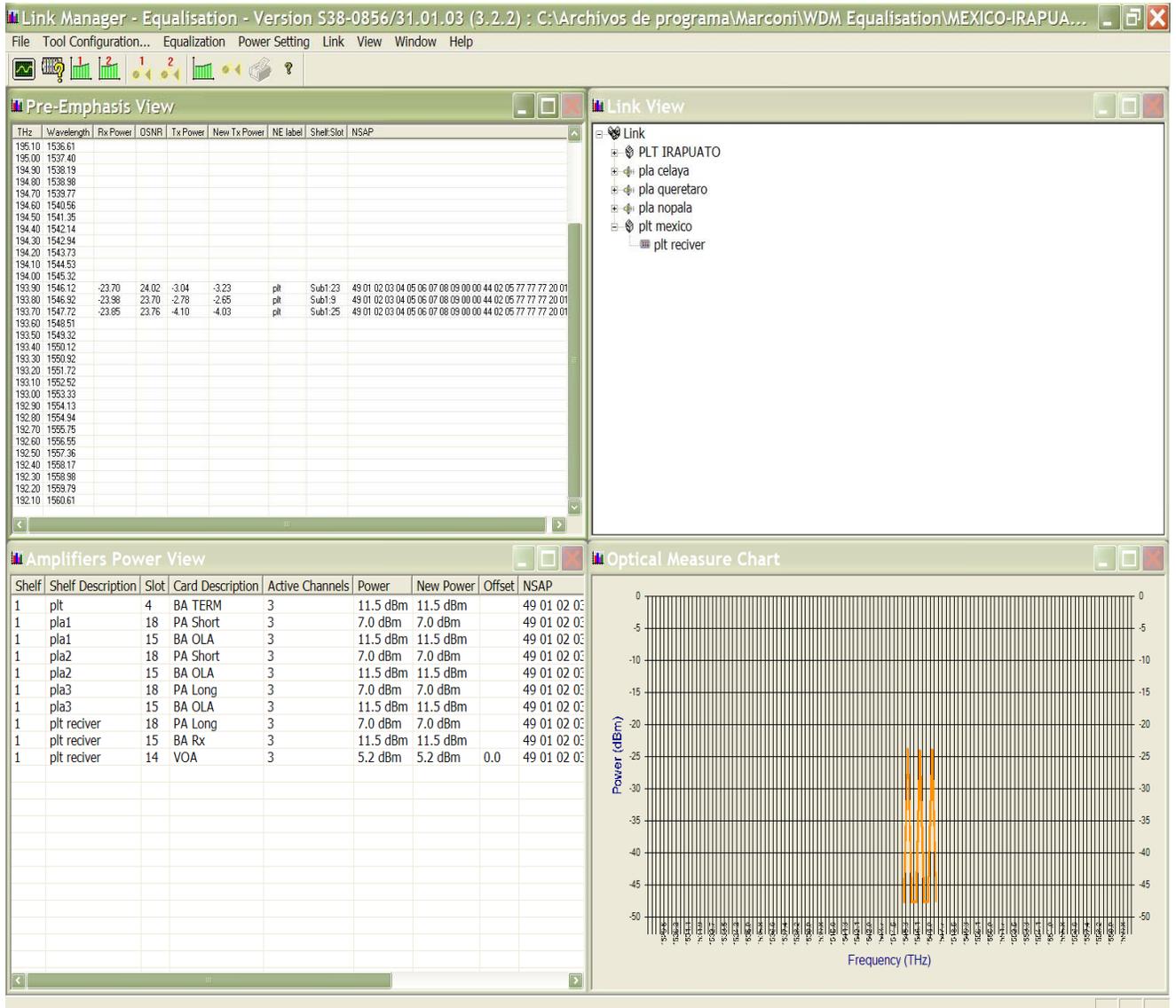


Figura 99. Grafica de resultados final de la equalización mediante la herramienta de calibración automática.

