

Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Electricidad y Electrónica

**“ESTUDIO Y ANÁLISIS DE PÉRDIDAS EN REDES
DE FIBRA ÓPTICA BASADAS EN EL ESTÁNDAR
SONET/SDH Y SU EVOLUCIÓN HACIA DWDM”**

Tesis para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Profesor Patrocinante:
Sr. Pedro Rey Clericus
Ingeniero Electrónico

**RICARDO ARTURO GÓMEZ BARRIENTOS
VALDIVIA - CHILE**

2007



COMISIÓN DE TESIS

PROFESOR PATROCINANTE:

Sr. Pedro Rey Clericus

Firma.

PROFESORES INFORMANTES:

Sr. Néstor Fierro Morineaud.

Firma.

Sr. Raúl Urra Ríos.

Firma.

Fecha del examen de titulación: _____



Agradecimientos

Al final de este largo camino empiezo a recordar a mucha gente que me brindó su apoyo y cariño de distintas maneras para poder lograr lo que algún día se veía tan lejano e inalcanzable, a todos ellos muchas gracias.

También muchas gracias a mis padres Flor y Arturo por su apoyo durante todos estos años de estudio, que se terminan en este trabajo, pero que sirven para toda una vida.

Mis agradecimientos al profesor Pedro Rey, por su apoyo y voluntad para poder terminar este trabajo.

Mil gracias a la empresa Leadcom-Chile, empresa en la cual trabajo desde ya hace un año, por darme la oportunidad de desarrollar mi tema de Tesis y darme la posibilidad de seguir desarrollándome como profesional, gracias por confiar e invertir en mi.



Resumen

La atenuación de la señal, también conocida como pérdida de la fibra o pérdida de señal, es una de las propiedades más importantes de una Fibra Óptica, porque determina la distancia máxima de separación entre repetidores. Por lo tanto, determina el número de ellos entre la emisión de una señal y la recepción de la misma.

Como los repetidores son costosos de fabricar, instalar y mantener, el grado de atenuación en la Fibra Óptica es un factor de gran influencia sobre los costos de una instalación. Es de real importancia conocer a fondo todos los factores que influyen en el debilitamiento de la señal en Fibra Óptica, así como potenciar su mejor aprovechamiento de su ancho de banda.

En este proyecto de Tesis se tratarán todos los factores que influyen en la pérdida de señal, en las redes ópticas basadas en el estándar SONET/SDH. En primer lugar se analizará el modelo de propagación de la señal, para así hacer un análisis sobre la Fibra Óptica como medio de transmisión relativo a las pérdidas que puede tener en el medio en que se desenvuelve e identificar y analizar los factores que afectan en ello. Para luego pasar a analizar y detallar la evolución de las redes de transporte hacia una nueva tecnología que viene surgiendo DWDM.



Summary

The attenuation of the signal, also well-known like loss of the fiber or loss of signal, is one of the most important properties of an Optical fiber, because it determines the maximum distance of separation between repeaters. Therefore, it determines the number of them between the emission of a signal and the reception of the same one.

As the repeaters are expensive to make, to install and to maintain, the degree of attenuation in the Optical fiber is a factor of great influence on the costs of an installation. It is of real importance of knowing all the factors thorough that influence in the weakening of the Optical fiber signal, as well as of harnessing his better advantage of his bandwidth.

In this Thesis project all the factors that influence in the loss of signal, in the optical networks based on standard SONET/SDH will treat. In the first place the model of propagation of the signal will be analyzed, thus to make an analysis on the Optical fiber like means of transmission relative to the losses that can have in the means in which it develops and to identify and to analyze the factors that affect in it. Soon to happen to analyze and to detail the evolution of the transport networks towards a new technology that comes arising DWDM.



Objetivos Generales

- Analizar y especificar los diferentes motivos que influyen en la degradación de la señal en redes de Fibra Óptica basadas en el estándar Sonet/SDH.
- Analizar y detallar la evolución de las redes de fibra óptica Sonet/SDH hacia redes DWDM.

Objetivos Específicos

- Identificar, analizar y detallar cada uno de los factores que participan en la degradación de la señal en redes de Fibra Óptica basadas en el estándar Sonet/SDH.
- Identificar cual es el grado de pérdida en redes de fibra óptica de cada uno de los factores que inciden en la señal.
- Proponer soluciones reales para mitigar la degradación de la señal en redes de Fibra Óptica basadas en el estándar Sonet/SDH.
- Analizar, detallar y especificar las razones de la evolución de las redes de Fibra Óptica hacia la multiplexación DWDM.

ÍNDICE

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	10
1.1 INTRODUCCIÓN	10
CAPITULO II. ASPECTOS GENERALES DE FIBRA ÓPTICA	12
2.1 Concepto de transmisión	12
2.2 Antecedentes y marco de desarrollo	13
2.3 Estructura	14
2.3.1 Modelo de propagación	15
2.3.2 Conceptos modernos de luz y propagación	15
2.3.3 Reflexión y refracción de la Luz	16
2.3.4 Leyes de refracción y reflexión	17
2.3.4.1 Ley de Snell	17
CAPITULO III. ESTÁNDAR SONET/SDH	18
3.1 El Estándar SONET/SDH	18
CAPITULO IV DEGRADACIÓN DE LA SEÑAL	23
4.1 Parámetros críticos de un sistema	23
4.1.1 Tasa de bit de error (BER)	25
4.1.2 La Prueba de Pérdidas	26
4.1.3 Las Pérdidas de Retorno Óptico	26
4.1.4 Pérdidas de retorno óptico (ORL) versus reflectancia	27
4.1.5 Relación señal a ruido óptico (OSNR)	28
4.1.6 Ganancia	29
4.1.7 Longitud de onda central	30
4.1.8 Drift	31
4.1.9 Crosstalk (Diafonía)	31
4.2 EFECTOS LINEALES	32
4.2.1 Atenuación	32
4.2.2 Dispersión	33
4.3 EFECTOS NO LINEALES	34
4.3.1 Esparcimiento Estimulado	34
4.3.2 Esparcimiento Estimulado de Brillouin (SBS)	34
4.3.3 Esparcimiento Estimulado de Raman (SRS)	35
4.3.4 Automodulación de Fase (SPM)	35
4.3.5 Mezcla de Cuatro Ondas (FWM)	36
4.3.6 Pérdida de Potencia Óptica	37
4.3.7 Pérdidas Extrínsecas	39
4.3.7.1 Pérdidas por curvatura	39
4.3.7.2 Pérdidas por conexión y empalmes	40
4.3.7.3 Pérdidas Intrínsecas	43
4.3.7.4 Pérdidas inherentes a la fibra	43
4.3.7.5 Pérdidas resultantes de la fabricación de la fibra	45
4.3.8 Reflexión de Fresnel	46

4.3.8.1	Pérdidas por dispersión	46
4.3.8.2	Dispersión modal	48
4.3.8.3	Dispersión cromática	48
4.3.8.4	Ancho de banda	50
4.3.8.5	Apertura Numérica (AN)	52
4.3.8.6	Clasificación de las Fibras Ópticas	53
4.3.9	Modo de propagación	53
4.3.10	Fibras Multimodo	54
4.3.11	Fibra multimodo de índice escalón	55
4.3.12	Fibra multimodo de Índice Gradual	56
4.3.13	Fibras Monomodo	58
4.3.14	Materiales que conforman el núcleo y el revestimiento	59
4.3.15	Comparación de los tres tipos de Fibras Ópticas	60
4.3.16	Dimensiones del núcleo y del revestimiento	61
4.3.17	Características de transmisión	64
4.3.18	Comparación con otros sistemas convencionales de telecomunicaciones	67

CAPITULO V. DWDM 73

5.1	Opciones para aumentar el ancho de banda	75
5.2	Opciones para aumento de la velocidad	76
5.3	Aumento de Longitudes de Onda	76
5.4	TDM	76
5.4.1	DWM (<i>Wavelength Division Multiplexing</i>)	78
5.4.2	WDM y TDM	79
5.4.3	Requerimiento de Ancho de Banda	80
5.4.4	SONET con DWDM	80
5.4.5	Tecnología DWDM	83
5.4.5.1	Desarrollo de DWDM	84
5.4.5.2	Especificaciones de DWDM	88
5.4.5.3	Fibras Ópticas en DWDM	90
5.4.5.4	Fibras Multimodo y Fibras Monomodo	92
5.4.5.5	Diseños de Fibra Monomodo	93
5.4.5.6	Retos de la Transmisión por Fibra	94
5.4.5.7	Atenuación	95
5.4.5.8	Dispersión	97
5.4.5.9	Dispersión Cromática	97
5.4.5.10	Dispersión en modo polarizado	99
5.4.5.11	Otros Efectos no lineales	99
5.4.5.12	Fibra en las redes	101
5.4.5.13	Fuentes de luz y detectores ópticos	102
5.4.5.14	Emisores de luz	102
5.4.5.15	Detectores de luz	104
5.4.5.16	Amplificadores ópticos	105
5.4.5.17	Amplificador de fibra dopado con erbio	105
5.4.5.18	Multiplexadores y demultiplexadores	106
5.4.5.19	Técnicas de multiplexación y demultiplexación	108
5.4.5.20	Interfaces a DWDM	111
5.4.5.21	Operación de un transponder basado en el sistema DWDM	112

CAPITULO VI MEDICIONES ÓPTICAS EN INSTALACIÓN IN BUILDING 113

6.1	Medición Óptica	113
6.2	Reflectómetro óptico de dominio del tiempo	114
6.3	Medición típica	115
6.4	Instrumento de medición	115

VII CONCLUSIONES

121

Bibliografía

123



CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Para solucionar el problema de intercambio de información, el hombre ha inventado diferentes formas de hacerlo, desde la comunicación con señas hasta la comunicación a distancia por medio de dispositivos de tecnología avanzada. Los avances logrados en el área de telecomunicaciones han permitido que el hombre se desempeñe de una manera más eficiente y es esta eficiencia lo que, en gran medida, ha motivado a algunas empresas a exigirse mayores retos.

Las tecnologías suelen atravesar ciclos de promesa, exageración, desilusión, rechazo y renacimiento. Hoy en día se están tomando acciones concretas en el área de las telecomunicaciones en respuesta de la oferta y la demanda, gracias a esto ha surgido la Fibra Óptica. Una nueva corriente tecnológica como opción para incrementar la densidad de las telecomunicaciones más rápidamente y con un mejor servicio.

Como portadora de información, en poco más de diez 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 vino a revolucionar los procesos de 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 hasta multiplicar las formas de envío en comunicaciones y recepción por vía telefónica.

Entre sus principales características se pueden mencionar que son compactas, ligeras, amplia capacidad de transmisión y un alto grado de confiabilidad debido a que son inmunes a las interferencias electromagnéticas. Las fibras ópticas no conducen señales eléctricas por lo tanto son ideales para incorporarse en cables eléctricos, sin ningún componente conductor y 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 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. Esto las hace una excelente alternativa como medio



de transmisión, pero el cuidado que deben tener las fibras para que su funcionamiento sea exitoso es lo que se debe cuidar y conocer, las cuales están detalladas en este trabajo, se especifican las pérdidas de señal de las fibras, comportamiento, estructura, etc.

Los cambios en las redes de telecomunicaciones, la convergencia de las tecnologías de Telecomunicaciones e Informática y la Globalización, entre otros factores, han modificado las redes de Transporte y de Acceso que dan servicios a diversos mercados y clientes corporativos.

Estos hechos han venido generando sistemas de comunicaciones de alta velocidad, pasando de ATM a SDH, que ha sobrepasado su velocidad máxima normalizada de 2.5 Gbps, llegando a 10 Gbps, presentando problemas generados por la complejidad de los dispositivos electrónicos empleados. En este contexto es donde aparece la tecnología DWDM (*Wavelength División Multiplexing Dense*), que ha sido una alternativa para aumentar la velocidad de transmisión sobre la fibra óptica desde hace unas décadas atrás, pero que solo en los últimos años se ha desarrollado en forma comercial.

DWDM ofrece a los operadores la posibilidad de aumentar la capacidad de sus redes de fibra óptica instaladas simplemente aumentando las longitudes de onda paso a paso, sin necesidad de añadir nuevos tipos de fibras, que era un método tradicional empleado por los operadores para aumentar el ancho de banda de sus redes y que tenía asociados una serie de problemas como: tiempo necesario para el despliegue, elevados costos y otras trabas de carácter administrativo.

La base de la tecnología DWDM viene del mismo WDM, donde la diferencia entre estas dos tecnologías radica en lo siguiente, en DWDM los canales van densamente empaquetados, en una misma ventana de propagación, lo que no ocurre con la WDM, ya que esta puede espaciarse en una o varias ventanas de propagación. En principio la WDM se realizó en los enlaces punto a punto de Larga Distancia terrestre y submarinos. Hoy esta tecnología está instalada en las redes de Transporte de Área Metropolitana gracias al desarrollo de los Multiplexores Add/Drop Ópticos (OADM) y de los Cross-Connects ópticos (OCC).



CAPITULO II. ASPECTOS GENERALES DE FIBRA ÓPTICA

2.1 Concepto de transmisión

En un sistema de transmisión por fibra óptica existe un transmisor que se encarga de transformar las ondas electromagnéticas en energía óptica o luminosa, por ello se la considera el componente activo de este proceso. Una vez que es transmitida la señal luminosa por las minúsculas fibras, en otro extremo del circuito se encuentra un tercer componente al que se le denomina detector óptico o receptor, cuya misión consiste en transformar la señal luminosa en energía electromagnética, similar a la señal original.

El sistema básico de transmisión se compone en este orden, señal de entrada, amplificador, fuente de luz, corrector óptico, línea de fibra óptica (primer tramo), empalme, línea de fibra óptica (segundo tramo), corrector óptico, receptor, amplificador y señal de salida.

En resumen, se puede decir que este proceso de comunicación, la fibra óptica funciona como medio de transmisión de la señal luminosa, generado por el transmisor de LED'S (diodos emisores de luz) y láseres. Los diodos emisores de luz y los diodos láseres son fuentes adecuadas para la transmisión mediante la fibra óptica, debido a que su salida se puede controlar rápidamente por medio de una corriente de polarización. Además su pequeño tamaño, su luminosidad, longitud de onda y el bajo voltaje necesario para manejarlos son características atractivas.

En este trabajo de Tesis, se estudiará únicamente la fibra óptica como tal, dejando de lado los emisores, receptores y todos los demás componentes de un sistema de telecomunicaciones.



2.2 Antecedentes y marco de desarrollo

La historia de la comunicación por Fibra Óptica es relativamente corta. En 1977, se instaló un sistema de prueba en Inglaterra; dos años después, se producían ya cantidades importantes de pedidos de este material.

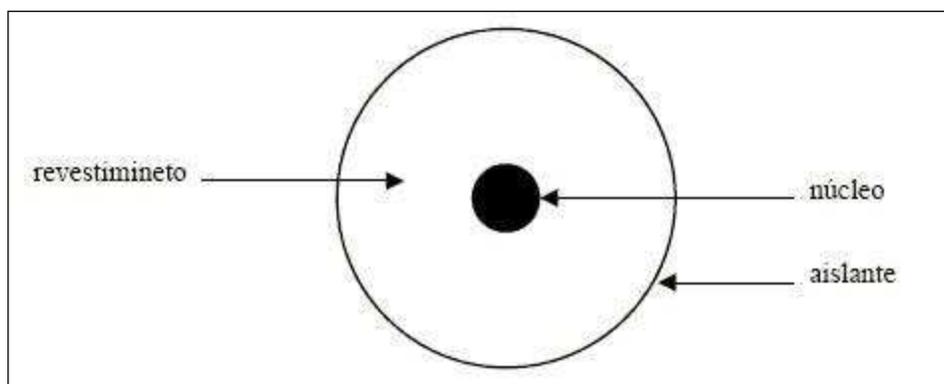
Antes, en 1959, como derivación de los estudios en física enfocados a la óptica, se descubrió una nueva utilización de la luz, a la que se denominó rayo láser, que fue aplicado a las telecomunicaciones con el fin de que los mensajes se transmitieran a velocidades inusitadas y con amplia cobertura. Sin embargo, esta utilización del láser era muy limitada debido a que no existían los conductos y canales adecuados para hacer viajar las ondas electromagnéticas provocadas por la lluvia de fotones originados en dicha fuente. Fue entonces cuando los científicos y técnicos especializados en óptica enfocaron todos sus esfuerzos a la producción de un ducto o canal, conocido hoy como la Fibra Óptica. En 1966 surgió la propuesta de utilizar una guía óptica para la comunicación. Esta forma de usar la luz como portadora de información se puede explicar de la siguiente manera: Se trata, en realidad, de una onda electromagnética de la misma naturaleza que las ondas de radio, con la única diferencia que la longitud de las ondas es del orden de micrómetros en lugar de metros o centímetros.

2.3. Estructura

La Fibra Óptica es una hebra muy fina, de un vidrio muy especial, que puede ser de solamente 125 micras de diámetro. Esta hebra de vidrio tiene aproximadamente el mismo grosor que un cabello humano. Se ha demostrado que las ondas electromagnéticas que conforman la luz tienden a viajar a través de una región que posea un índice de refracción alto. Por tanto, se hace el centro de la hebra de vidrio el núcleo (cristal de Silicio) de esa clase de materiales. Algunas fibras de vidrio tienen un diámetro de núcleo de únicamente 50 micras y tienen un índice de refracción de tipo gradual. La importancia de contar con un núcleo de este tipo es conseguir un núcleo que posea un ancho de banda algo mayor que el que tendría otro cuyo índice de refracción fuera idéntico en todas partes.

Ahora que ya tenemos el núcleo y con el fin de retener la luz dentro de él, necesitamos recubrirlo con alguna clase de material, de un índice de refracción diferente. Si no lo hacemos, no se obtendrían las reflexiones necesarias en la unión de ambos materiales. De este modo, se ha formado otro revestimiento en el núcleo que se denomina cubierta (silicona) y que tiene un índice de refracción menor que el del propio núcleo. Finalmente, para hacerlo más robusto y prevenir daños a la cubierta, se suele formar una protección ó envoltura (poliuretano) sobre la cubierta que generalmente es de algún tipo de material plástico.

Figura 1





2.3.1 Modelo de propagación

El canal de Fibra Óptica no permite que los rayos de luz deseados escapen de su interior. Es capaz de manejar la transmisión de esos rayos de luz en dos sentidos de tal forma que uno puede (pero no necesariamente) mirar por un extremo y ver lo que está pasando en el otro extremo. Con estos rayos de luz existe la posibilidad de transmitir sonido, datos e imágenes. Estos sistemas de transmisión de Fibra Óptica abren un concepto completamente nuevo en sistemas de comunicaciones. Además, poseen ventajas únicas en cuanto a eliminación de ruidos e interferencias.

La canalización de rayos de luz a través de caminos de fibra y la generación de frecuencias de luz apropiadas y de una forma también apropiada para permitir fácilmente el paso, cualquiera que sea el tipo de sustancia que se emplee para el canal. Esto implica que distintos tipos de sustancias (los cuales caen dentro de la categoría óptica o de vidrio) posean diferentes características que hacen la conductividad de ciertas frecuencias de luz más sencillas que de otras.

En un concepto elemental, significa simplemente que algunos tipos de Fibras Ópticas conducen determinadas frecuencias de luz mejor que otras frecuencias. Se debe generar la frecuencia de luz apropiada que pase a través de un tipo de fibra dada.

2.3.2 Conceptos modernos de luz y propagación

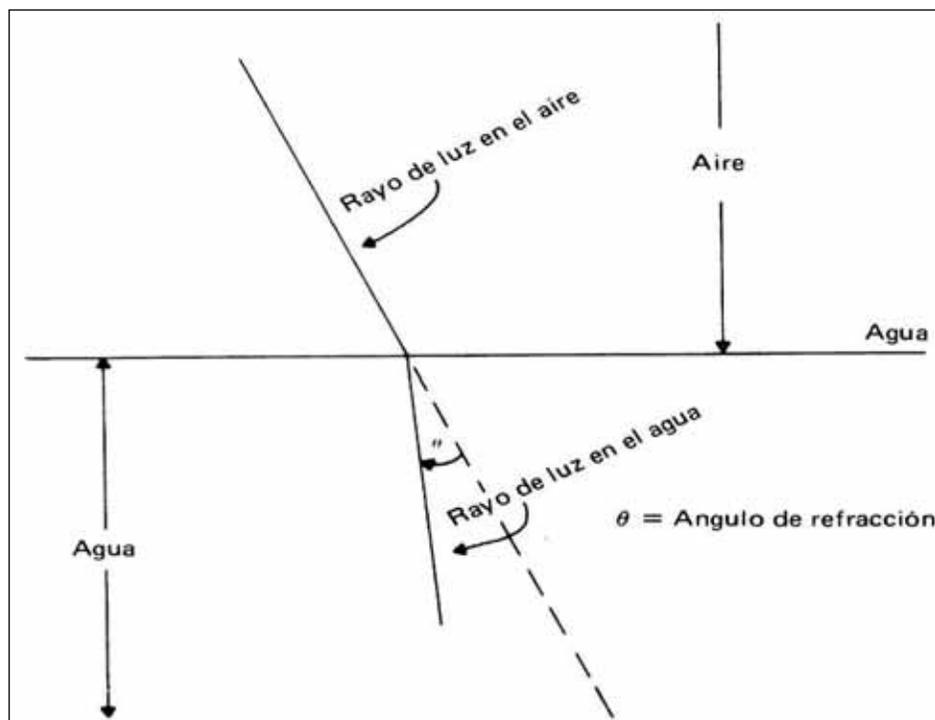
Se asocia la creación de luz con el paso de electricidad a través de un cable en una ampollita de vidrio. Se sabe también, que la luz es un componente del espectro electromagnético por James Clerk Maxwell. Demostró que los rayos de luz eran ondas de naturaleza electromagnética y demostró también que tales rayos u ondas tienen todas las mismas velocidades en el espacio libre. La velocidad de $3 \cdot 10^8$ m/seg. El margen de las radiaciones electromagnéticas van desde una frecuencia cero (Hertz) hasta frecuencia infinita y la luz varía en un margen de frecuencias cuyas longitudes de onda van desde 10^2 m a través de la región ultravioleta de 10^8 m subiendo en frecuencia a través de la región de los rayos gamma de longitud de onda 10^{14} m.

No debería sorprendernos considerar que si la velocidad de la luz es una constante en el espacio libre y que si la velocidad consiste en un valor promedio sobre una distancia infinita, que pudieran y debieran existir algunas fluctuaciones en esa velocidad en distancias finitas más pequeñas y a través de varios tipos de medios de conducción. Se piensa en la reducción de la velocidad de propagación de los rayos de luz al atravesar varias lentes. Mientras que la componente de velocidad total sobre una distancia infinita en el espacio libre permanezca constante, no se violará la ley de la cual partió Maxwell en sus teorías. Los experimentos han demostrado que esas variaciones finitas de la velocidad son ciertas.

2.3.3 Reflexión y refracción de la Luz

Si un rayo de luz viaja de un medio a otro, se curvará en el caso en que los dos materiales posean diferentes propiedades de conductividad de rayos luminosos. Un ejemplo típico es como un humano observando a un pez en el agua, lo ve en un punto donde realmente no está situado. El motivo por el que se curvan los rayos de luz es debido a que nuestra visión se basa en los rayos que penetran en nuestros ojos, y los rayos que forman el pez son rayos de luz reflejados, que salen del pez (y del agua) y entran en otro medio con distinta conductividad.

Figura 2



Es importante considerar ahora la trayectoria que describe el rayo a medida que se aproxima a la superficie de un medio diferente. El ángulo, medido desde una perpendicular a esa superficie, se denomina ángulo de incidencia del rayo sobre esa superficie.

También podría existir un ángulo crítico de incidencia de forma que excederlo puede dar lugar a una situación de no-reflexión (propagación).

2.3.4 Leyes de refracción y reflexión

Los rayos reflejados y refractados están situados en un plano que contiene el rayo incidente y la perpendicular (normal) a la superficie del material de reflexión o refracción, siendo el ángulo de incidencia igual al ángulo de reflexión.

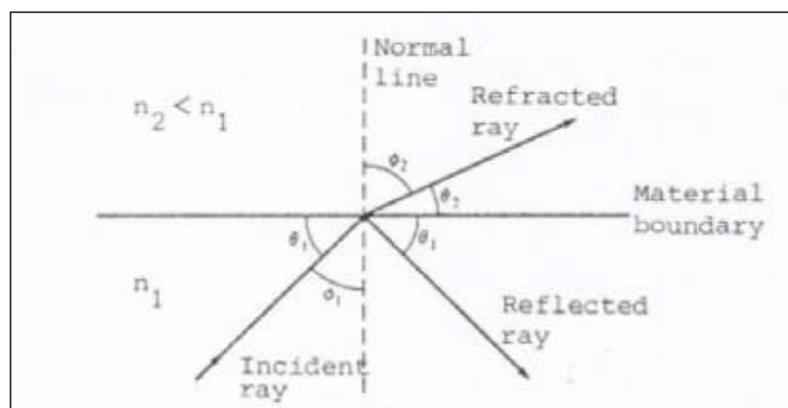
2.3.4.1 Ley de Snell

Willebrod Snell fue la persona que descubrió la ley relacionada con estos fenómenos en el año 1621. Lo que él propuso es una ecuación que ha permanecido vigente durante varios cientos de años, que es importante para nuestro concepto de cómo viajan los rayos de luz a lo largo de un tubo luminoso. La expresión comúnmente utilizada de esta ley es:

$$\text{Ley de Snell} = n_1 \text{ sen } (\theta_1) = n_2 \text{ sen } (\theta_2).$$

Lo cual dice simplemente que la relación de los índices de refracción es igual a la relación de los senos del ángulo de incidencia y el ángulo de refracción.

Figura 3





CAPITULO III. ESTÁNDAR SONET/SDH

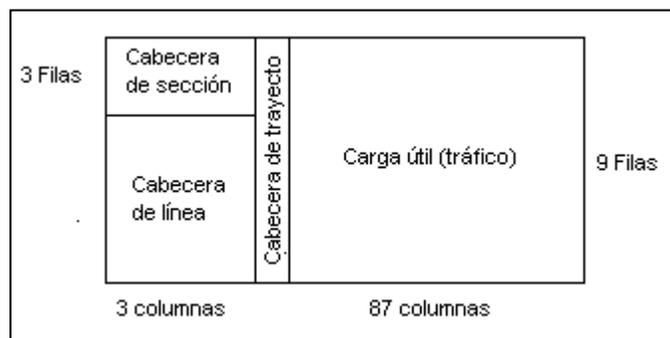
3.1 El Estándar SONET/SDH

Los esfuerzos para la creación del estándar SONET comenzaron por el ANSI en 1985. Siguiendo al desarrollo del estándar SONET, el CCITT comenzó la definición de un estándar síncrono que permitiera tratar el problema de la interconexión entre las jerarquías de transmisión europea y americana. El trabajo culminó en el año 1989 con la publicación del estándar SDH. En realidad, SDH es un estándar mundial, y como tal SONET puede considerarse un subconjunto de SDH. La industria de las telecomunicaciones adoptó el estándar SONET (Synchronous Optical Network) y el SDH (Synchronous Digital Hierarchy) para el transporte óptico de datos TDM. SONET, usada en Estados Unidos, y SDH, usada en el resto del mundo, son dos estándares casi iguales que especifican los parámetros de la interfase, las velocidades, los formatos de las tramas, los métodos de multiplexación y gestión del TDM síncrono sobre fibra.

SONET define una tecnología para transportar muchas señales de diferentes capacidades a través de una jerarquía óptica síncrona y flexible. Esto se logra por medio de un esquema de multiplexado por interpolación de bytes. La interpolación de bytes simplifica la multiplexación y ofrece una administración de la red extremo a extremo.

El primer paso en el proceso de la multiplexación de SONET implica la generación de las señales del nivel inferior de la estructura de multiplexación. En SONET la señal básica la conocemos como señal de nivel 1 o también STS-1 (Synchronous Transport Signal level 1). Está formada por un conjunto de 810 bytes distribuidos en 9 filas de 90 bytes. Este conjunto es transmitido cada 125 microsegundos, correspondientes a la velocidad del canal telefónico básico de 64 Kbps, por lo que la velocidad binaria de la señal STS-1 es 51,84 Mbps.

Figura 4



Estructura de trama de la señal STS-1

SONET/SDH toman n flujos de bits, los multiplexan, y ópticamente modulan la señal, enviándola a la salida mediante un dispositivo emisor de luz sobre fibra con una velocidad igual a n veces la velocidad de entrada de uno de los flujos. Así el tráfico que entra en un multiplexador SONET de 2,5 Gbps con 4 flujos, saldrá a 10 Gbps en un solo flujo.

La unidad original utilizada en la telefonía multiplexada es de 64 kbps, que representa una llamada. 24 llamadas en Estados Unidos o 32 llamadas en Europa son multiplexadas con TDM en una señal de más alta velocidad siendo su agregación de 1,544 o 2,048 Mbps para una transmisión sobre líneas T1 o E1 respectivamente. La jerarquía de múltiples llamadas telefónicas se muestran en la tabla adjunta.

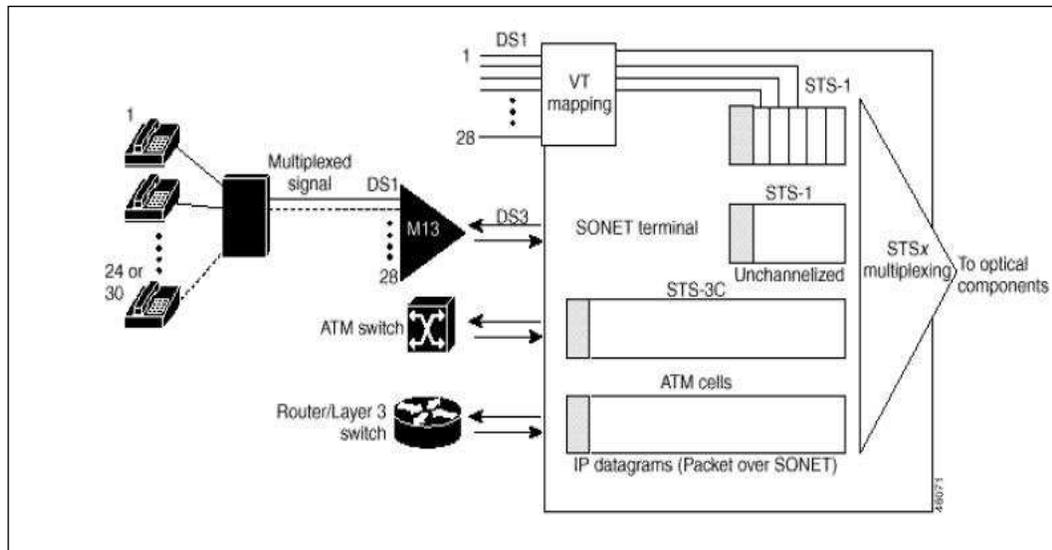
<i>Señal</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Canales de Voz</i>
DS0	64 kbps	1 DS0
DS1	1,544 Mbps	24 DS0
DS2	6,312 Mbps	96 DS0
DS3	44,736 Mbps	28 DS1

En SONET/SDH la otra tabla jerárquica estándar de velocidades que va desde STS-1 a 51,85 Mbps hasta STS-192/STM-64 a 10 Gbps. En la tabla siguiente se muestra la relación entre las velocidades de la tabla anterior y la jerarquía de SONET/SDH.

<i>Optical Carrier</i>	<i>Señal SONET/SDH</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Capacidad</i>
OC-1	STS-1	51,84 Mbps	28 DS1s o 1 DS3
OC-3	STS-3/STM-1	155,52 Mbps	84 DS1s o 3 DS3s
OC-12	STS-12/STM-4	622,08 Mbps	336 DS1s o 12 DS3s
OC-48	STS-48/STM-16	2488,32 Mbps	1344 DS1s o 48 DS3s
OC-192	STS-192/STM-64	9953,28 Mbps	5379 DS1s o 192 DS3s

Como se ve en la siguiente figura 5, mediante un canal tributario virtual se pueden mapear los canales de baja velocidad en la carga de un STS-1, las 28 señales DS1 se pueden mapear en una carga STS-1 o pueden ser multiplexadas a DS3 con un multiplexador de nivel 3 y conectarse directamente a STS-1. Notar también que el tráfico ATM y el de nivel 3, usando paquetes sobre SONET, puede ser una entrada a un terminal SONET de conmutadores equipado con interfaces SONET.

Figura 5



SONET/SDH tiene algunas desventajas. Como cualquier TDM, las nociones de prioridad y congestión no existen en SONET/SDH. Por otra parte la jerarquía de multiplexación es rígida. Si se necesita mayor capacidad, se debe pasar al nivel siguiente mediante el salto correspondiente, por ejemplo, de 10 Gbps se pasa a 40 Gbps. También, dado que la jerarquía se



ha hecho pensado en tráfico de voz, hay ineficiencias inherentes a ello en cuando se transportan datos con tramas SONET.

Ver esto en la tabla siguiente:

<i>Ethernet</i>	<i>Señal SONET/SDH</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Ineficiencia</i>
10 Mbps	STS-1	51,854 Mbps	80,70%
100 Mbps	STS-3/STM-1	155,52 Mbps	35,70%
1000 Mbps	STS-48/STM- 16	2488,32 Mbps	59,81%

En resumen, la demanda situada en la infraestructura de transporte por las aplicaciones y que necesitan mucho ancho de banda y el crecimiento explosivo de Internet, ha excedido los límites del tradicional TDM. La fibra, que parecía tener un ancho de banda interminable, también está exhausta y las limitaciones en cuanto a costos, complejidad y escalabilidad de una infraestructura SONET es cada vez más problemático.

La clave de SONET es que permite interfaces con fuentes asíncronas por lo que los equipos existentes pueden ser sustituidos o soportados por la red SONET. De esta forma las transiciones se pueden realizar gradualmente.

Aquí podemos ver las ventajas que presenta la SONET frente a otros sistemas:

- La creciente flexibilidad de configuración y la disponibilidad de ancho de banda de SONET proporciona significativas ventajas frente a otros sistemas de telecomunicación más antiguos.
- Reducción de los equipos necesarios para la multiplexación y la extracción-inserción de tráfico en puntos intermedios de las grandes rutas.
- Aumento de la fiabilidad de la red, como consecuencia del menor número de equipos implicados en las conexiones.
- Proporciona bytes de cabecera que facilitan la administración de los bytes de información y el mantenimiento de los propios equipos.
- Definición de un formato síncrono de multiplexación para el transporte de señales digitales de la Jerarquía Digital Plesiócrona o PDH, en sus diversos niveles (como DS-1,



DS-3) y una estructura síncrona que simplifica enormemente la interfaz de los conmutadores digitales, así como los conectores y los multiplexores.

- La existencia de una gran gama de estándares genéricos que permitan la interconexión de productos de diferentes fabricantes.
- La definición de una arquitectura flexible capaz de incorporar futuras aplicaciones, con una gran variedad de velocidades de transmisión.
- Interfaz centralizado, integrado y remoto para los equipos de transporte y multiplexación.
- Rápido aislamiento de fallos.
- Monitorizado de rendimiento extremo a extremo.
- Soporte de nuevos servicios de alta velocidad.
- La posibilidad de crear estructuras de red distribuidas de forma muy económica gracias a los multiplexores ADD/DROP (ADM)
- Estructura en doble anillo para mayor inmunidad a los fallos.



CAPITULO IV DEGRADACIÓN DE LA SEÑAL

La Fibra Óptica posee extraordinarias ventajas sobre otros tipos de canales de comunicación, por ejemplo, la capacidad de transmitir altas cantidades de información a muy bajas pérdidas, a velocidades muy altas, un tamaño y una flexibilidad más conveniente, además de poseer una confiabilidad que otros medios no son capaces de proveer. Con un cable de seis fibras ópticas 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 el mismo servicio, con la desventaja que este último medio ocupa un gran espacio en los ductos y requiere de grandes volúmenes de material, lo que también eleva los costos.

A pesar de sus excelentes propiedades, existen efectos y parámetros críticos que limitan la distancia de los repetidores, amplificadores y el ancho de banda de la fibra, que causan la necesidad de incorporar en los enlaces ciertos elementos que permitan producir una correcta transmisión de información. En un sistema hay muchos parámetros que pueden afectar, algunos de ellos son mencionados en este trabajo, los otros efectos que producen problemas se pueden separar en dos grandes grupos, los efectos lineales y los no lineales.

4.1 Parámetros críticos de un sistema

Los parámetros críticos de un sistema son diferentes a los componentes individuales. Además, los efectos inducidos por unión de todos los componentes son difíciles de prever. En algunos casos se agregan o quitan componentes. Además, las condiciones del medio donde se encuentran, distancias físicas, ópticas, conectores y cables de parche pueden crear problemas imprevistos en algún componente.

La actuación global de un sistema óptico DWDM, que se explica más adelante esta basado mayormente en los siguientes factores:



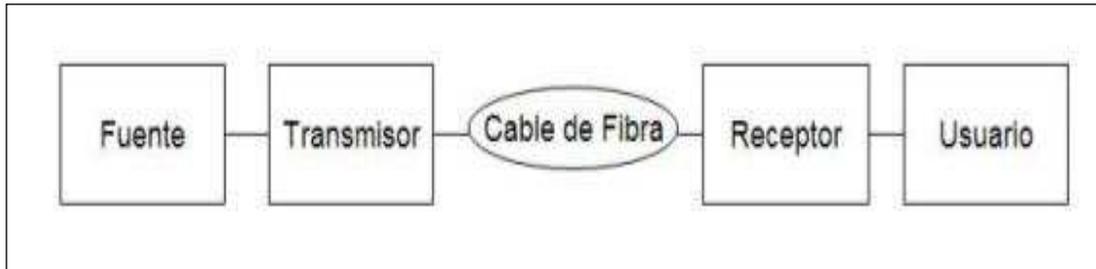
- El rendimiento de la potencia de transmisión del láser debe mantener a un nivel tan alto y estable como sea posible para aumentar la longitud de onda del tramo de transmisión pero sin excederse para no favorecer los efectos no lineales.
- El número de canales, (el número de canales y las tasas de bits de estos definen el ancho de banda del sistema).
- El espaciamiento entre canales en Gigahertz; ITU-T ha definido dos valores de espaciamiento entre canales normales: de 100 GHz, equivalente a 0,8 nm., y el otro 50 GHz equivalente a 0,4 nm.
- Los actuales láseres proporcionan una modulación en comunicaciones de larga distancia a tasas de 2,5 Gbps (STM-16) y 10 Gbps (STM-64). En comunicaciones metropolitanas se presentaban tasas de transmisión mas bajas, ejemplo, 155 Mbps (STM-1) y 622 Mbps (STM-4).
- El Amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA); la ganancia, amplitud u anchuras espectrales pequeñas con ganancias de 30 a 40 dB son típicas, mientras las anchuras espectrales de 40 nm. son típicas en el rango de la amplificación del EDFA.
- La sensibilidad del receptor (tan alta y estable como sea posible).
- Tipo de fibra y características técnicas. (Crítico para tasas de transmisión de datos, dispersión y capacidad máxima de canales).

Aunque es posible caracterizar la actuación de un sistema con los parámetros anteriores, muchas consideraciones más se deben tener en cuenta para llevar a cabo un estudio completo del funcionamiento de un sistema DWDM.

4.1.1 Tasa de bit de error (BER)

Suponiendo que se tiene un enlace punto a punto, al cual el operador debe medir ciertos parámetros.

Figura 6



Típico enlace punto a punto con sus respectivos elementos

Normalmente se caracterizan los requisitos de funcionamiento de sistemas basados en una cierta BER específica cuyo valor generalmente depende en una aplicación de la fuente del usuario específica. Esta podría tener un valor tan alto como 10^{-3} para las aplicaciones como la voz digitalizada a tan bajo como 10^{-12} para datos científicos.

Nos podemos formular la siguiente pregunta: ¿el diseño de un enlace nos proporcionará el BER requerido?. Para contestar esta pregunta debemos ver la sensibilidad del receptor. Esta especificación indica cuanta potencia óptica del enlace debe ser recepcionada para obtener un cierto BER requerido.



4.1.2 La Prueba de Pérdidas

La prueba de pérdidas es la evaluación principal del comportamiento de un sistema o enlace. Las pérdidas se pueden medir individualmente o pueden interpretarse según una variedad de procedimientos y criterios, pero lo que se debe tener en cuenta es el comportamiento global del enlace en cuestión en cuanto a las pérdidas.

Las pérdidas dependen de la calidad y exactitud de los componentes o subsistemas, incluso con los productos de mejor calidad. Las pérdidas son inevitables en los conectores, multiplexores, demultiplexores y en la propia fibra.

4.1.3 Las Pérdidas de Retorno Óptico

Cuando la luz se inyecta en un dispositivo óptico, algo de energía se refleja. La pérdida de retorno óptico esta directamente asociada con malos conectores o empalmes (se puede decir que en los empalmes mecánicos existe reflexión y que en los por fusión no, en estos es mínima si se realizan con precaución) y componentes defectivos. Podemos atribuir las pérdidas a las reflexiones que ocurren a las interfaces discretas como resultado de los huecos de aire, desalineamientos y diferencias de índices de refracción. El resultado de tales pérdidas es que la señal perderá potencia y la integridad de los datos se dañara por la Interferencia Multi – Trayectoria (MPI) y la estabilidad de la fuente tenderá a bajar.