4.4.4.9 Prueba de Estabilidad final (B.E.R. Bit Error Rate)

Esta prueba se puede realizar de dos formas una es haciéndola a cada longitud de onda por separado o bien si el usuario final lo permite se puede realizar una conexión en serie de las tres longitudes de onda y así realizar solo una prueba por las tres. En nuestro caso realizamos solo una por las tres aun que cabe señalar que de haber habido un error en cualquiera de las tres lambdas se tendría que haber repetido la prueba nuevamente y en consecuencia se tendría que buscar primero el problema una por una, se decidió hacer de esta forma porque los resultados obtenidos en todo el caso practico fueron excelentes y eso nos dio confianza para hacerlo en una sola prueba de estabilidad de 50 hrs.

```
=====
                                OmniBER HP37718A
                                Instrument Configuration
-----
Receive Signal      : STM-16 OPTICAL
Mapping            : AU-4-16C      VC-4-16C      BULK FILLED
Pattern           : 2^23-1                Polarity           : INVERTED

MEASUREMENT STARTED  06 Jul 03  10:02:35          Print Period  OFF
-----
16:19:56 PRINT DEMANDED- RESULTS SNAPSHOT      Elapsed Time   02d 06h 12m
04s|
=====
                                Cumulative Results
```

Error Results :

	AlA2 FRAME	B1 BIP	B2 BIP	MS-REI	B3 BIP
Error Count	0	0	0	0	0
Error Ratio	0	0	0	0	0

	HP-REI	HP-IEC	TU-BIP	LP-REI
Error Count	0	0	N/A	N/A
Error Ratio	0	0	N/A	N/A

	BIT	CODE	CRC	REBE
Error Count	0
Error Ratio	0

Analysis Results :

G.826 ANALYSIS

	B1 BIP	B2 BIP	MS-REI	B3 BIP
Errored Blocks	0	0	0	0
Errored Seconds	0	0	0	0
Severely Errored Seconds	0	0	0	0
Unavailable Seconds	0	0	0	0
Path Unavailable Seconds	N/A	0	0	0
Background Block Errors	0	0	0	0
Errored Second Ratio	0	0	0	0
Severely Errored Sec Ratio	0	0	0	0
Background Block Err Ratio	0	0	0	0

	HP-REI	HP-IEC	TU-BIP	LP-REI
Errored Blocks	0	0	N/A	N/A
Errored Seconds	0	0	N/A	N/A
Severely Errored Seconds	0	0	N/A	N/A
Unavailable Seconds	0	0	N/A	N/A
Path Unavailable Seconds	0	N/A	N/A	N/A
Background Block Errors	0	0	N/A	N/A
Errored Second Ratio	0	0	N/A	N/A
Severely Errored Sec Ratio	0	0	N/A	N/A
Background Block Err Ratio	0	0	N/A	N/A

BIT

Errored Blocks	0
Errored Seconds	0
Severely Errored Seconds	0
Unavailable Seconds	0
Path Unavailable Seconds	N/A
Background Block Errors	0
Errored Second Ratio	0
Severely Errored Sec Ratio	0
Background Block Err Ratio	0

M.2101 ANALYSIS

	Section		High Order Path	
	Rx	Tx	Rx	Tx
Errored Seconds	0	0	0	0
Severely Errored Seconds	0	0	0	0
Unavailable Seconds	0	0	0	0

G.821 ANALYSIS

	BIT	FAS 140M	FAS 34M	FAS 8M	FAS 2M
Errored Sec	0	N/A	N/A	N/A	N/A
%Errored Sec	0.00000	N/A	N/A	N/A	N/A
%ES (Annex D)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Error Free Sec	195124	N/A	N/A	N/A	N/A
%Error Free Sec	100	N/A	N/A	N/A	N/A
Severely Err Sec	0	N/A	N/A	N/A	N/A
%Severely Err Sec	0.00000	N/A	N/A	N/A	N/A
Degraded Minutes	0	N/A	N/A	N/A	N/A
%Degraded Minutes	0.00000	N/A	N/A	N/A	N/A
Unavailable Sec	0	N/A	N/A	N/A	N/A
%Unavailable Sec	0.00000	N/A	N/A	N/A	N/A

M.2110 ANALYSIS

	15-min	1-hr	2-hr	24-hr	7-day
BIS Results	PASS	PASS	PASS	PASS	WAIT

Frequency : 2488320.0 kHz Offset : +0.0 kHz Offset : +0.0ppm

Pointer Results :	AU POINTER		TU POINTER	
	Count	Seconds	Count	Seconds
NDF		0		N/A
Missing NDF		0		N/A
+ve Pointer Adjustments	0	0	N/A	N/A
-ve Pointer Adjustments	0	0	N/A	N/A
Implied VC Offset	0.0		N/A	
Pointer Value	0		N/A	

=====

En la prueba de estabilidad después de 50 horas observamos que en ningún parámetro hay segundos de error en el enlace por lo que aseguramos la calidad y correcta operación del sistema.

CONCLUSIONES

Los sistemas DWDM han establecido el camino para dar respuesta a la demanda continua de nuevos servicios que requieren más capacidad, resultando finalmente en una inmensa demanda de ancho de banda.

- DWDM es una tecnología que permite el aprovechamiento racional de los recursos en una red de fibra óptica, mediante crecimientos controlados, explotando al máximo el ancho banda que ofrece la luz.
- Los sistemas DWDM proporcionan la infraestructura para soportar tecnologías existentes y las que van emergiendo debido a su capacidad casi ilimitada de ancho de banda ya que es esta la característica más requerida por las aplicaciones tecnológicas actuales y futuras.
- El movimiento de trillones de bits de información de manera eficiente dará a los proveedores de servicio la infraestructura y posición para responder a la demanda de transporte de información de este milenio.
- DWDM es una tecnología ya disponible para ser utilizada en campo pero que todavía no agota sus posibilidades de desarrollo a futuro. El desarrollo técnico actual en componentes, sistemas y subsistemas DWDM es una clara indicación de que la carrera hacia una red totalmente óptica se está buscando, sin lugar a dudas, totalmente abierta y con la capacidad de enfrentar la demanda de las telecomunicaciones de hoy y mañana.
- Es altamente conveniente que la planificación de una red de fibra óptica incluya desde el principio la capa de DWDM ya que como vimos en todo este trabajo de tesis es una tecnología que nos da posibilidades enormes desde el punto tecnológico y desde el punto económico, ya que tiene un costo beneficio excelente a lo largo de toda la vida del sistema.
- Como se vio a lo largo de este trabajo, para que esta tecnología funcione adecuadamente el primer y esencial paso para que esto se logre es realizar un muy buen estudio de la fibra óptica que se tiene para implementar el

sistema, ya que de esta dependerá en gran parte del éxito de la red, posteriormente se requiere de un diseño adecuado a las necesidades y objetivos proyectados. Finalmente se necesita llevar a cabo una implementación muy bien hecha ya que como sabemos esta tecnología ofrece innumerables bondades pero la frontera entre un buen o errático desempeño es muy estrecha por lo que hay que realizar todo el proceso siendo muy cuidadosos asegurándonos en todo momento de que estamos obteniendo los mejores resultados posibles del sistema.

- Como se pudo observar en la memoria de resultados obtenida para el caso práctico que se documentó y ejecutó en esta tesis fue un éxito en todos los sentidos ya que cumplió con todas las expectativas tanto técnicas, como de calidad de servicio, escalabilidad y económicas proyectadas en un inicio, dando en la actualidad servicio a transporte de miles de datos por segundo entre las diferentes ciudades de México y Estados Unidos de América.