Las pérdidas fluctúan de un canal a otro, por eso es que las pruebas a un sistema se deben realizar a todo el ancho espectral. Los láseres de alto rendimiento usados en los sistemas DWDM son muy sensibles a la luz reflejada que puede degradar la estabilidad del láser y a la razón Señal a Ruido o incluso pueden dañar la fuente. Las reflexiones pueden aparecer en los EDFAs y causar aumentos significativos en la figura de ruido de estos. Todos estos problemas deben medirse antes y después de que la señal de información se coloque definitivamente en la red.



4.1.4 Pérdidas de retorno óptico (ORL) versus reflectancia

El término pérdida de retorno óptico (a menudo abreviado como pérdida de retorno) y la reflectancia son cuantificaciones de la potencia reflejada y a menudo son confundidos. La pérdida de retorno óptico (ORL) generalmente describe la reflexión total en un sistema de Fibra Óptica o subsistema, medido en una situación específica.

$$\text{ORL (dB)} = 10 \log_{10} (\text{potencia incidente} / \text{potencia reflejada})$$

ORL, medido en decibeles, siempre es positivo (la potencia incidente siempre es mayor que la potencia reflejada). En la interfaz de un sistema, por ejemplo, si 1 mW de potencia incidente y 1 μ W de potencia reflejada, la pérdida de retorno es de 30 dB. Un valor mas alto significa que tenemos menos potencia reflejada y, así, tendremos un mejor funcionamiento.

La reflectancia normalmente describe la reflexión en una sola interfaz u otro sitio al nivel de componentes, por ejemplo, en un conector. Aunque se definen ORL y reflectancias en forma diferentes, cada uno representa una proporción entre la potencia incidente y la reflejada. Como ambos se miden en decibeles, la conversión de uno a otro simplemente es cuestión de cambiar el signo:

$$\text{Reflectancia (dB)} = 10 \log_{10} (\text{potencia reflejada} / \text{potencia incidente})$$

La reflectancia, también medida en decibeles, siempre es negativa (la potencia reflejada siempre es más pequeña que la potencia incidente). En un conector, por ejemplo, si hay 1 mW de potencia incidente y 1 μ W de potencia reflejada, la reflectancia es de – 30 dB. Un valor mas negativo significa menos potencia reflejada y, así, tendremos un mejor funcionamiento.



4.1.5 Relación señal a ruido óptico (OSNR)

Aunque el BER es el parámetro que mejor caracteriza el comportamiento de un enlace, esta principalmente determinado por la relación señal a ruido óptico (OSNR). Por consiguiente, el OSNR es un parámetro que siempre es determinado cuando se instala un sistema de DWDM.

OSNR se representa gráficamente como la razón entre la señal y potencia de ruido como una función de longitud de onda.

El ruido óptico ha asumido una nueva importancia desde la introducción de amplificadores ópticos en los sistemas de transmisión, se debe principalmente a la Tensión Espontánea Amplificada (ASE) en los EDFAs. Aunque los fabricantes tienen probados los EDFAs individualmente, es importante verificar su comportamiento en terreno (en cascada), con todos los canales ópticos en funcionamiento, para confirmar las expectativas de actuación global que estos reúnen. La variación de ganancia merece especial atención en los sistemas de multi-amplificación, ya que afectará directamente la llanura de potencia del sistema. Es decir, afectará la potencia de las distintas longitudes de onda, produciendo diferencia de potencia entre ellas. El ASE puede ser particularmente significativo en algunas configuraciones, ya que este fenómeno degrada la razón señal a ruido en todos los canales ópticos.

La ganancia del sistema variará con el tiempo debido a los cambios de temperatura, tensión local, degradación del componente y modificaciones de la red.

La OSNR debe determinarse para cada uno de los canales en un sistema de DWDM y se define como:

$$\text{OSNR} = \text{el valor del peor caso de } (10\log \{P_i / N_i\} + 10 \log \{B_m / B_r\}) \text{ dB}$$

Donde P_i es la potencia de la señal óptica en el canal i . B_r es la frecuencia de ancho de banda óptico, B_r es típicamente 0,1 nm. (B_m y B_r pueden ser frecuencias o longitudes de onda). N_i es el valor interpolado de la potencia de ruido medido en el ancho de banda equivalente, B_m , para el canal:



$$N_i = \frac{N \{ \lambda_i - \Delta \lambda \} + N \{ \lambda_i + \Delta \lambda \}}{2}$$

Donde $\Delta \lambda$ es el desplazamiento de interpolación, es menor que la mitad del espaciado del canal.

4.1.6 Ganancia

La amplificación óptica es uno de los parámetros más importante a medir, debido a que la ganancia es la función esencial del amplificador. La ganancia es la función de muchos parámetros que, separadamente o en conjunto, pueden modificar el funcionamiento del dispositivo. La ganancia varía con la longitud de onda de la señal, el estado de polarización de entrada y la potencia.

La curva de ganancia, que caracteriza la ganancia de la distribución espectral, es función de la potencia relativa de entrada de cada canal. El efecto de una redistribución temporal de la potencia de entrada, será caracterizado y controlado en aplicaciones de múltiples señales.

La ganancia es medida como la razón entre las potencias efectivas de entrada y salida, sin la contribución de la ASE. Esta relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$G \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{OUT}}(\lambda_t) - P_{\text{ASE}}}{P_{\text{IN}}(\lambda_c)}$$

Donde :

- G** : Ganancia en dB (puede ser calculada también como porcentaje)
- $P_{\text{OUT}}(\lambda_t)$** : Potencia efectiva de salida a la longitud de onda de canal en mW.
- P_{ASE}** : Potencia ASE en mW.



- P_{IN} : Potencia efectiva de entrada en mW.
- λ_c : Longitud de onda peak de la señal de entrada.

En los EDFAs, las especificaciones de ganancia son dadas, usualmente, en condiciones de saturación o compresión, definidas como la potencia de salida a la cual la ganancia es comprimida por la mitad de la ganancia de la señal pequeña. El amplificador óptico es operado en saturación ya que, espectralmente, ésta es más plana que en condiciones de potencia baja. Sin embargo debido a la gran cantidad de fotones existentes en la fibra dopada, los iones excitados contribuyen a la emisión estimulada más que la emisión espontánea, lo que produce una operación con un ruido mas bajo.

4.1.7 Longitud de onda central

La longitud de onda central de la señal de cada canal es una característica muy importante, dado que su exactitud determina la habilidad de comunicación entre la fuente y el receptor.

El valor preciso de la longitud de onda central de cada canal debe medirse al instalar la red para asegurar las características técnicas. Estos valores también deben supervisarse durante los programas de mantenimiento para descubrir algún corrimiento. La exactitud en medida de la longitud de onda central aumenta en importancia con la disminución del esparcimiento y ancho de banda del canal.

La norma internacional para el esparcimiento entre canales define múltiplos de 100 GHz (aprox. 0,8 nm). Este esparcimiento fue escogido porque ofrece un buen compromiso entre alta capacidad y características técnicas, pero todavía representa una tolerancia exigente por todos los equipos existentes en el enlace. El espaciado de 50 GHz normalmente se usa para las nuevas instalaciones.



4.1.8 Drift

Las fuentes ópticas no son completamente estables ya que su potencia de salida y longitud de onda central varía. El Drift es producido por algunos factores como los cambios de temperatura, reflexiones y el fenómeno *Chirp* del láser.

La preocupación primaria es que la señal debe permanecer en todo momento dentro de los límites aceptables del canal, bajo todas las condiciones de operación. El Drift excesivo puede causar la pérdida de señal en el canal afectado. La fuente incluso puede afectar a un canal adyacente y puede interferir desastrosamente allí con el traslado de información. El Drift debe medirse y debe controlarse para evitar pérdida de datos.

4.1.9 Crosstalk (Diafonía)

Diafonía es la contribución no deseada de energía de un canal a otro, la magnitud de su efecto es difícil de predecir con precisión de los datos del diseño. Esta debe observarse en pleno funcionamiento.

Los cálculos de la diafonía involucran un examen detallado de la forma del filtro pasa banda de dos canales adyacentes para verificar que la cantidad de señal que pasa de un canal a otro es despreciable. Normalmente, un mínimo de 25 dB se requiere entre canales, pero 13 dB podría bastar para un enlace submarino, en la práctica se han tolerado valores de 17 dB en aplicaciones de muy larga distancia.

Los cálculos basados en las medidas de pre-instalación no pueden darnos valores exactos, ya que la diafonía debe verificarse cuando se congregan todos los componentes de una red.

La Diafonía es un fenómeno muy importante por lo cual debe verificarse periódicamente durante el mantenimiento para asegurar la calidad de transmisión de las señales.



4.2 EFECTOS LINEALES

Estos efectos son los mas conocidos en el estudio de las fibras ópticas, se trata de aquellos fenómenos que pueden ser modelados por sistemas o ecuaciones lineales, de ahí su nombre. Se hará referencia a los efectos lineales mas conocidos en las fibras.

4.2.1 Atenuación

La transmisión de luz a través de las fibras ópticas no esta desprovista de pérdidas, por varias razones; una causa es la absorción producida por la composición de la fibra, que se manifiesta como una disipación de potencia óptica transformada en calor. Otra es la filtración de la luz a través del revestimiento. La medida del coeficiente de atenuación esta dada en dB/Km, y se rige por la siguiente ecuación:

$$\alpha \text{ (dB/Km)} = \frac{10 \log \frac{P_i}{P_o}}{L}$$

Donde P_o y P_i representan las potencias ópticas recibidas y transmitidas en un enlace, y L el largo de la fibra. Se debe señalar que la atenuación también es dependiente de la longitud de onda.

Son varios los mecanismos de degradación que contribuyen a esta pérdida de energía, siendo uno de carácter intrínseco a la fibra, tal como la composición del vidrio, y otros de origen externo, causados por impurezas, defectos de cableado, de geometría de la fibra, etc.

La atenuación adicional que proporcionan estos últimos efectos es muy variable y puede minimizarse en muchos casos con un estudio adecuado de las condiciones de fabricación, mientras que los primeros vienen obligados por los fenómenos físicos que ocurren en el interior de la fibra y dependerán del material de dopado del núcleo y de la longitud de onda de trabajo.



4.2.2 Dispersión

Dispersión es el nombre dado a algunos efectos donde diferentes componentes de frecuencia de la señal transmitida viajan a diferentes velocidades, llegando en diferentes tiempos al receptor. Un pulso es transmitido a través de una fibra y se ensancha a lo largo de esta; esto ocurre para señales analógicas y digitales.

Existen diferentes tipos de dispersión que ocurren en la Fibra Óptica, tres de los más importantes efectos son la dispersión cromática, la dispersión modal y la dispersión por modo de polarización.

La dispersión modal solo existe en la fibra multimodo, donde los diferentes modos viajan con diferentes velocidades. Las longitudes en enlaces de fibra multimodos son usualmente limitadas por la dispersión modal y no por las pérdidas. Este tipo de dispersión no presenta ningún problema en las fibras monomodo.

La Polarización, es la propiedad de la luz la cual esta relacionada con la dirección de sus vibraciones. Al viajar la luz en una fibra esta puede vibrar en uno o dos modos de polarización.. La diferencia en los tiempos de arribos es debido a la Dispersión por Modo de Polarización (PDM), es típicamente medida en picosegundos. Si no es apropiadamente controlado, PMD puede producir errores excesivos en la tasa de bits para la transmisión en sistemas digitales y pueden distorsionar señales de videos transmitidas usando formato de modulación de amplitud analógico.

La principal forma de dispersión en fibras es la dispersión cromática, que tiene un profundo impacto en los sistemas diseñados con fibras monomodo y existe debido a que los diferentes componentes de frecuencia del pulso viajan a distintas velocidades y llegan en diferentes tiempos en el lado receptor. Este tipo de dispersión puede ser causada por las propiedades dispersivas del material (dispersión por guía de ondas). La primera se debe porque en el índice de refracción del Silicio, material con que se construyen las fibras, cambia con



respecto a la frecuencia óptica de las señales, en cambio la segunda se produce porque las características de propagación de una Fibra Óptica dependen de la longitud de onda.

La dispersión usualmente es medida en unidades de $\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{Km})$, donde **ps** representa el tiempo de ensanchamiento del pulso, **nm** representa el ancho espectral del pulso y **Km** corresponde a la longitud del enlace que cubre la fibra.

4.3 EFECTOS NO LINEALES

Mientras las potencias de las señales luminosas dentro de las Fibras Ópticas se mantengan en un nivel bajo, la fibra puede ser tratada como un medio lineal, es decir, las pérdidas y el índice de refracción pueden ser considerados como independientes de la potencia. Si las potencias están en un nivel alto, hay que preocuparse por los efectos no lineales que comienzan a aparecer al interior de la fibra. Estos se pueden, clasificar en dos categorías, la primera dependiente de los efectos de esparcimiento en la fibra debido a la interacción de las ondas de luz con los fonones (vibraciones moleculares) en el Silicio, en esta categoría los dos principales efectos son el Esparcimiento Estimulado de Brillouin y el Esparcimiento Estimulado de Raman. El segundo conjunto de efectos no lineales son los que se producen debido a la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo amplificado, que a su vez es proporcional al cuadrado de la amplitud, que incluye los fenómenos de Mezcla de Cuatro Ondas (FWM), Automodulación de Fase (SPM) y la modulación de fase cruzada (CPM).

4.3.1 Esparcimiento Estimulado

El esparcimiento estimulado ocurre en sistemas modulados en intensidad, cuando las señales ópticas interactúan con ondas acústicas o con vibraciones moleculares en las fibras de Silicio, esta interacción esparce luz y modifica las longitudes de onda. Existen dos tipos de esparcimiento; la de Brillouin y la de Raman.

4.3.2 Esparcimiento Estimulado de Brillouin (SBS)

Aparece como bandas laterales separadas de la incidente, los fotones incidentes producen fotones acústicos llamados fonones, este tipo de efecto puede crear una distorsión



dentro de un canal, además produce ganancias en dirección opuesta a la dirección de propagación de la señal. Este es un fenómeno de banda angosta.

Posee el más bajo umbral de todas las no linealidades, usualmente está en el orden de algunos miliwatts y es independiente del número de canales. Este umbral aumenta con el incremento del ancho de banda de la fuente, una simple y práctica forma de levantar el umbral, es modular el láser con una pequeña señal sinusoidal de baja frecuencia.

4.3.3 Esparcimiento Estimulado de Raman (SRS)

Si dos o más señales de diferentes frecuencias son introducidas en la fibra, este fenómeno causa una transferencia de potencia, desde la onda de más baja longitud hacia la más alta, fenómeno que ocurre en la dirección de propagación. Al contrario que el esparcimiento estimulado de Brillouin, este es un fenómeno de banda ancha que afecta a la totalidad del espectro óptico que está siendo transmitido, y puede empeorar tanto la potencia como el ancho total del espectro.

4.3.4 Automodulación de Fase (SPM) y Modulación de Fase Cruzada (CPM)

Estos fenómenos ocurren debido a que dos o más ondas son colocadas en una misma fibra y porque el índice de refracción de una onda no solo depende de la intensidad de la onda, sino también de las ondas que están copropagándose. En la práctica, SPM puede tener un papel sobresaliente en sistemas que se diseñan para trabajar sobre los 10 Gbps y conduce a una restricción de la potencia por canal. CPM no es un problema en sistemas de DWDM a menos que los esparcimientos de los canales sean extremadamente estrechos (aprox. de 10 GHz).

En el caso de SPM, la variación del índice de refracción modula la fase de las ondas transmitidas, lo que implica el ensanchamiento del espectro de los pulsos ópticos. Para eliminar este efecto se puede utilizar fibras que poseen baja o cero dispersiones, en las longitudes de onda donde se están transmitiendo las señales.



Cabe destacar que la principal diferencia entre estos dos fenómenos, consiste en que SPM puede ocurrir en sistemas de un solo canal, pues como su nombre lo indica es una Automodulación de la fase, cambio CPM solo puede suceder en sistemas multicanales.

4.3.5 Mezcla de Cuatro Ondas (FWM)

Este efecto es producto de la polarización no lineal presente en la Fibra Óptica, cuando las señales son introducidas en esta, resultando la aparición de nuevas señales a distintas longitudes de onda. Como ejemplo tres ondas en las frecuencias f_i , f_j , y f_k , donde $i \neq j \neq k$, generan señales ubicadas en $f_r = f_i + f_j - f_k$. Dependiendo de las señales iniciales, las generadas pueden resultar de tal manera que algunas coincidan en las frecuencias, por lo tanto, se observan señales montadas, con una cantidad de N canales de transmisión, el efecto de mezcla de cuatro ondas genera:

$$\text{Número de estas señales indeseadas} = N^2 (N-1)/ 2$$

Como referencia en un sistema de 3 canales se obtendrá un total de 12 nuevos términos. Un punto importante de este efecto es la dependencia de la dispersión, es decir, si se trabaja con una Fibra Óptica que posee dispersión alta, las diferentes señales portadoras y generadas, viajan a diferentes velocidades de grupo reduciendo la eficiencia del fenómeno. En términos de mecánica cuántica, este fenómeno ocurre cuando fotones de una o mas ondas son aniquilados y nuevos fotones son generados en nuevas y diferentes frecuencias, de tal forma que la energía se conserva.

La Mezcla de Cuatro ondas es sensible a:

- un aumento en la potencia del canal
- una disminución en el espaciado entre canales
- un aumento en el número de canales (aunque se puede alcanzar un valor de saturación)

La FWM es un problema particularmente serio en sistemas que usan fibras de Dispersión desplazada G.553 es menos importante con fibras de dispersión desplazada no nula



G.655, sobre todo aquello con áreas eficaces grandes. No es influenciado significativamente por un aumento en la tasa de bit por canal.

4.3.6 Pérdida de Potencia Óptica.

La Pérdida de Potencia Óptica, también conocida como pérdida de la fibra o pérdida de señal, es una de las propiedades más importantes de una Fibra Óptica, porque determina el máximo de separación entre repetidoras. Por lo tanto, determina el número de ellas entre la emisión de una señal y la recepción de la misma.

Como las repetidoras son costosas de fabricar, instalar y mantener, el grado de atenuación en la fibra es un factor de gran influencia al momento de instalar una red de fibra.

La luz que viaja en una fibra óptica pierde potencia con la distancia que recorre. Estas pérdidas son en función de la longitud de onda y de impurezas e imperfecciones del material por el cual se propaga. Para el Silicio, las longitudes de onda más cortas son las que más se atenúan. Por lo tanto, las pérdidas más bajas se encuentran en longitudes de onda más largas (1550 nm), que se utiliza frecuentemente para transmisiones de larga distancia.

Las pérdidas de potencia de la luz en una fibra se miden en decibeles (dB/Km). Las especificaciones de un cable de Fibra Óptica se expresan como la atenuación en dB por un Km de longitud. Este valor se debe multiplicar por la longitud total de la fibra en kilómetros para determinar las pérdidas del cable.

La atenuación de la señal se define como:

$$a = 10 \log (P_{in}/P_{out})/ L$$

Donde:

a = atenuación en decibeles por Kilómetro [dB/Km]

P in = Potencia de entrada

P out = Potencia de salida

L = longitud

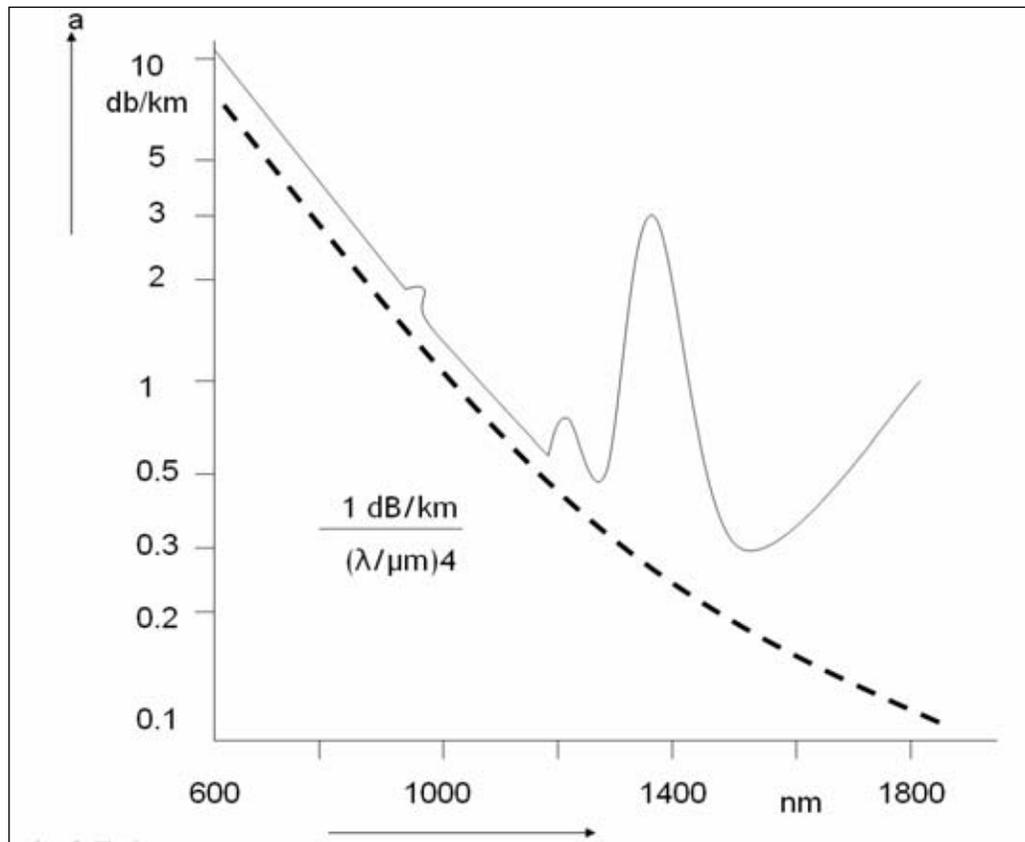


Figura 7. Se gráfica la relación entre la atenuación y la longitud de onda.