ACRÓNIMOS

• A_{MOL} [dB]	Middle Of Life attenuation margin ($A_{MOL} = (M+1)/2$ dB)	Margen de atenuación en la vida media de la fibra
• ASPS	Automatic Section Power Shutdown	Sección automática de apagado
• $ATT_{ILA-NOM}$ [dB]	ILA Nominal interstage attenuation	Atenuación interetapas nominal del ILA
• BA	Booster-Amplifier	Amplificador de impulso
• BA-OLA	BA for Optical Line Amplifier	BA para Amplificador de línea óptica
• BA-OTM	BA for Optical Line Amplifier	BA para Amplificador de línea óptica
• BA-RX	BA @ Reception (also called BA-RX)	BA de Recepción (también llamado BA-RX)
• BA-TX	BA @ Transmission (also called BA-TX)	BA de Transmisión (también llamado BA-TX)
• BLS	Back-reflection Laser Shutdown	Apagado de láser por regreso de reflexión
• BOL	Begin of Life	Inicio de vida de la fibra
• BOLA [dB]	Begin of Life Attenuation	Atenuación al inicio de vida de la fibra
• Ch/Chs	Channel / Channels	Canal / Canales
• DCF	Dispersion Compensation Fibre	Fibra para compensación de dispersión
• DCM	Dispersion Compensation Module (same as DCF)	Modulo para compensación de dispersión
• DEMUX	Demultiplexer	Demultiplexor

• DRA	Distributed Raman Amplifier	Amplificador Raman distribuido
• EOL	End of Life	Termino de vida de la fibra
• Extended DCF	Additional DCF module	Modulo adicional DCF
• GV [dB]	Gain Variation	Variación de ganancia
• GV_{BOL}	GV at begin of life (once MOL are removed)	GV al inicio de vida de la fibra (una vez que la MOL es removida)
• GV_{CAL}	GV at calibration point	GV en el punto de calibración
• GV_{DESIGN}	GV given by the Network Design for a specific Link	GV dado por el diseño de red para un especifico enlace
• GV_{EXP} [dB]	Expected GV at calibration point	GV esperado en el punto de calibración
• GV_{NO_VOA} [dB]	GV without screw voa in the interstage	GV con VOA manual en la interetapa
• GV_{VOA} [dB]	GV with screw voa in the interstage	GV sin VOA manual en la interetapa
• HS-D-OSC	High Sensitivity Double OSC	Doble OSC de alta sensibilidad
• I/F	Interface	Interface
• IL	Insertion Loss	Perdida de inserción
• ILA	In Line Amplifier	Amplificador de línea de entrada
• ILA_{IS} [dB]	ILA inter-stage attenuation	Atenuacion interetapa en el ILA
• $ILA_{IS_NO_VOA}$ [dB]	ILA inter-stage attenuation without screw voa	Atenuación interetapa sin VOA manual en el ILA
• ILA-L	ILA Long	ILA largo
• ILA-M	ILA Medium	ILA medio
• ILA-S	ILA Short	ILA corto
• IS	Interstage	inter-etapa

• LCT	Local Craft Terminal	Gestor local de terminal
• M [dB]	Margin on the span required	Margen de tramo
• MOL	Midle of Life	Vida media de la fibra
• MUX	Multiplexer	Multiplexor
• OADM	Optical Add-Drop Multiplexer	Multiplexor óptico de inserción/extracción
• OLA	Optical Line Amplifier	Amplificador de línea óptica
• OSC	Optical Supervisory Channel	Canal de supervision optica
• OTDR	Optical Time Domain Reflectometer	Reflectometro óptico en el dominio del tiempo
• OTM	Optical Terminal Multiplexer	Multiplexor óptico terminal
• PA	Pre-Amplifier	Pre amplificador
• PA-L	PA Long	PA largo
• PA-M	PA Medium	PA medio
• PA-S	PA Short	PA corto
• P_{IN-BA} [dBm]	BA actual input power	Potencia de entrada real en el BA
• $P_{IN-BA NO VOA}$ [dBm]	BA actual input power without screw VOA in the interstage	Potencia de entrada real sin VOA manual interetapa en el BA
• P_{IN-ILA} [dBm]	ILA input power	ILA de potencia de entrada
• $P_{IN-ILA NO VOA}$ [dBm]	ILA input power without screw VOA in the interstage	Potencia de entrada sin VOA manual interetapa en el ILA
• P_{IN-PA} [dBm]	PA actual input power	Potencia de entrada real en el PA
• P_{IN-VOA} [dBm]	VOA-OLA input power	VOA-OLA de potencia de entrada
• PLA	Photonic Line Amplifier	Amplificador de línea fotónico