Las pérdidas por atenuación de la señal son causadas por diversos factores y pueden clasificarse en pérdidas intrínsecas y extrínsecas:

Extrínsecas:

- Pérdidas por curvatura (radiación)
- Pérdidas por conexión y empalme

Intrínsecas:

- Pérdidas inherentes a la fibra
- Pérdidas que resultan en la fabricación
- Reflexión de Fresnel



4.3.7 Pérdidas Extrínsecas

4.3.7.1 Pérdidas por curvatura

Las pérdidas por curvatura se producen porque los rayos de luz en el exterior de una curva pronunciada no pueden viajar con suficiente rapidez como para mantener el ritmo de los demás rayos, y se pierden. A medida que la luz recorre la curva, la luz del exterior de la misma debe viajar más deprisa para mantener una fase constante de la onda. Según se va reduciendo el radio de curvatura, se llega a un punto en que parte de la onda tendría que viajar más rápido que la velocidad de la luz. En ese punto, la luz del guía ondas se pierde.

Las pérdidas por curvatura también pueden ocurrir en escala más pequeña. Curvas pronunciadas del núcleo de una fibra con desplazamientos de unos pocos milímetros o menos, causadas por la protección exterior de la fibra, la fabricación, el procedimiento de instalación, pueden causar también pérdidas de potencia. Las cuales se denominan pérdidas por microcurvaturas y pueden ser significativas para grandes distancias.

El curvado de una Fibra Óptica a su vez es causado en la manufactura del cable, así como también por dobleces durante la instalación y variación en los materiales del cable debido a cambios de temperatura. Los esfuerzos que provoca la torcedura de las fibras son básicamente una fuerza transversal y un esfuerzo longitudinal. El esfuerzo longitudinal no provoca torcedura cuando trabaja para alargar la fibra, no hay cambio en las pérdidas ópticas. Sin embargo, cuando trabaja para contraer a la fibra, este esfuerzo provoca que la fibra forme bucles y se curve, de tal manera que la pérdida óptica se incrementa. Por lo tanto, al evaluar los diseños de los cables se debe poner especial atención en:

- La carga transversal trabajando en la fibra durante el cableado, instalación y utilización.
- El esfuerzo de contracción que ocurre a bajas temperaturas debido al encogimiento de los elementos del cable.

Dadas las razones anteriores, el eje de la fibra puede curvarse severamente causando grandes incrementos en las pérdidas ópticas. Para prevenir esta situación se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- Mantener un radio de curvatura determinada, seleccionando el radio y la longitud del cableado.
- Reducir variaciones técnicas de las fibras protegidas con pequeños coeficientes de expansión térmica disponiéndolas alrededor de un elemento con buenas propiedades térmicas.

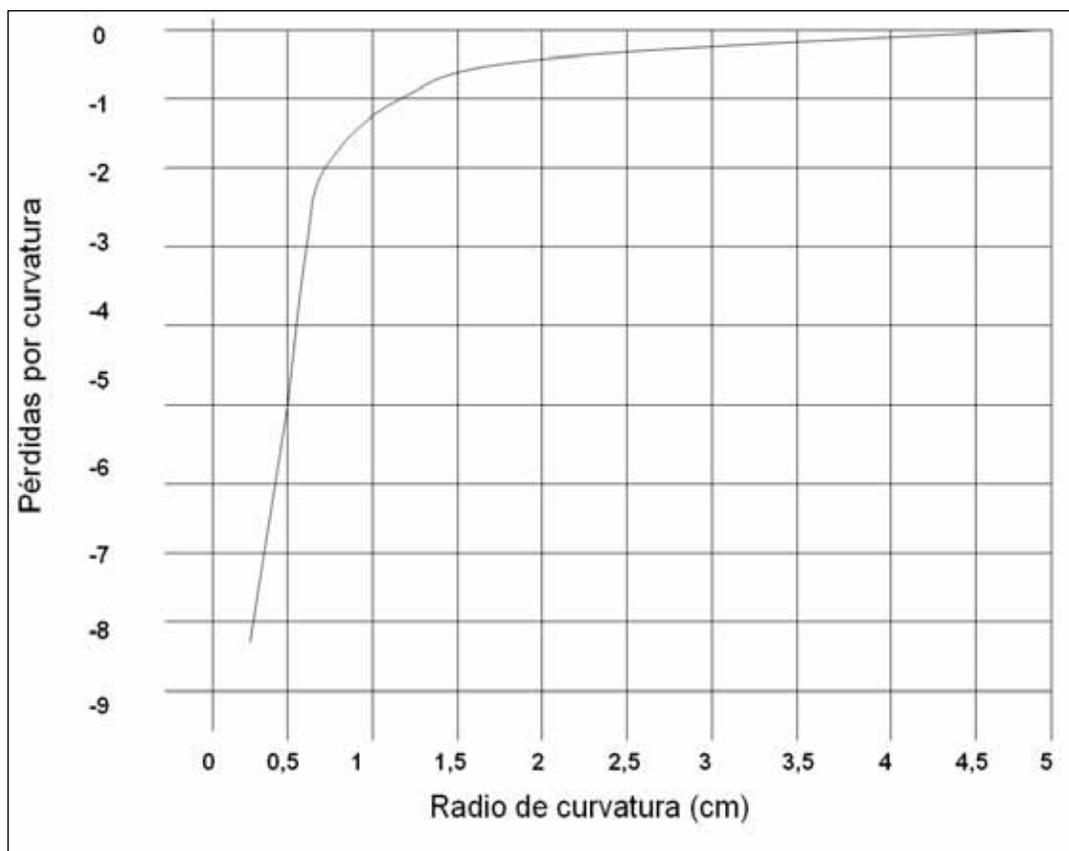


Figura 8. *Pérdidas por curvatura.*

4.3.7.2 Pérdidas por conexión y empalmes

Existen fundamentalmente dos técnicas diferentes de empalme que se emplean para unir permanentemente entre sí fibras ópticas.



Empalmes Mecánicos: Este tipo de empalme se usa en el lugar de la instalación donde el desmontaje es frecuente, es importante que las caras del núcleo de la fibra óptica coincidan exactamente. Consta de un elemento de auto alineamiento y sujeción de las fibras y de un adhesivo adaptador de índice que fija los extremos de las fibras permanentemente los empalmes mecánicos tienen generalmente las mayores pérdidas, a menudo en el rango que va desde 0,2 dB a 1.0 dB, dependiendo del tiempo de empalme.

Los empalmes por fusión tienen pérdidas más bajas, generalmente menores de 0,2 dB, con la utilización de un buen equipo se logran pérdidas de 0,07 dB. Las pérdidas pueden atribuirse a un sin fin de factores incluyendo, un mal corte, burbujas de aire, contaminación, desadaptación del índice de refracción, desadaptación del diámetro del núcleo, pero principalmente son causadas por problemas de alineación (figura 9):

- a) Mala alineación lateral: Es el desplazamiento axial o lateral entre dos piezas de cable contiguas. La pérdida puede ser desde un par de décimas de decibel a varios decibeles. Esta pérdida generalmente es insignificante si los ejes de las fibras están alineados dentro del 5 % del diámetro de la fibra.
- b) Mala alineación de la separación o separación de la extremidad: Cuando se realiza un empalme las fibras deben tocarse. Cuanto más separadas estén las fibras, mayor será la pérdida de la luz.
- c) Mala alineación angular o desplazamiento angular: Si el desplazamiento angular es menor que 2, la pérdida será menor de 0,5 dB.
- d) Acabado de superficie imperfecta: Las puntas de las dos fibras unidas deben estar altamente pulidas y encuadrarse juntas adecuadamente. Si las puntas de las fibras están a menos de 3° de la perpendicular, las pérdidas serán menores de 0,5 dB.

Conexiones: las pérdidas de los conectores de fibra óptica están frecuentemente en el rango que va desde 0,3 dB a 1,5 dB, y dependen en gran medida del tipo de conector utilizado. Otros factores que contribuyen a las pérdidas por conexión incluyen la suciedad o los contaminantes en el conector, la instalación impropia del conector, una cara dañada del conector, un corte pobre, desadaptación de los núcleos de las fibras, desadaptación del índice de refracción.

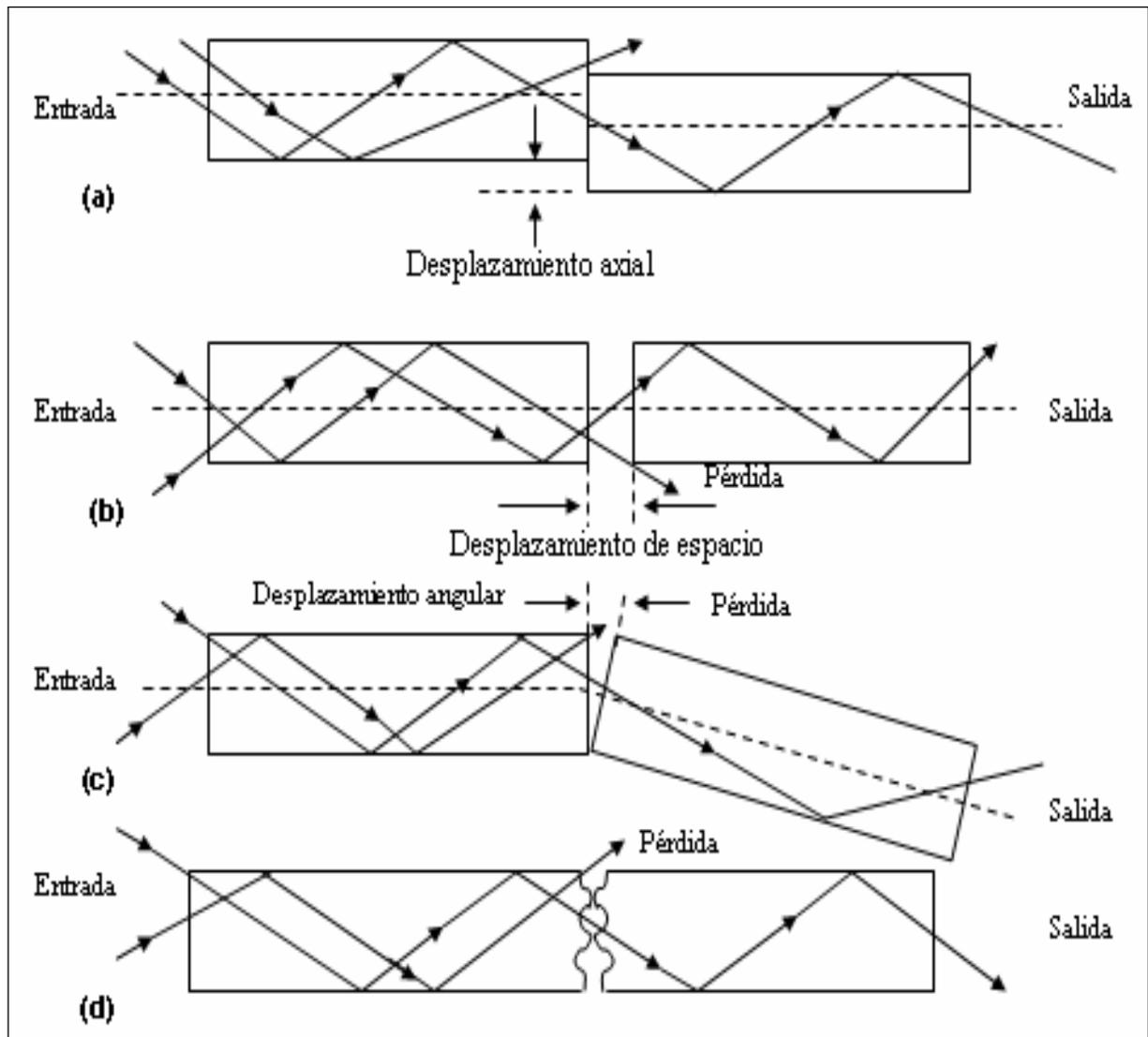


Figura 9.



4.3.7.3 Pérdidas Intrínsecas

4.3.7.4 Pérdidas inherentes a la fibra

Esta clase de pérdidas puede dividirse en:

- **Por absorción:** Las pérdidas por absorción en las fibras ópticas son análogas a la disipación de potencia en los cables de cobre, las impurezas en las fibras absorben la luz y la convierten en calor. El vidrio ultrapuro utilizado para fabricar fibras es aproximadamente 99,99% puro. Aún así, las pérdidas por absorción entre 1 y 1000 dB/Km son típicas.

Esencialmente, hay tres factores que contribuyen a esta clase de pérdidas: absorción ultravioleta, infrarroja, de resonancia del ion y por dispersión de Rayleigh

- **Absorción ultravioleta:** Es provocada por electrones de valencia en el material de Silicio del cual se fabrican las fibras. La luz ioniza a los electrones de valencia en conducción. La ionización es equivalente a la pérdida total del campo de luz y, en consecuencia, contribuye a las pérdidas de transmisión de la fibra.

- **Absorción infrarroja:** Resultado de fotones de luz que son absorbidos por los átomos de las moléculas, en el núcleo de vidrio. Los fotones absorbidos se convierten en vibraciones mecánicas aleatorias típicas del calentamiento.

- **Absorción de resonancia de ion:** Es causada por los iones OH en el material. La fuente de los iones OH son moléculas de agua que han sido atrapadas en el vidrio, durante el proceso de fabricación. También es causada por las moléculas de metales tales como hierro, cobre y cromo.

- **Por dispersión de Rayleigh:** Responde a las pérdidas de luz debido a variaciones en la densidad óptica, composición y estructura molecular.

Durante el proceso de fabricación, el vidrio es producido en fibras largas, de un diámetro muy pequeño. En esta etapa el vidrio está en un estado plástico (que no es líquido ni sólido).

La tensión aplicada al vidrio durante este momento causa que el vidrio se enfríe y desarrolle irregularidades submicroscópicas que se forman, de manera permanente, en la fibra. Cuando los rayos de luz que se están propagando por una fibra chocan contra una de éstas impurezas, se difracta. La difracción causa que la luz se disperse o se reparta en muchas direcciones. Una parte de la luz difractada continua por la fibra y el resto se escapa por la cubierta. Los rayos de luz que se escapan representan una pérdida en la potencia de la luz. Esto se llama pérdida por dispersión de **Rayleigh**.

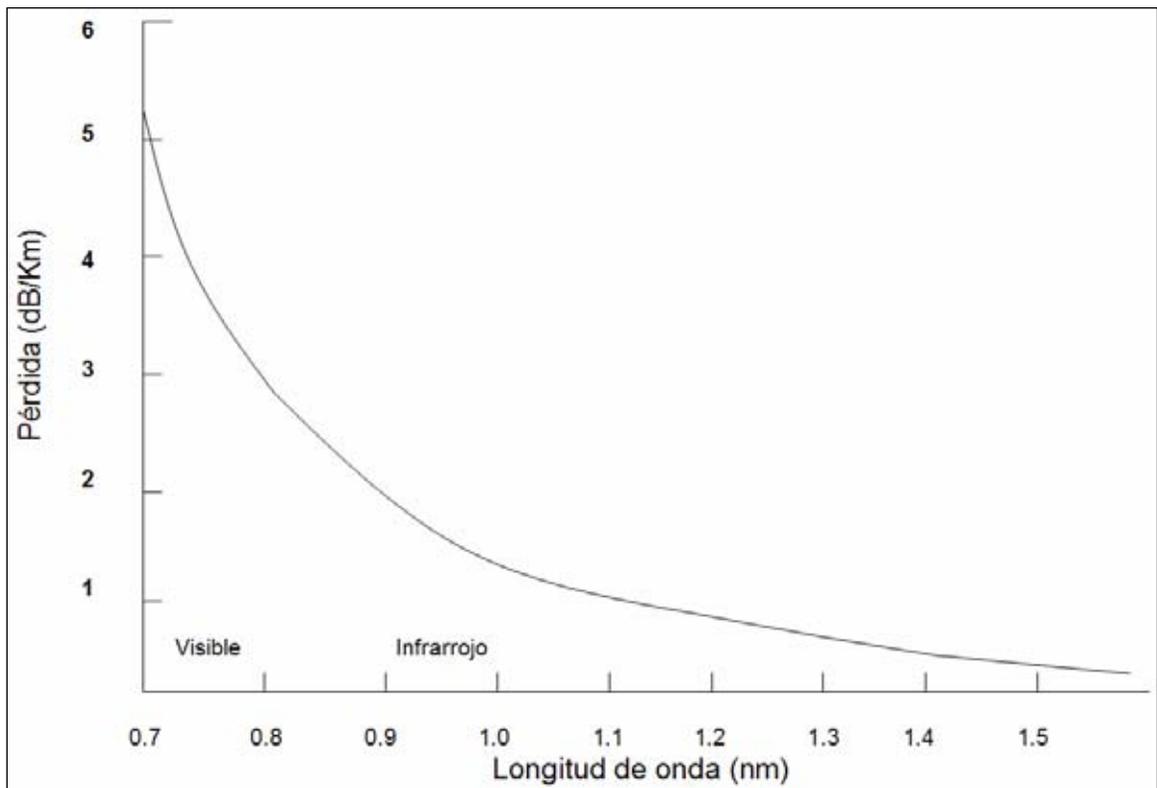


Figura 10. Se ilustra la relación entre la longitud de onda y la pérdida de dispersión de Rayleigh.

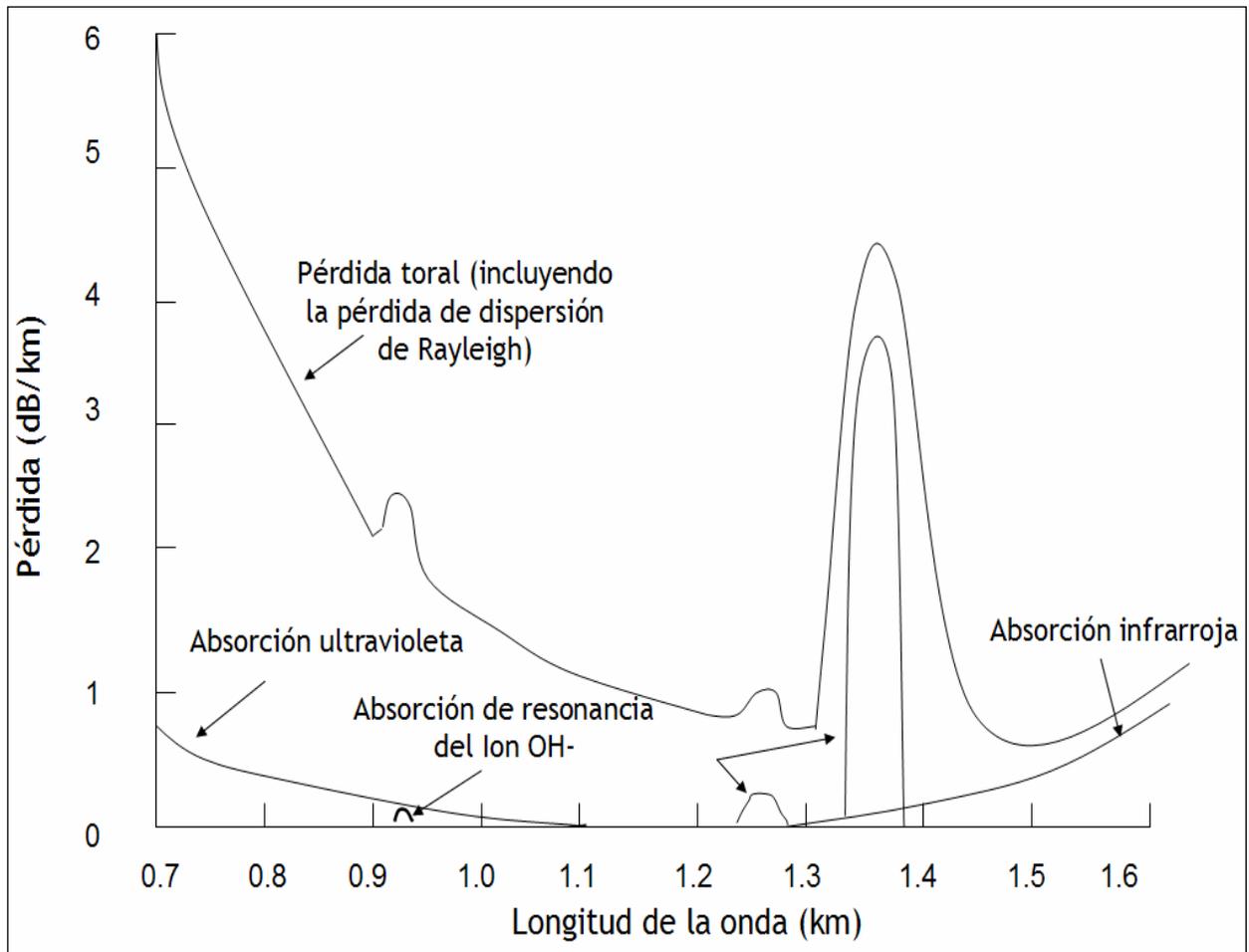


Figura 11. Muestra las pérdidas totales por absorción en la fibra óptica.

4.3.7.4 Pérdidas resultantes de la fabricación de la fibra

Las irregularidades durante el proceso de fabricación pueden dar lugar a pérdidas de rayos luminosos. Por ejemplo, un cambio de 0,1 % en el diámetro del núcleo puede significar una pérdida de 10 dB/Km. Por lo tanto es muy importante mantener una alta precisión durante todo el proceso de fabricación de la fibra para minimizar las pérdidas.



4.3.8 Reflexión de Fresnel

La reflexión de Fresnel ocurre en cualquier frontera de un medio donde cambie el índice de refracción, causando que una parte de los rayos incidentes sean reflejados al primer medio. El extremo de una fibra es un buen ejemplo de este hecho. La luz, que viaja del aire al núcleo de la fibra, es refractada al núcleo. Sin embargo, parte de la luz, alrededor del 4 %, es reflejada devuelta al aire. La cantidad que se refleja puede calcularse utilizando la siguiente fórmula:

- Potencia de luz reflejada en la frontera:

$$\text{Luz Reflejada (\%)} = 100 * (n_1 - n_2)^2 / (n_1 + n_2)^2$$

Donde n_1 = índice de refracción del núcleo

n_2 = índice de refracción del aire.

4.3.8.1 Pérdidas por dispersión

El ancho de banda de una Fibra Óptica está limitado por la dispersión total de la fibra (ensanchamiento del pulso). La dispersión limita la capacidad de transmisión de información porque los pulsos se distorsionan y se ensanchan, solapándose unos con otros y haciéndose indistinguibles para el equipo receptor. Para evitar que esto ocurra, los pulsos se deben transmitir a una frecuencia menor, reduciendo la velocidad de transmisión de datos.

a) Los pulsos originales de datos ópticos son discretos, unos y ceros que pueden ser fácilmente identificados.

b) Después de que la señal se ha propagado una cierta distancia a lo largo de la Fibra Óptica, tiene lugar la dispersión. Los pulsos se ensanchan pero pueden ser todavía decodificados por el equipo receptor.

c) Tras una propagación aún mayor por la fibra, la señal se distorsiona totalmente y el equipo receptor no puede decodificarla.

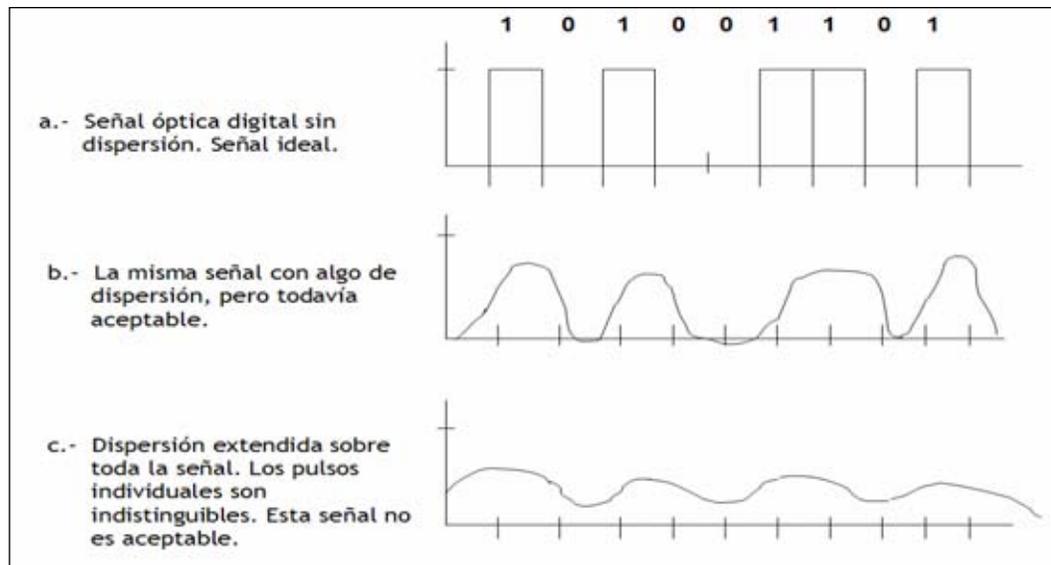


Figura 11. Señal distorsionada.

La dispersión es en función de la longitud de la Fibra Óptica, cuanto mayor sea la longitud, más pronunciado será el efecto. Se puede dividir en dos categorías: dispersión cromática y dispersión modal (también llamada dispersión multimodo). La dispersión cromática puede ser posteriormente subdividida en dispersión guía-onda y dispersión material, como se representa aquí gráficamente:

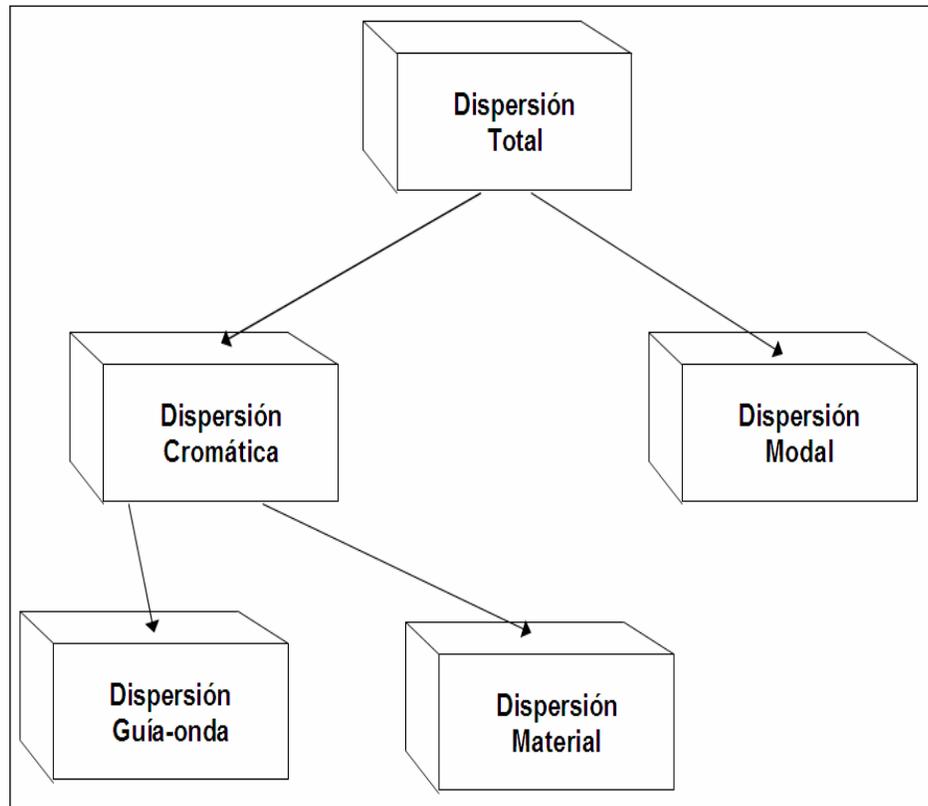


Figura 12. Dispersión Total.

4.3.8.2 Dispersión modal

La dispersión, también conocida como esparcimiento del pulso, explicada anteriormente es causada por la diferencia en los tiempos de propagación de los rayos de luz que toman diferentes trayectorias por una fibra. Es la apertura del impulso de luz y por lo tanto su unidad de medida es [ms/Km].

4.3.8.3 Dispersión cromática

Las Fibras Ópticas sufren otro tipo de dispersión, la cual está asociada al hecho de que las fuentes ópticas no son monocromáticas, a este tipo de dispersión se denomina cromática y se debe principalmente a dos fenómenos físicos:



- Dispersión cromática de material
- Dispersión cromática de guía-onda

- ***Dispersión cromática de material:*** Los materiales que se emplean para fabricar Fibras Ópticas tienen índices de refracción en función de la longitud de onda, y por lo tanto la velocidad de onda de los fotones es en función de su longitud. Los diodos emisores de luz (LED) 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 distinta. En consecuencia, los rayos de luz que simultáneamente se emiten de un LED y se propagan por una Fibra Óptica no llegan, al extremo lejano de la fibra, al mismo tiempo. Esto resulta una señal de recepción distorsionada.

La dispersión cromática puede eliminarse utilizando una fuente emisora monocromática tal como un diodo de inyección láser (ILD).

- ***Dispersión cromática de guía-onda:*** Esta clase de distorsión es debido a la anchura espectral de la fuente de luz, cuando el índice de refracción permanece constante. La razón de esto es que la geometría de la fibra causa que la constante de propagación de cada modo cambie con la longitud de onda de la luz. Este tipo de dispersión es prácticamente despreciable.

En las fibras multimodo tanto de índice de refracción escalón como gradual, generalmente, la dispersión multimodal es mayor que la dispersión cromática, por lo tanto esta última se desprecia en un buen número de aplicaciones de telecomunicaciones.

Una comparación de los mecanismos de dispersión que sufre un pulso óptico cuando se propaga a lo largo de una fibra óptica se ilustra en la figura 13.

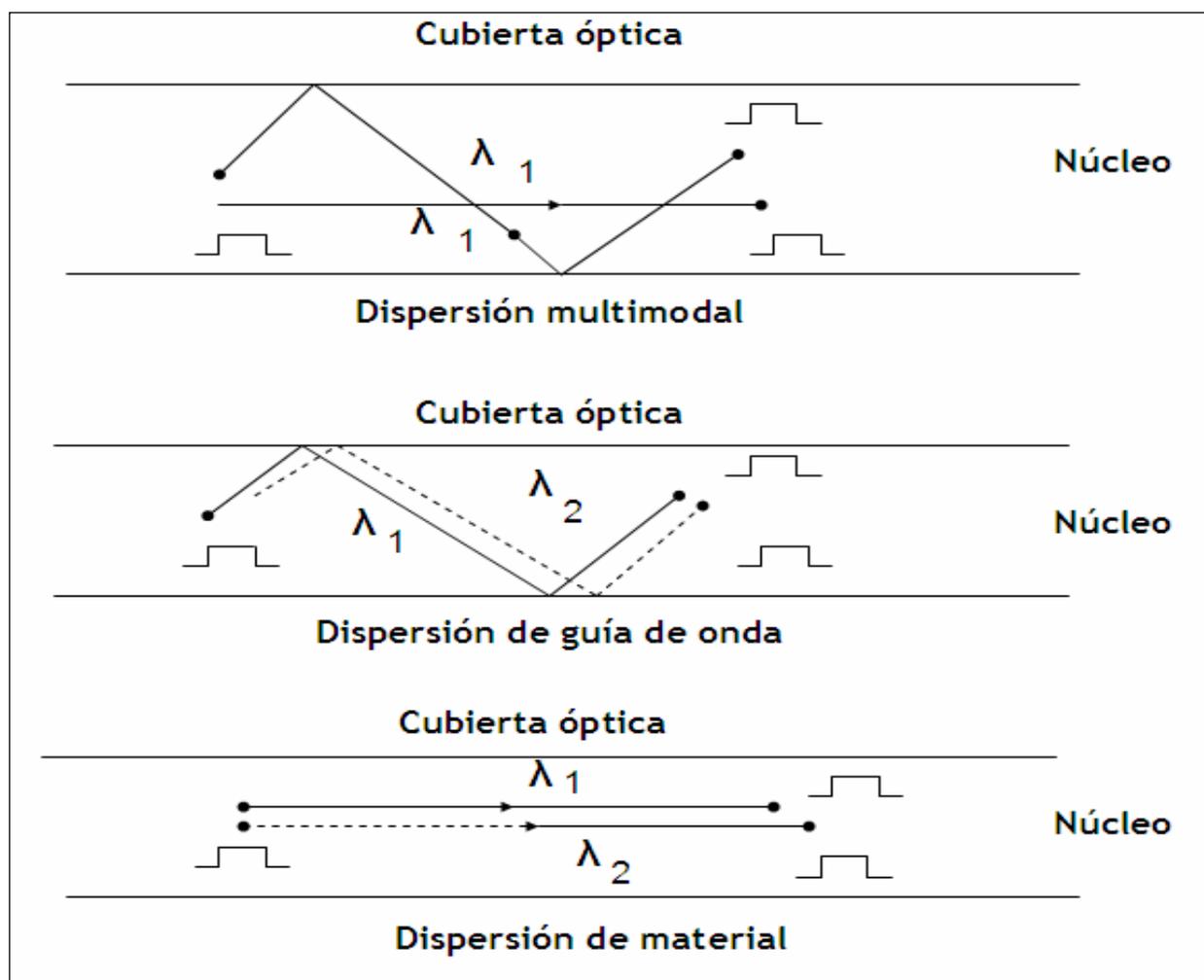


Figura 13

4.3.8.4 Ancho de banda

Una medida de la capacidad de transmisión de la información de una fibra óptica es el producto del ancho de banda por la longitud de la fibra, expresados en Mhz x Km, donde el ancho de banda es definido como la frecuencia a la cual la función de poder de transferencia experimenta una caída de 3 dB. En los sistemas reales la distorsión del pulso no depende de la inversa de la longitud, pero es cierto que esta afectado por la longitud debido a imperfecciones en la estructura, empalmes, conexiones, variaciones de diámetro y del índice de refracción, microcurvaturas, que se encuentran a lo largo de la fibra. Por lo tanto, basándose en hechos



empíricos, la dependencia de la longitud se evalúa como $1/\Delta L$. Definiendo el ancho de banda B de una fibra de L longitud como:

$$B = B_0/Lq$$

Donde:

B_0 = ancho de banda de 1 Km

Q = factor de concatenación 0,5

Si consideramos el hecho de que para la transmisión de información es necesaria una pequeña banda de frecuencias (quizás del orden de los kilohertz), pensemos entonces en la cantidad de bandas que puede contener la región luminosa del espectro de frecuencias sin que se interfieran unas con otras. Es posible transmitir información a velocidades mucho mayores. Podrían llegar a usarse velocidades del orden de los gigahertzios e incluso superiores y aún así nos quedaría una anchura de banda suficiente para poder manejar un gran número de canales simultáneamente. En los sistemas de Fibra Óptica pueden enviarse datos digitales y analógicos de manera conjunta sin ningún tipo de problemas. Esto significa que los costos son menores que con los cables de cobre, hay también menor diafonía e interferencias, una menor cantidad de cables significa que casi inevitablemente, más tarde o más temprano todos los canales de comunicaciones telefónicas utilizarán este medio para la transmisión de datos, teléfono y señales de video.

4.3.8.5 Apertura Numérica (AN)

La apertura numérica representa la cantidad de luz aceptada por la Fibra Óptica. Entre más grande sea la Apertura Numérica mayor será la cantidad de luz recogida por la fibra de la fuente de luz emisora.

Se define matemáticamente como el seno del ángulo de aceptación que es el ángulo máximo del rayo con respecto a la normal de la superficie de la fibra, para el cual la reflexión interna total tiene lugar en la frontera núcleo-revestimiento. Por lo tanto:

$$AN = \sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

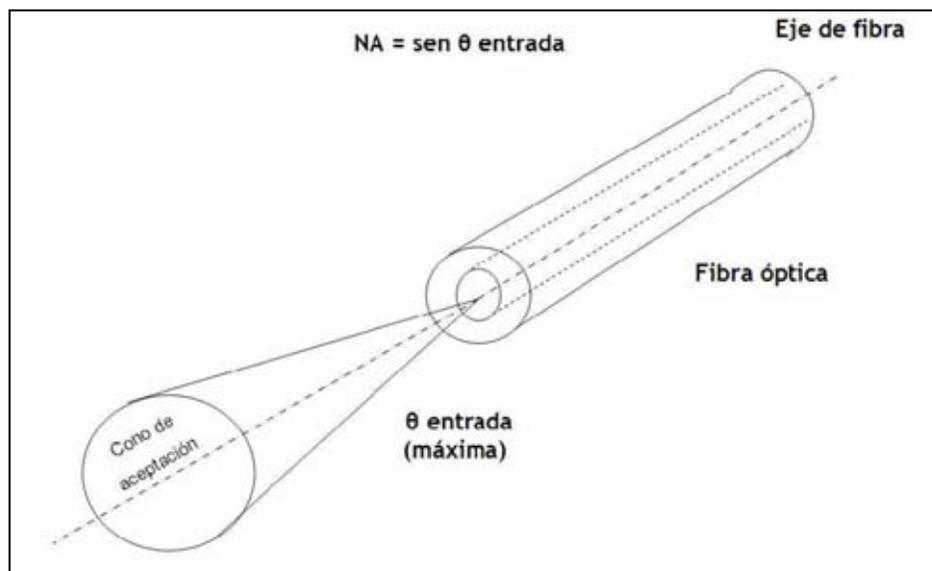


Figura 14. Representación gráfica de la Apertura Numérica de una fibra.



4.3.8.6 Clasificación de las Fibras Ópticas

Las Fibras Ópticas pueden ser clasificadas según diferentes criterios:

- Modo de propagación
- Materiales que conforman el núcleo y el revestimiento
- Dimensiones del núcleo y del revestimiento
- Características de transmisión

4.3.9 Modo de propagación

Las Fibras Ópticas se clasifican bajo este criterio de acuerdo a la forma en que los rayos de luz emitidos se propagan dentro de ellas.

Existen dos clases principales:

- Fibras monomodo
- Fibras multimodo

Para determinar analíticamente estos tipos de fibras y para encontrar el diseño óptimo del núcleo para un formato y tipo de revestimiento conocido existe una ecuación que establece estas condiciones:

$$2 \pi a / \lambda (2 n \Delta n)^{0,5} \leq 2.41 = \text{monomodo}$$
$$\geq 2.41 = \text{multimodo}$$

Donde:

a = radio del núcleo

λ = longitud de onda

Δn = diferencia entre los índices de refracción del núcleo y el revestimiento

n = índice de refracción del núcleo

4.3.10 Fibras Multimodo

Una fibra multimodo es una fibra que puede propagar en más de una trayectoria los rayos de luz, ya que posee un núcleo de mayor diámetro que permite una mayor apertura numérica. El número máximo de modos de luz que pueden existir en el núcleo de una fibra se puede determinar matemáticamente por la siguiente expresión:

Número de modos de una fibra óptica

$$M = 1 + 2D (n_1^2 - n_2^2)^{0,5} / \lambda$$

Donde:

D = diámetro del núcleo

n_1 = índice de refracción del núcleo

n_2 = índice de refracción del revestimiento

λ = longitud de la onda de la luz

Una fibra multimodo se utiliza comúnmente en aplicaciones de comunicación de corta distancia (generalmente menos de unos pocos kilómetros).

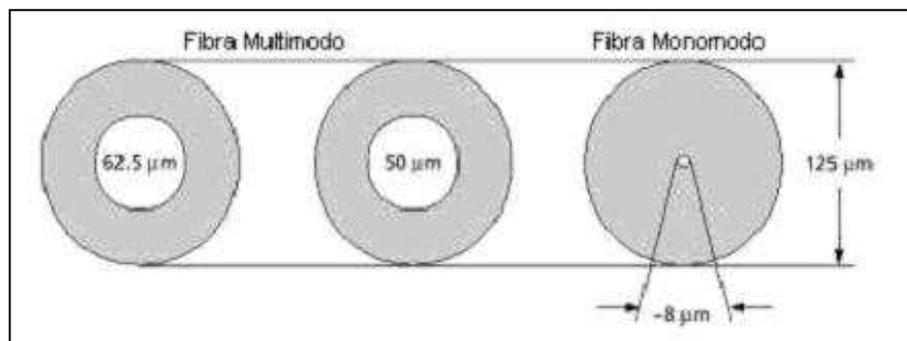


Figura 15. Comparación entre fibras Multimodo y Monomodo.