• PLD	Photonic Line Add/Drop	línea fotónica inserción/extracción
• PLT	Photonic Line Terminal	Terminal de línea fotónico
• PMD	Polarisation Mode Dispersion	Dispersión en modo polarizado
• $P_{\text{NOM-BA}}$ [dBm]	BA nominal input power	BA de potencia nominal de entrada
• $P_{\text{NOM-ILA}}$ [dBm]	ILA nominal input power	ILA de potencia nominal de entrada
• $P_{\text{NOM-PA}}$ [dBm]	PA nominal input power	PA de potencia nominal de entrada
• $P_{\text{VOA-TX}}$ [dBm]	VOA-OLA output power for the inter-stage calibration	Potencia de salida del VOA-OLA para la calibración inter-etapa
• RX	Receiver	Receptor
• SBA [dB]	Span Budget Attenuation (used in Network Design)	Margen de atenuación en el tramo (usado en el diseño de red)
• Screw VOA	Screw Variable Attenuator	Atenuador variable manual
• T_p	Transponder	Transponder
• TX	Transmission	Transmisión
• VOA OLA	Variable Optical Attenuator del OLA	Atenuador variable óptico del OLA
• $\text{VOA}_{\text{OFFSET}}$ [dB]	Offset part of the $P_{\text{VOA-TX}}$	Compensación de $P_{\text{VOA-TX}}$
• $\text{VOA}_{\text{theoretic-TX-power}}$ [dBm]	Theoretic value to be added to $\text{VOA}_{\text{OFFSET}}$ to get $P_{\text{VOA-TX}}$	Valor teórico que será sumado al $\text{VOA}_{\text{OFFSET}}$ para conseguir $P_{\text{VOA-TX}}$
• DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Multiplexación por división de longitud de onda de gran densidad

BIBLIOGRAFÍA

- Wayne Tomasi (1996) *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Prentice Hall.
- Nazar Gutiérrez Raúl (2002) *Multiplexacion por División de Longitud de onda de Gran densidad (DWDM)*. INTELMEX.
- Marconi Academy (2003-2007) *Smart Photonics*.
- Francis T. S. Yu, Suganda Jutamulia, Shizhuo Yin (2001) *Introduction to Information Optics*. Academic Press.
- Stamatios V. Kartalopoulos (2003) *DWDM Networks Devices and Technology*. IEE. Wiley-Interscience.
- *Designer's Guide to Fiber Optics*. Harrisburg, PA: AMP, Incorporated, 1982.
- Hecht, Jeff. *Understanding Fiber Optics*. 2nd edition. Indianapolis, IN: Sams Publishing, 1993.
- Hentschel, Christian. *Fiber Optics Handbook*. 2nd edition. Germany: Hewlett-Packard Company, 1988.
- *Just the Facts*. New Jersey: Corning Incorporated, 1992.
- Sterling, Donald J. *Amp Technician's Guide to Fiber Optics*, 2nd Edition. New York: Delmar Publishers, 1993.
- Francisco Nieto Chávez. *Marconi Communications record data engineering from Mexico DWDM network 2005*.