De acuerdo con el perfil del índice de refracción existen dos tipos de fibras multimodo:

- Fibra multimodo de índice escalón
- Fibra multimodo de índice gradual

4.3.11 Fibra multimodo de índice escalón

Las fibras multimodo de índice escalonado están fabricadas a base de vidrio, con una atenuación de 30 dB/km, o plástico, con una atenuación de 100 dB/km. Tienen una banda de paso que llega hasta los 40 MHz por kilómetro. En estas fibras, el núcleo está constituido por un material uniforme cuyo índice de refracción es claramente superior al de la cubierta que lo rodea. El paso desde el núcleo hasta la cubierta conlleva por tanto una variación brutal del índice, de ahí su nombre de índice escalonado.

Este tipo de fibra tiene una apertura de luz a fibra grande y, en consecuencia permite que más luz entre al cable. Los rayos de luz que le pegan a la interface núcleo-revestimiento en un ángulo mayor que el ángulo crítico son propagados por el núcleo en una manera zigzageante, reflejándose continuamente en el límite de la interface. Por lo contrario, los rayos que inciden en la interface con un ángulo menor al crítico, entran al revestimiento y se pierden.

Los rayos de luz viajan por caminos muy diferentes en el núcleo de la fibra a la misma velocidad, con lo cual llegan a su destino en distintos tiempos. Si la luz incidente tiene forma de pulso, éste se presentará disperso en el otro extremo de la fibra

Tal esparcimiento del pulso restringe la velocidad de transmisión de datos ya que son inversamente proporcionales. Un pulso más ancho significa que se pueden enviar menos pulsos por segundo, lo que resulta una disminución del ancho de banda de la transmisión.

Este es el factor principal que limita la velocidad de la transmisión de datos en una fibra multimodo.

Su utilización a menudo se limita a la transmisión de información a cortas distancias, algunas decenas de metros y flujos poco elevados. Su principal ventaja reside en el precio más económico.

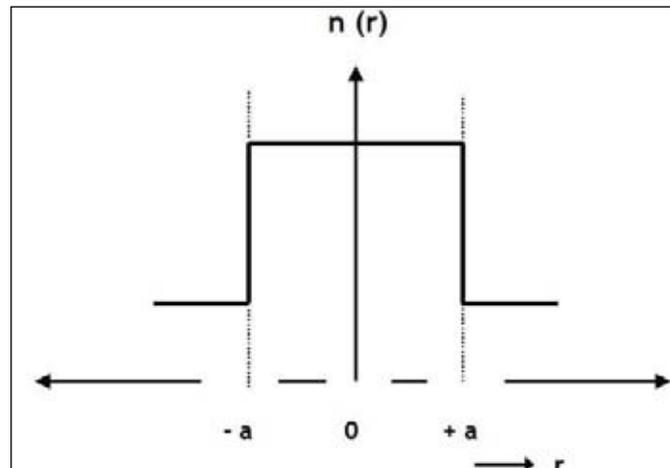


Figura 15. Índice Escalón

4.3.12 Fibra multimodo de Índice Gradual

Las fibras multimodo de índice de gradiente gradual tienen una banda de paso que llega hasta los 500 MHz por kilómetro. Su principio se basa en que el índice de refracción en el interior del núcleo no es único y decrece cuando se desplaza del núcleo hacia la cubierta.

La luz se propaga por este tipo de fibras a través de la refracción dentro del núcleo produciendo un doblamiento continuo de los rayos de luz emitidos.

Puesto que el índice de refracción es una medida de la disminución de la velocidad de la luz que viaja en el medio, la velocidad de los rayos de la luz propagada se incrementa conforme se alejan del centro del núcleo. De esta manera se puede lograr que los rayos de modos altos lleguen al mismo tiempo que los rayos de modos bajos en el otro extremo de la Fibra Óptica, resultando una disminución de la dispersión modal.

Es por dicho motivo que este tipo de fibra tiene un ancho de banda de transmisión de datos mayor que una fibra de índice escalón.

Se ha descubierto que con un índice de refracción gradual en el material de la fibra, podría conseguirse una especie de transmisión monomodo. En fibras monomodo los índices de refracción del núcleo y la cubierta son uniformes y el cambio del índice de refracción en la frontera de ambos es abrupto. Es posible tener un material de tipo gradual de manera que haya un cambio gradual en el índice de refracción desde el centro hacia el exterior. Esto disminuye la dispersión modal a lo largo de las fibras multimodo.

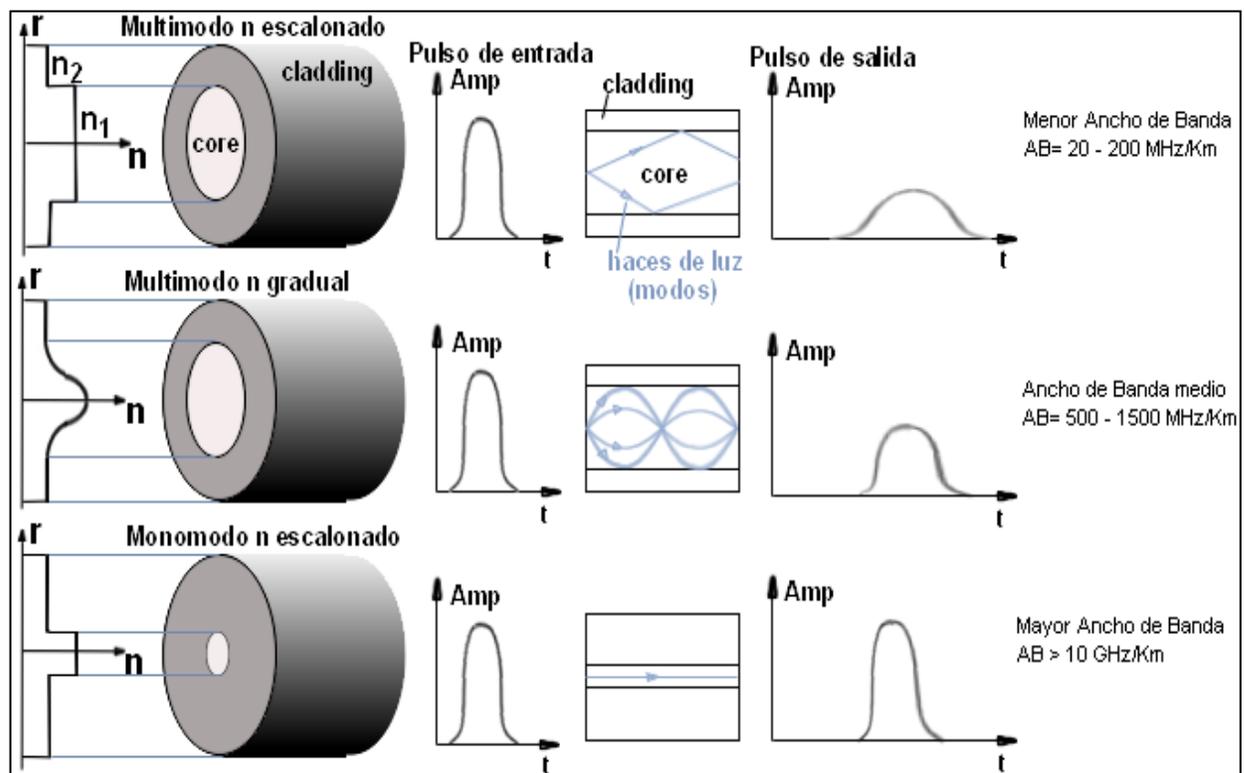


Figura 16. Fibras según distribución del Índice de Refracción.



4.3.13 Fibras Monomodo

Potencialmente, este último tipo de fibra ofrece la mayor capacidad de transporte de información. Tiene una banda de paso del orden de los 100 GHz/km. Los mayores flujos se consiguen con esta fibra, pero también es la más compleja de implantar. Debido al pequeño tamaño del núcleo es muy difícil acoplar la luz a la fibra. Para todas las conexiones y empalmes de la fibra, se deben utilizar componentes de alta precisión.

Esta clase de fibras sólo permite una sola trayectoria para los rayos de luz que se propagan por su núcleo. Esto se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra.

El perfil del índice de refracción es similar al de una fibra multimodo de índice escalón. En las fibras monomodo, la dispersión modal es nula y es por este motivo que las Fibras Ópticas monomodo pueden transmitir simultáneamente mayores volúmenes de información.



4.3.14 Comparación de los tres tipos de Fibras Ópticas

Tipo	Ventajas	Desventajas
Monomodo	Dispersión mínima. En consecuencia, un pulso de luz entrado al cable puede producirse muy exacto en el lado del receptor. Mayor ancho de banda Mayor velocidad de transmisión de la información.	Núcleo muy pequeño, difícil de acoplar la luz. Menor apertura numérica. Fuente de luz y dispositivos de empalmes más costosos.
Multimodo <i>Índice Escalón</i>	Bajos costos y fáciles de fabricar. Fácil acoplamiento de la fuente de emisión diferencias en tiempo de luz. Apertura numérica relativamente grande.	Alta dispersión. Grandes diferencias en tiempo de propagación, debido a que la luz toma muchas trayectorias. Bajo ancho de banda Baja velocidad de transmisión
Multimodo <i>Índice Gradual</i>	No existen ventajas y desventajas sobresalientes. Son de fácil acoplamiento de luz, pero más difíciles que las multimodo escalón. Baja dispersión (menor que la fibra multimodo índice escalón y mayor que las monomodo). Este tipo de fibra se considera una fibra intermedia comparada con los otros tipos.	



4.3.15 Materiales que conforman el núcleo y el revestimiento

Esencialmente, hay tres variedades de Fibras Ópticas disponibles actualmente. Las tres variedades están construidas de vidrio, plástico o una combinación de vidrio y plástico. En la siguiente tabla se ilustran estos tres tipos:

Núcleo	Revestimiento	Categoría
Vidrio	Vidrio	A1 : Índice Gradual A 2 : Índice Escalón
Vidrio	Plástico	A 3
Plástico	Plástico	A 4

Las fibras con núcleo de vidrio y revestimiento de vidrio, llamadas SCS ofrecen las mejores características de propagación y baja atenuación. Por otra parte, mecánicamente son las menos fuertes y las más susceptibles a los incrementos de atenuación cuando se exponen a la radiación. Las fibras monomodo siempre tienen núcleo y revestimiento de vidrio.

Las fibras con núcleo de vidrio y revestimiento plástico, frecuentemente llamadas PCS (Silicio cubierta de plástico). Poseen una atenuación baja y resultan menos afectadas por la radiación que las fibras totalmente de vidrio. Estos cables se utilizan mucho en aplicaciones para fines militares. Las fibras de plástico tienen varias ventajas sobre las fibras de vidrio. En primer lugar son más flexibles y como consecuencia más fuertes que el vidrio. Son fáciles de instalar, pueden resistir mayores presiones, son menos costosas y pesan aproximadamente 60% menos que el vidrio. La desventaja principal de este tipo de fibras es la alta atenuación, con lo cual no propagan la luz tan eficientemente como el vidrio.

Como consecuencia las fibras de plástico se limitan a corridas relativamente cortas, como pueden ser dentro de un mismo edificio o complejo de edificios. Por lo tanto la selección de una fibra para una aplicación específica irá en función de los requisitos concretos del sistema y las contrapartidas que ofrece cada tipo.

Además del vidrio, Silicio fundido (SO₂), en estado puro, el dopado es el elemento principal para la fabricación de fibras de alta calidad, con bajas pérdidas. Se han hecho pruebas



con otros vidrios compuestos por $\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}$ ó $\text{Na}_2\text{O} + \text{B}_2\text{O}_3$ logrando disminuir las elevadas temperaturas del proceso de fabricación necesarias para trabajar el Silicio puro. Pero no se han obtenido buenos resultados ya que las pérdidas de estas fibras son elevadas.

En la actualidad, Bell Laboratories están investigando la posibilidad de usar otra sustancia no Silicio sino Cloruro de Zinc. Los experimentos preliminares han indicado que las fibras hechas de esta sustancia serán hasta 1000 veces más eficientes que el vidrio.

4.3.16 Dimensiones del núcleo y del revestimiento

Las dimensiones del núcleo y del revestimiento, como se explicó anteriormente, están relacionadas con el modo de propagación de la luz dentro del núcleo de la fibra. Por ejemplo, si el diámetro del núcleo de la fibra es hasta 3 veces mayor que la longitud de onda, es una fibra monomodo. Por otra parte si el diámetro es mayor que éste factor es una fibra multimodo.

Las fibras ópticas que se usan en telecomunicaciones se fabrican en cinco grupos principales, teniendo en cuenta los diámetros del núcleo y del revestimiento.

Diámetros Comunes de una fibra óptica y de su protección [μm]

Clase	Núcleo	Revestimiento	Recubrimiento	Tubo ó Protección
I	8 a 10	125	250 ó 500	900 ó 2000
II	50	125	250 ó 500	900 ó 2000
III	62,5	125	250 ó 500	900 ó 2000
IV	85	125	250 ó 500	900 ó 2000
V	100	140	250 ó 500	900 ó 2000

El tamaño de una fibra se especifica en el formato “núcleo/revestimiento”. Por lo tanto, una fibra 62,5/125 significa que la fibra tiene un núcleo de 62,5 mm de diámetro y un revestimiento de 125 mm de diámetro. El recubrimiento envuelve al revestimiento y puede tener



un diámetro de 250 a 500 mm. Para la fabricación de cables se utiliza una protección plástica de 900 mm de diámetro que envuelve el recubrimiento.

I. Núcleo: 8 a 10/125 μm

Una fibra que tenga un tamaño de núcleo de 8 a 10/125 mm. se conoce como una fibra monomodo. Puede propagar la mayor tasa de datos y tiene la atenuación más baja. Se utiliza frecuentemente para aplicaciones de transmisión de datos a alta velocidad o para largas distancias. Debido al pequeño diámetro de su núcleo, el equipamiento óptico utiliza conectores de alta precisión y fuentes láser. Esto implica un aumento de costo del equipamiento.

Es interesante aclarar que el equipamiento de las fibras monomodo a menudo es mucho más caro que el de las fibras multimodo. Sin embargo, un cable de fibras monomodo es más barato que un cable de fibras multimodo.

II. Núcleo: 50/125 μm

La fibra cuyo tamaño del núcleo es 50/125 mm. fue la primera fibra de telecomunicaciones en venderse en grandes cantidades y es bastante corriente hoy en día. Su pequeña apertura numérica y pequeño tamaño del núcleo hacen que la potencia de la fuente acoplada a la fibra sea la menor de todas las fibras multimodo. Sin embargo, de todas las fibras multimodo, es la que tiene mayor ancho de banda potencial.

III. Núcleo: 62,5/125 μm

La fibra de diámetros 62,5/125 mm es, en el presente, la más popular para transmisión multimodo y se está convirtiendo en estándar para muchas aplicaciones. Esta fibra tiene un ancho de banda potencial menor que la anterior, pero es menos susceptible a las pérdidas por microcurvaturas. Su mayor apertura numérica y su mayor diámetro de núcleo proporcionan un acoplamiento de luz ligeramente mayor que la fibra 50/125.



IV. Núcleo: 85/125 μm

Esta es una fibra de medidas europeas y no es popular en Norteamérica. Tiene buena capacidad para acoplar luz y utiliza el revestimiento de diámetro estándar de 125 μm . Esto permite la utilización de conectores y empalmes estándar con esta fibra.

V. Núcleo: 100/140 μm

Es la fibra multimodo de mayor diámetro del núcleo 100/140 μm lo que la convierte en la más fácil de conectar. Es menos sensible a las tolerancias del conector y a la acumulación de suciedad en el mismo. Acopla la mayor cantidad de luz de la fuente, pero tiene un ancho de banda significativamente más bajo que otras de tamaño de núcleos más pequeños. Generalmente se utilizan para tendidos de longitud intermedia y con muchos conectores que tienen requerimientos de baja velocidad de datos. No es muy común y es de compleja fabricación.

Clase	Núcleo	AN	Pérdidas	Ancho de Banda	Longitud de Banda
I	8 a 10	La más pequeña	Las más bajas	El Mayor	1.350-1.550
II	50	Más alta	Más bajas	Más grande	850-1.310
III	62,5	Media	Bajas	Medio	850-1.310
IV	85	Grande	Altas	Más pequeño	850-1.310
V	100	La más grande	Más altas	El más pequeño	850-1.310



4.3.17 Características de transmisión

Las características de transmisión dependen en gran medida de la longitud de onda utilizada para transportar la información. La longitud de onda es la distancia que ocupa un ciclo de una onda electromagnética, depende de la velocidad de la luz y de la frecuencia de la onda. Se enuncia matemáticamente como:

$$\lambda = c / f$$

Donde:

λ = longitud de onda [nm]

c = velocidad de la luz [m/s]

f = frecuencia [Hz]

Se ha descubierto por medio del análisis matemático y también a través de experimentos que en varios materiales existen las llamadas “ventanas ópticas”. Esto significa que a unas determinadas frecuencias, las ondas pasarán a través de estos materiales más fácilmente que a otras frecuencias. En el caso de las Fibras Ópticas, si se modula a determinadas frecuencias los efectos de la dispersión y las pérdidas de material debidas a propagación de ondas tienden a cancelarse unas con otras y crear “ventanas”. Algunos experimentos tienden a demostrar que trabajando en frecuencias aún mayores que las infrarrojas, se puede llegar a conseguir mejores características de transmisión y de esta manera mejorar la calidad de la transmisión.

Existen 4 ventanas (regiones de longitud de onda) que hoy en día se utilizan para transmitir información a través de una fibra.

Wavelength región	Mejor Uso	Fibras Típicas
630 nm	Transmisión de datos corta	Plástico
850 nm	Propósitos generales	Graded-index glass, Pcs, step-index glass
1300 nm	Líneas interurbanas de transmisión	Graded-index silica, single mode silica
1550 nm	Propósitos generales	High – grade silica (single-mode)

En la figura se ilustran las tres ventanas actualmente utilizadas para la transmisión de señales.

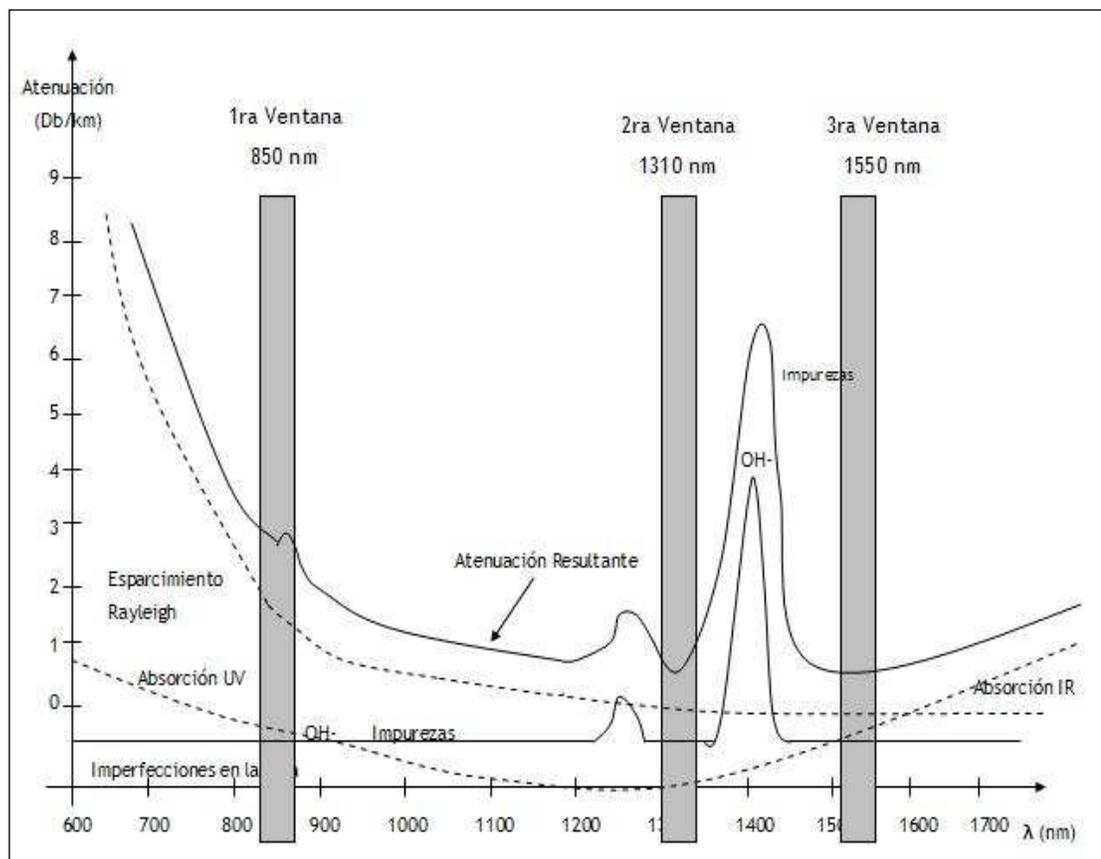


Figura 17.



Junto con la región de longitud de onda, los criterios de transmisión más importantes son:

- La atenuación [dB/Km]
- El ancho de banda [MHz]

La Apertura Numérica puede también ser usada para clasificarlas, especialmente para elegir una determinada fibra para una determinada fuente. La Dispersión es otro criterio alternativo de ancho de banda.

Categoría IEC	Fibra	Apertura Numérica
	Monomodo	0,1
A ₁	Índice Gradual 50/125	0,2
	Índice Gradual 100/140	0,3
A ₂ , A ₃	Índice Escalón	0,2 – 0,5
A ₄	Plásticas	0,5 – 0,66

Una manera de clasificar fácilmente las fibras de acuerdo a la atenuación que coincide con el material, longitud de onda y modo de propagación se ilustra en la figura. El costo de las fibras aumenta con la disminución de la atenuación.



4.3.18 Comparación con otros sistemas convencionales de telecomunicaciones

La Fibra Óptica se ha convertido en un medio popular para muchos requerimientos de comunicaciones. Su atractivo se puede atribuir a las muchas ventajas que presenta sobre otros métodos de transmisión eléctricos convencionales. Este medio de transmisión luminoso tiene también, sin embargo, impedimentos que deberían examinarse antes de proceder a su instalación. La siguiente sección describe algunas de estas consideraciones.

Ventajas

Gran capacidad:

La Fibra Óptica tiene la capacidad de transmitir grandes cantidades de información. Con la tecnología presente se pueden transmitir 60.000 conversaciones simultáneamente con 2 fibras ópticas. Un cable de Fibra Óptica [2 cm de diámetro exterior] puede contener hasta 200 fibras ópticas, lo que incrementaría la capacidad de enlace a 6.000.000 de conversaciones. En comparación con las prestaciones de los cables convencionales, un gran cable multipar puede llevar 2400 conversaciones, un cable coaxial puede llevar 10.000 conversaciones y un enlace de radio por microondas o satélite puede llevar 2.000 conversaciones.

Tamaño y peso:

Un cable de fibra óptica tiene un diámetro mucho más pequeño y es más ligero que un cable de cobre de capacidad similar. Esto lo hace fácil de instalar, especialmente en localizaciones donde ya existen cables (tales como los tubos ascendentes de los edificios) y el espacio es escaso.



Interferencia eléctrica:

La Fibra Óptica no se ve afectada por la interferencia electromagnética ó interferencia de radiofrecuencia y no genera por sí misma interferencia. Puede suministrar un camino para una comunicación limpia en el más hostil de los entornos. Las empresas eléctricas utilizan la Fibra Óptica a lo largo de las líneas de alta tensión para proporcionar una comunicación clara entre sus estaciones de conmutación. La Fibra Óptica está también libre de conversaciones cruzadas.

Aislamiento:

La Fibra Óptica es un dieléctrico. Las fibras de vidrio eliminan la necesidad de corrientes eléctricas para el camino de la comunicación. Un cable de fibra óptica propiamente dieléctrico no contiene conductores eléctricos y puede suministrar un aislamiento eléctrico normal para multitud de aplicaciones. Puede eliminar la interferencia originada por las corrientes a tierra o por condiciones potencialmente peligrosas causadas por descargas eléctricas en las líneas de comunicación, como los rayos o las faltas eléctricas. Es un medio intrínsecamente seguro que se utiliza a menudo donde el aislamiento eléctrico es esencial.

Seguridad:

La Fibra Óptica ofrece un alto grado de seguridad. Una Fibra Óptica no se puede intervenir por medio de mecanismos eléctricos convencionales como conducción superficial o inducción electromagnética, y es muy difícil de pinchar ópticamente. Los rayos luminosos viajan por el centro de la fibra y pocos o ninguno pueden escapar. Incluso si la intervención resultara un éxito, se podría detectar monitorizando la señal óptica recibida al final de la fibra. Las señales de comunicación vía satélite o radio se pueden intervenir fácilmente para su decodificación.

***Fiabilidad y mantenimiento:***

La fibra óptica tiene también una larga vida de servicio; estimada en más de 30 años para algunos cables. El mantenimiento que se requiere para un sistema de fibra óptica es menor que el requerido para un sistema convencional, debido a que se requieren pocos repetidores electrónicos en un enlace de comunicaciones; no hay cobre que se puede corroer en el cable y que pueda causar la pérdida de señales o señales intermitentes; y el cable no se ve afectado por cortocircuitos, sobre tensiones o electricidad estática.

Versatilidad:

Los sistemas de comunicaciones por Fibra Óptica son los adecuados para la mayoría de los formatos de comunicaciones de datos, voz y video. Estos sistemas son adecuados para RS 232, RS 422, V.35, ETHERNET, ARCNET, FDDI, T1, T2, T3, SONET, 2/4 cable de voz, señas E&M, video compuesto y mucho más.

Expansión:

Los sistemas de Fibra Óptica bien diseñados se pueden expandir fácilmente. Un sistema diseñado para una transmisión de datos a baja velocidad, por ejemplo, T1 (1,544 Mbps), se puede transformar en un sistema de velocidad más alta, OC-12 (622 Mbps), cambiando la electrónica. El cable de Fibra Óptica utilizado puede ser el mismo.

Regeneración de la señal:

La tecnología presente puede suministrar comunicaciones por Fibra Óptica más allá de los 70 km. antes de que se requiera regenerar la señal, la cual puede extenderse a 150 km. usando amplificadores láser. Futuras tecnologías podrán extender esta distancia a 200 km. y posiblemente 1000 km. El ahorro en el costo del equipamiento del repetidor intermedio, así como su mantenimiento, puede ser sustancial. Los sistemas de cable eléctrico convencionales pueden, en contraste, requerir repetidores cada pocos km.

Desventajas



Conversión electro-óptica:

Antes de conectar una señal eléctrica de comunicación a una Fibra Óptica, la señal debe convertirse al espectro luminoso [850, 1310 o 1550 nanómetros (nm)]. Esto se realiza por medios electrónicos en el extremo del transmisor, el cual da un formato propio a la señal de comunicaciones y la convierte en una señal óptica usando un LED o un láser de estado sólido. A continuación, esta señal óptica se propaga por la Fibra Óptica. En el extremo del receptor de la Fibra Óptica, la señal óptica se debe convertir otra vez en señal eléctrica antes de poder ser utilizada. El coste de conversión asociado a la electrónica debería ser considerado en todas las aplicaciones.

Caminos Homogéneos:

Se necesita un camino físico recto para el cable de Fibra Óptica. El cable se puede enterrar directamente, situar en tubos o disponer en cables aéreos a lo largo de caminos homogéneos. Esto puede requerir la compra o alquiler de la propiedad. Algunos derechos sobre el camino pueden ser imposibles de adquirir. Para localizaciones como terrenos montañosos o algunos entornos urbanos pueden ser más adecuados otros métodos de comunicación sin hilos.

Instalación especial:

Debido a que la Fibra Óptica es predominantemente vidrio de Silicio, son necesarias técnicas especiales para la ingeniería e instalación de los enlaces. Ya no se aplican los métodos convencionales de instalación de cables de hilos como, por ejemplo, sujeción o crimpado, soldadura. También se requiere un equipamiento adecuado para probar y poner en servicio las Fibras Ópticas. Los técnicos deben ser entrenados para la instalación y puesta en servicio de los cables de Fibra Óptica.



Reparación:

Un cable de Fibra Óptica que ha resultado dañado no es fácil de reparar. Los procedimientos de reparación requieren un equipo de técnicos con mucha destreza y habilidad en el manejo del equipamiento. En algunas situaciones puede ser necesario reparar el cable entero. Este problema puede ser aún más complicado si hay un gran número de usuarios que cuentan con dicho servicio. Es importante, por ello, el diseño de un sistema propio con roturas físicamente diversas, que permita afrontar tales contingencias. Aunque pueda haber muchas ventajas que favorezcan una instalación de Fibra Óptica. Deberían ser analizados todos los costos de operación e implementación de un servicio de Fibra Óptica.

Corte y pelado del cable:

Cuando se corta y se pela un cable de Fibra Óptica, el personal debe llevar guantes y gafas de seguridad apropiadas. Herramientas tales como cortadoras, peladoras, etc., pueden ser muy afiladas y causar daños. Los pequeños trozos cortados de fibra pueden volar fácilmente durante los procedimientos de corte, marcado y rayado.

Trozos de Fibra Óptica:

Los trozos de fibra que resultan a partir de los procesos de pelado o rayado deberán guardarse inmediatamente en un contenedor cerrado y etiquetado como “residuos de fibra”. Los trozos de fibras de vidrio cortados están muy afilados y pueden dañar fácilmente el ojo o pinchar la piel. Las fibras deberán ser manejadas únicamente con pinzas.

Luz de láser:

La luz de una Fibra Óptica puede dañar seriamente al ojo incluso si la luz es invisible. Antes de trabajar con cualquier Fibra Óptica deben apagarse todas las fuentes de luz. Nunca se debe mirar al extremo de una fibra, ya que podría estar acoplada a un láser. Hay que cerrar con llave las fuentes láser y etiquetarlas con “no encender” para prevenir accidentes.



Los daños derivados de observar la luz emitida por un láser son irreparables (producen ceguera). El Instituto de la Sociedad Americana de Normas ANSI (American National Society Institute) ha realizado una clasificación de los láseres en cuatro clases, que están catalogados de acuerdo al daño que producen a la vista. Clase 1, se considera que no dañan la vista ó el ojo. Clase 2, emisores con baja potencia dentro del espectro visible de luz que pueden ser observados en forma directa solamente bajo condiciones de cuidado controladas. Clase 3, solamente pueden ser observadas en condiciones muy controladas y con medidas de seguridad en extremo rigurosas Clase 4, producen daños tanto a la vista como a la piel cuando son expuestas a su radiación. Es necesario hacer notar que bajo las condiciones normales de operación la radiación óptica no es accesible al usuario. Los sistemas de comunicación basados en Fibra Óptica normalmente operan con láseres de clase 1. Solamente cuando se realizan operaciones de servicio e instalación de partes el personal que las realiza se expone a las radiaciones ópticas Ver directamente los emisores láser con lentes de aumento incrementan la cantidad de energía que impacta los ojos. Se debe tener particular cuidado para asegurarse que los equipos que tienen láseres activos instalados sean apagados ó desconectados sobre todo antes de realizar inspecciones ó verificaciones de los conectores instalados en ellos.

CAPITULO V. DWDM

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

La explosión de la demanda de ancho de banda de las redes es debida principalmente al tráfico de datos, específicamente Internet. Los principales proveedores de servicios dicen que doblan el ancho de banda de sus “backbones” cada 6 a 9 meses. Esto es principalmente la respuesta al crecimiento del 300 % anual del tráfico de Internet, mientras que el tráfico de voz tradicional tiene un crecimiento del orden de un 13% anual.

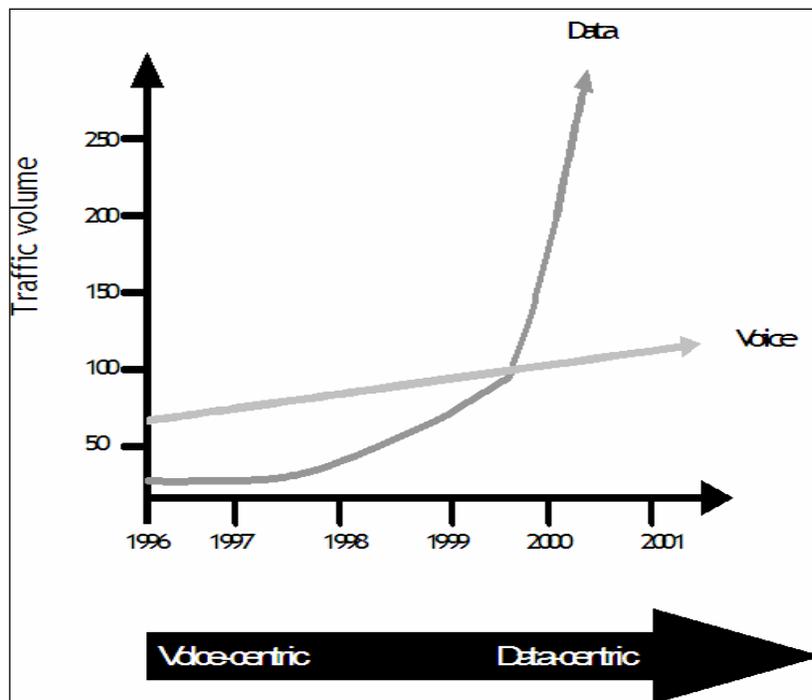


Figura 18. Crecimiento explosivo de Internet.



Al mismo tiempo que aumenta el volumen del tráfico de la red, el propio tráfico es más complejo. El tráfico en una backbone se puede tener que basar en circuitos (voz y fax con TDM), en paquetes (IP) o en celdas (ATM y Frame Relay). Además hay una cantidad creciente de datos sensibles al retardo, como la voz sobre IP y el streaming video. Como respuesta al explosivo crecimiento de la demanda del ancho de banda, junto con la emergencia del IP como base de todos los servicios, los proveedores de servicios de larga distancia se están alejando de los sistemas basados en TDM, que fueron optimizados para voz, pero que ahora son costosos e ineficientes. Mientras tanto las redes metropolitanas también están experimentando el impacto de una creciente congestión de forma que los requerimientos cambian tan rápidamente que sus equipos se hacen obsoletos en poco tiempo.

Mientras que la demanda de ancho de banda viene de las nuevas aplicaciones de datos, del uso de Internet y del crecimiento de las comunicaciones inalámbricas, dos factores se añaden al juego: la competencia y la disponibilidad de la red. El sector de las telecomunicaciones, durante mucho tiempo beneficiario de las regulaciones gubernamentales, es hoy una industria altamente competitiva. Primero la competencia se introdujo en el mercado de larga distancia en USA en 1984 y en 1996, la Telecommunications Reform Act ha hecho que aparezcan nuevos operadores de banda ancha. Estos nuevos operadores se están esforzando para resolver la demanda creciente de ancho de banda para los nuevos servicios y capacidades.

Hay dos efectos principales en la industria en cuanto a la competencia:

- Se crean mejores servicios por parte de los nuevos operadores compitiendo con los existentes. En el mercado metropolitano por ejemplo hay servicios de banda ancha inalámbricos y de DSL para usuarios domésticos y pequeñas y medianas empresas, líneas privadas de alta velocidad y servicios VPN para las empresas y servicios de LAN transparentes a los usuarios de las redes empresariales.
- Los nuevos carriers crean nuevas infraestructuras de forma que no tienen que alquilarlas a los carriers existentes. Con esta estrategia hay más control sobre el aprovisionamiento y su fiabilidad.



Dado que los servicios de telecomunicaciones y datos son cada vez más críticos para los negocios, se ha requerido a los proveedores de servicios que sus redes sean tolerantes a fallos. Para cumplir este requerimiento, los proveedores han tenido que construir rutas de backup, a menudo con redundancia simple 1:1 con configuraciones en anillo o punto a punto. Para lograr el nivel de fiabilidad requerido se necesita reservar ancho de banda y capacidad para cuando ocurra el fallo. Esto puede doblar la necesidad de ancho de banda en las ya colapsadas redes.

5.1 Opciones para aumentar el ancho de banda

Las dos opciones posibles son: instalar más fibras y aumentar el ancho de banda de la fibra existente. El tendido de más fibra es la solución tradicional para los carriers ampliando sus redes. Sin embargo esta solución es cara. Se estima que es del orden de US\$ 70.000 por kilómetro, en su mayor parte son los costos de los permisos y de su tendido, ya que el costo de la fibra es pequeña comparada con los costos mencionados. El tendido de nueva fibra solo tiene sentido si se quiere ampliar la base instalada.

Aumentar la capacidad efectiva de la fibra existente, se puede hacer de dos maneras:

- aumentar la velocidad de los sistemas existentes
- aumentar el número de longitudes de onda por fibra.



5.2 Opciones para aumento de la velocidad

Con TDM la velocidad de transmisión de los datos es de 2,5 Gbps (OC-48) y se puede llegar hasta los 10 Gbps (OC- 192); los últimos avances llegan hasta 40 Gbps (OC- 768). Los circuitos electrónicos que lo hacen posible, son complejos, caros y de alto mantenimiento. Además hay cuestiones técnicas significativas que pueden restringir la aplicabilidad de esta propuesta. La transmisión a OC-192 con fibra monomodo, por ejemplo, está afectada 16 veces más por dispersión cromática que la velocidad siguiente OC-48. La mayor potencia de transmisión requerida para velocidades más altas también introduce efectos no lineales que pueden afectar a la calidad de la forma de onda. Finalmente la dispersión por polarización es otra cuestión que limita la distancia a la que puede viajar un impulso de luz sin degradación. Estas cuestiones se exponen más adelante.

5.3 Aumento de Longitudes de Onda

En esta propuesta, se tiene en consideración el hecho de que en una fibra se combinan muchas longitudes de onda. Usando la tecnología WDM, se pueden multiplexar simultáneamente varias longitudes de onda, colores de luz, desde 2,5 hasta 40 Gbps en una sola fibra. Sin tener que instalar nuevas fibras, la capacidad efectiva de las existentes se puede incrementar con un factor de 16 ó 32. Sistemas con 128 y 160 longitudes de onda existen en la actualidad, con posibilidades de más a corto plazo. Sus límites son desconocidos en la actualidad.

5.4 TDM

El TDM (Multiplexación por División en el Tiempo) se inventó como una forma de maximizar la cantidad de tráfico de voz que se podía transportar en un medio. En las redes telefónicas, antes de la multiplexación, cada llamada telefónica necesitaba su propia línea física. Esta solución es cara y no es escalable. Con la multiplexación se podía enviar más de una llamada por una línea física.

El TDM se puede explicar en base a la analogía con una autopista. Para transportar todo el tráfico de cuatro pueblos a una ciudad, se puede hacer enviándolo por un sola carril, y accediendo el tráfico de cada pueblo de forma sincronizada a dicho carril. Así si cada pueblo

pone un coche en la autopista cada 4 segundos, en la autopista entraría un coche cada segundo. Como la velocidad de los coches es sincronizada, no hay colisiones. En el destino los coches pueden dejar la autopista e ir a los pueblos por el mismo mecanismo de sincronización pero al revés.

Este es el principio usado para el TDM síncrono cuando se envían bits por un enlace. TDM aumenta la capacidad de transmisión de un enlace dividiendo el tiempo en intervalos más pequeños de forma que los bits de las múltiples entradas se puedan transportar por el enlace aumentando el número de bits transmitidos por segundo.

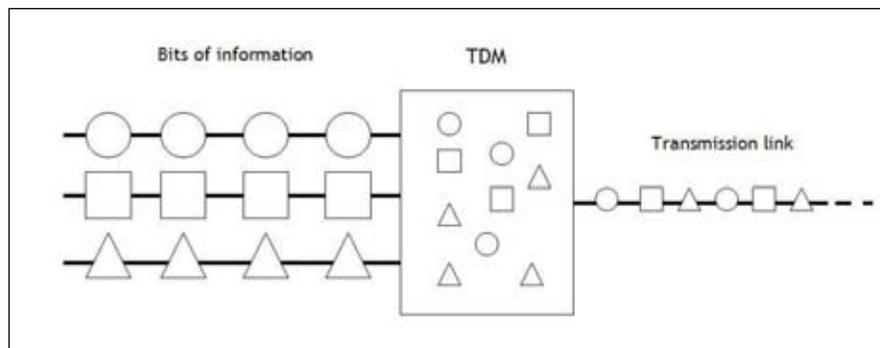


Figura 19.

Con TDM, las entradas utilizan el método round-robin para su intercalado en el enlace. Aunque el método es bueno, también es ineficiente en cuanto hay espacios de tiempo en los cuales alguno de los canales no tenga datos a transmitir. Este problema se mitiga con el TDM estadístico que es usado por el ATM (Asynchronous Transfer Mode). Aunque ATM ofrece una mejor utilización del ancho de banda, hay límites prácticos en cuanto a la velocidad que se puede alcanzar debido a la electrónica necesaria para la fragmentación y el reensamblaje (SAR) de las celdas ATM que componen los paquetes de datos.

5.5 DWDM (*Wavelength Division Multiplexing*)

WDM aumenta la capacidad de transporte del medio físico (fibra) usando un método completamente diferente del TDM. WDM asigna las señales ópticas entrantes a longitudes de onda específicas dentro de una determinada banda. Esta multiplexación se parece mucho a las emisiones radiofónicas en que cada una de ellas emplea una longitud de onda específica sin interferir con las demás. Dado que cada canal funciona a una frecuencia distinta, se pueden seleccionar con un sintonizador. Otra manera de ver el WDM es que cada canal funciona con un color de luz distinto; varios canales hacen un arco iris.

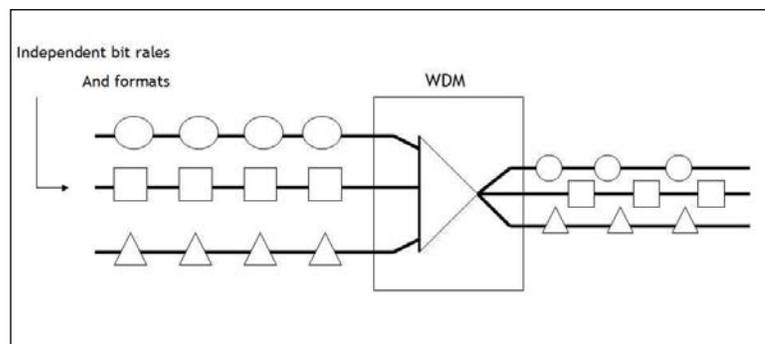


Figura 20

Se usa el término longitud de onda en vez de frecuencia para evitar confusiones, también se usa en vez de longitud de onda los términos lambda y canal.

En un sistema WDM, cada longitud de onda es enviada a la fibra y las señales son desmultiplexadas en la recepción. Como el TDM, la capacidad resultante es una agregación de las señales de entrada pero WDM transporta cada señal de forma independiente de las demás señales. Esto significa que cada canal tiene su propio ancho de banda dedicado; todas las señales llegan al mismo tiempo en vez de ser fragmentadas y transportadas en ranuras de tiempo. La diferencia entre WDM y DWDM es fundamentalmente de un grado. DWDM espacia las longitudes de onda menos que el WDM, por tanto tiene una capacidad global mayor. Los límites de este espaciado no son precisamente conocidos y es probable no se alcance su límite. A mediados del año 2000 se han conseguido hasta 128 longitudes de onda por fibra. DWDM tiene otras características buenas que se exponen en los capítulos siguientes. Estas incluyen la

posibilidad de amplificar todas las longitudes de onda a la vez sin convertirlas a señales eléctricas

y la posibilidad de transportar señales de diferentes velocidades y tipos simultáneamente y transparentemente sobre fibra (independientemente del protocolo y su velocidad).

El tipo de fibra que se emplea es monomodo, ya que la multimodo no permite distinguir entre más de 3 longitudes de onda.

5.6 WDM y TDM

SONET TDM toma las señales síncronas y asíncronas y las multiplexa a una velocidad de transmisión más alta con una sola longitud de onda sobre fibra. Las señales de entrada pueden tener que ser convertidas de eléctricas a ópticas o de ópticas a eléctricas y vuelta a ópticas antes de ser multiplexadas. WDM toma varias señales ópticas, las mapea en longitudes de onda individuales y multiplexa las longitudes de onda en una fibra. Otra diferencia fundamental entre las dos tecnologías es que WDM puede transportar múltiples protocolos sin un formato común de la señal, mientras que SONET no puede hacerlo.

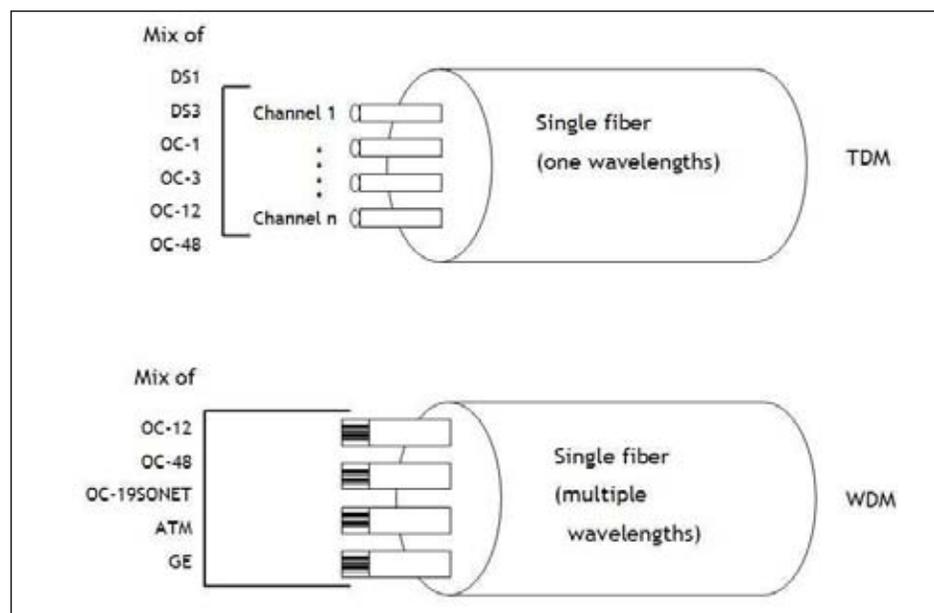


Figura 21.



5.7 Requerimiento de Ancho de Banda

El ancho de banda, el punto principal en el mercado de la larga distancia, también lo es en las redes metropolitanas, las redes de acceso y las grandes redes empresariales. En estos tipos de redes, a medida que se implementan nuevas aplicaciones, se necesita un mayor ancho de banda, incluidas las SAN, que posibilitan trabajar sin servidores, la consolidación de los centros de datos y el procesamiento de las copias de seguridad en tiempo real.

Otra razón por la cual hay un aumento importante de demanda de ancho de banda es como consecuencia de la conexión de los usuarios finales a los POPs locales, ya sea mediante línea telefónica, DSL, redes inalámbricas, etc. Típicamente estas conexiones se agregan y transportan sobre anillos SONET que conectan al POP local que sirve como de gateway a Internet para larga distancia. Ahora la creciente demanda de servicios de alta velocidad están llevando a los proveedores de servicios a transformar el POP en un centro de servicio dinámico de entrega. Como resultado de esto, ahora un usuario dispone de muchos servicios de alta velocidad directamente desde el POP, sin necesidad de tener una conexión directa a Internet.

5.8 SONET con DWDM

Usando DWDM como transporte para TDM, se pueden salvar las inversiones en los equipos SONET actuales, ya que no necesitan ser reemplazadas. A menudo las nuevas implementaciones pueden eliminar equipamiento existente. Por ejemplo, el equipo de multiplexación SONET no es necesario en el caso de los conmutadores ATM y/o de paquetes, porque se pueden conectar directamente al equipo DWDM, a las habituales interfaces OC-48. Adicionalmente, las actualizaciones no tienen que utilizar interfaces a velocidades establecidas, como con SONET, donde la agregación de los afluentes está bloqueado a unos valores específicos.

Las señales ópticas se atenúan a medida que viajan a través de la fibra y periódicamente deben ser regeneradas en el corazón de las redes. En las redes ópticas SONET/SDH anteriores a la introducción del DWDM, cada fibra transportando una señal óptica, típicamente a 2,5 Gbps, requería un regenerador eléctrico cada 60 a 100 Km. A medida que se añaden fibras, el costo de estos regeneradores aumenta, no solo por el coste del propio equipo sino también de las estructuras en que se deben albergar.

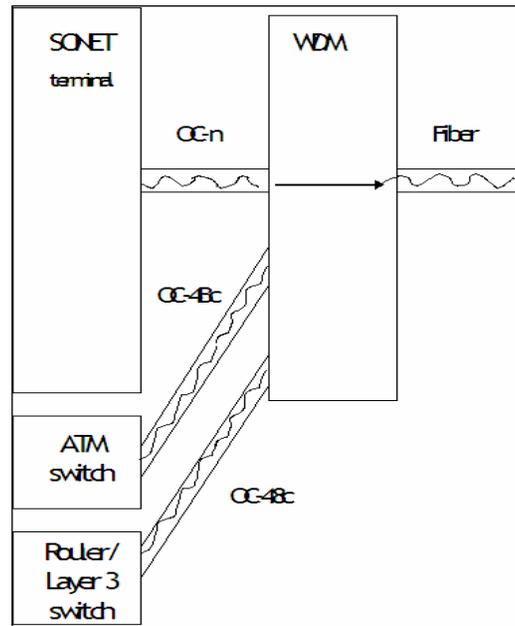


Figura 22.

Mientras que los amplificadores ópticos se podían usar para aumentar las distancias en SONET, es necesario un amplificador para cada fibra. En DWDM, como se transportan varias señales en un sola fibra, se necesita menos equipamiento y no se necesitan los regeneradores como el caso de SONET.

Transmisión Convencional TDM 10 Gbps

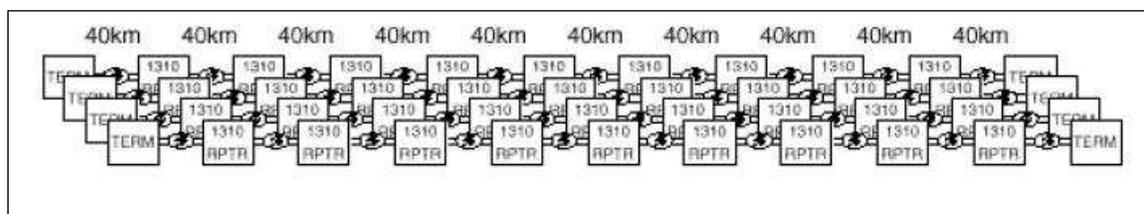


Figura 23.

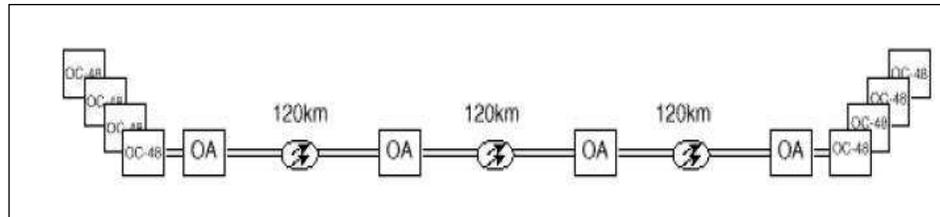


Figura 24. *Transmisión DWDM 10 Gbps*

Un solo amplificador óptico puede amplificar todos los canales de una fibra DWDM sin desmultiplexación y ni procesamiento individualizado, con el costo de un simple regenerador. El amplificador óptico meramente amplifica las señales, no las reformatea o ajusta y las retransmite como hace un regenerador, así las señales no se deben regenerar de manera periódica. Pero dependiendo del diseño del sistema, ahora las señales se pueden transmitir desde 600 a miles de kilómetros sin regeneración. Además de reducir drásticamente el costo de los regeneradores, los sistemas DWDM simplifican en mucho la expansión de la capacidad de la red. El único requerimiento es instalar interfaces adicionales o de mayor velocidad en los sistemas DWDM en el extremo de la fibra. En algunos casos solo será necesario aumentar el número de longitudes de onda de la fibra en las interfaces existentes. Los amplificadores ópticos actuales amplifican el nuevo canal sin regeneradores adicionales. En el caso de añadir interfaces de mayor velocidad, se debe considerar el tipo de fibra.

Aunque los amplificadores son beneficiosos en el transporte a larga distancia, a menudo son innecesarios en las redes de área local. Donde las distancias entre los elementos de la red son relativamente cortas, la fuerza y la integridad de la señal pueden ser adecuadas sin amplificación. Pero a medida que las Redes Locales se parecen más a la larga distancia, los amplificadores son más útiles.



5.9 Tecnología DWDM

La introducción de nuevos servicios de valor añadido tales como vídeo bajo demanda o aplicaciones multimedia requiere de una gran cantidad de ancho de banda para satisfacer las necesidades de los usuarios. Las soluciones que tienen los proveedores de servicio para satisfacer este aumento de la demanda de tráfico son diversas. Por una parte pueden instalar más fibra, aunque ésta es una solución cara y en algunos casos inviable. Otra solución consiste en utilizar técnicas de multiplexación por división en el tiempo (TDM), donde el aumento de capacidad se consigue por medio de ranuras de tiempo más pequeñas que permiten transmitir mayor cantidad de bits (datos) por segundo. Esta tecnología ha sido utilizada en las redes de transporte basadas en los estándares SDH/SONET. No obstante, el principal problema al que se enfrentan los proveedores de servicio es el relacionado con el salto a una capacidad mayor. Basándose en la jerarquía SDH, la capacidad inmediatamente superior a los 10 Gbit/s son los 40 Gbit/s, por lo que se obtiene más capacidad de la que pudiera necesitarse en un principio, con el correspondiente desembolso económico pues hay que actualizar todos los transmisores y receptores del sistema.

Finalmente, la tercera alternativa consiste en DWDM, que permite aumentar de una forma económica la capacidad de transporte de las redes existentes. Por medio de multiplexores, DWDM combina multitud de canales ópticos sobre una misma fibra, de tal modo que pueden ser amplificados y transmitidos simultáneamente. Cada uno de estos canales, a distinta longitud de onda, puede transmitir señales de diferentes velocidades y formatos: SDH/SONET, IP, ATM, etc. Es decir, DWDM puede multiplexar varias señales TDM sobre la misma fibra. Las redes DWDM futuras se espera que transporten 80 canales OC-48/STM-16 de 2,5 Gbit/s (un total de 200 Gbit/s), ó 40 canales OC-192/STM-64 de 10 Gbit/s (un total de 400 Gbit/s), la capacidad equivalente a unos 90.000 volúmenes de enciclopedia por segundo. A diferencia del sistema WDM convencional, en este caso todas las portadoras ópticas viajan por la fibra con separaciones inferiores a 1 nm.



La realidad de la transmisión de la fibra óptica ha sido experimentalmente mejorada desde el siglo XIX, pero la tecnología empezó a avanzar rápidamente en la segunda mitad del siglo XX con el invento del fiberoSCOPIO, los científicos encontraron aplicaciones en la industria y la medicina, por ejemplo en la cirugía la paroscópica. Después de que fuese posible la viabilidad de la transmisión de la luz sobre fibra, el paso siguiente en el desarrollo de la fibra óptica fue encontrar una fuente de luz que fuera suficientemente potente y de espectro estrecho. Los LED (Light-Emitting Diode) y los diodos láser fueron capaces de cumplir estos requisitos. Los láseres empezaron en la década de los 1960, culminando con los láseres semiconductores que son los que se usan mayoritariamente en la actualidad.

5.9.1 Desarrollo de DWDM

La luz tiene una capacidad de transportar información 10.000 veces mayor que las frecuencias más altas de radio. Ventajas adicionales de la fibra sobre el cobre incluyen la posibilidad de transportar señales a grandes distancias, bajas tasas de error, inmunidad a las interferencias eléctricas, seguridad y peso de la luz. Conscientes de estas características, los investigadores de mediados de la década de los 1960 propusieron que la fibra óptica pudiera ser un medio de transmisión posible. Había sin embargo un obstáculo, era la pérdida de la fuerza de la señal o atenuación, visto el cristal con que se trabajaba. Finalmente en 1970 Corning produjo las primeras fibras para comunicaciones. Con una atenuación menor a 20 dB/Km., esta fibra de cristal purificada superaba el umbral para hacer de las fibras ópticas una tecnología viable.

Al principio la innovación progresó lentamente, debido a la existencia de los monopolios privados y gubernamentales que eran los propietarios de la telefonía. Primero AT&T estandarizó la transmisión a velocidad DS-3 (45 Mbps) para fibras multimodo. Poco después la fibra monomodo se mostró capaz de transmitir a velocidades 10 veces superior a la anterior y hasta distancias de 32 Km. A principios de la década del 1980 MCI, seguido por Sprint, adoptó fibras monomodo para la red a larga distancia en Estados Unidos.

Los posteriores desarrollos de fibra óptica están cerca del uso de regiones específicas del espectro óptico donde la atenuación es baja. Estas regiones, llamadas ventanas, están entre áreas de alta absorción. Los primeros sistemas desarrollados operan alrededor de los 850 nm, la

primera ventana en la fibra óptica basada en silicio. Una segunda ventana (S band), a 1310 nm, era mejor en cuanto tenía menor atenuación, seguida por una tercera ventana (C band) a 1550 nm con una pérdida óptica aún menor. Hoy una cuarta ventana (L band) cercana a 1625 nm está en fase de desarrollo.

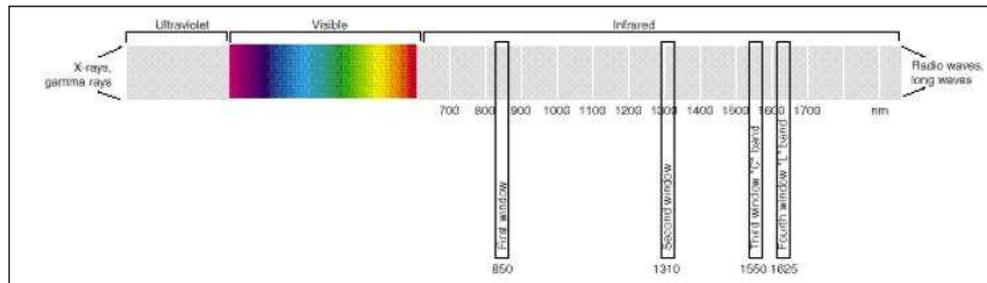


Figura 25.

WDM empezó a finales de la década de 1980 usando dos longitudes de onda muy espaciadas, 1310 nm y 1550 nm, a veces llamado WDM de banda ancha. Una de las fibras se usa para transmitir en un sentido y la otra en el sentido contrario. Es la disposición más eficiente y la que se encuentra normalmente en los sistemas DWDM.

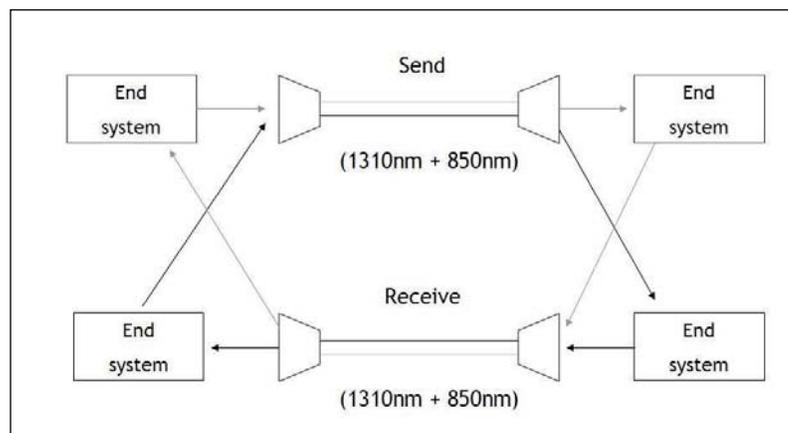


Figura 26.

A principios de la década de 1990 vino la segunda generación de WDM, a veces llamada WDM de banda estrecha en que se usaban de 2 a 8 canales. Ahora estos canales están espaciados en un intervalo de unos 400 Ghz en la ventana de 1550 nm. A mediados de la década de 1990 los sistemas DWDM que estaban emergiendo consistían de 16 a 40 canales y un espaciado de 100 a 200 Ghz. A finales de la década de 1990 los sistemas DWDM han evolucionado hasta el punto de que son capaces de tener de 64 a 160 canales en paralelo y espaciados cada 50 o 25 Ghz.

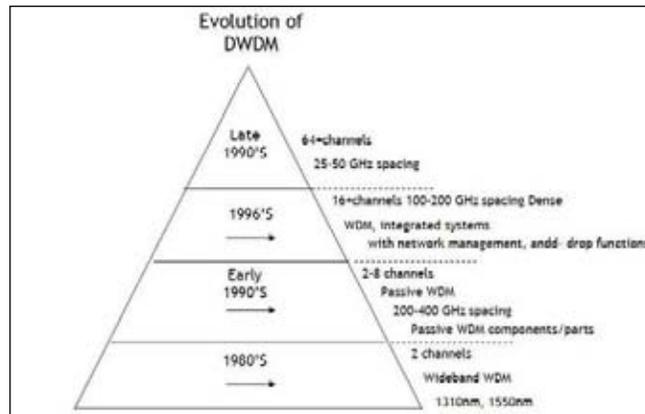


Figura 27.

El incremento de la densidad de los canales de la tecnología DWDM ha tenido un dramático impacto en la capacidad de transporte de la fibra, En 1995 cuando los primeros sistemas de 10 Gbps aparecieron, la tasa de incremento en capacidad fue de un múltiplo lineal de cuatro veces cada cuatro años en cuatro años.

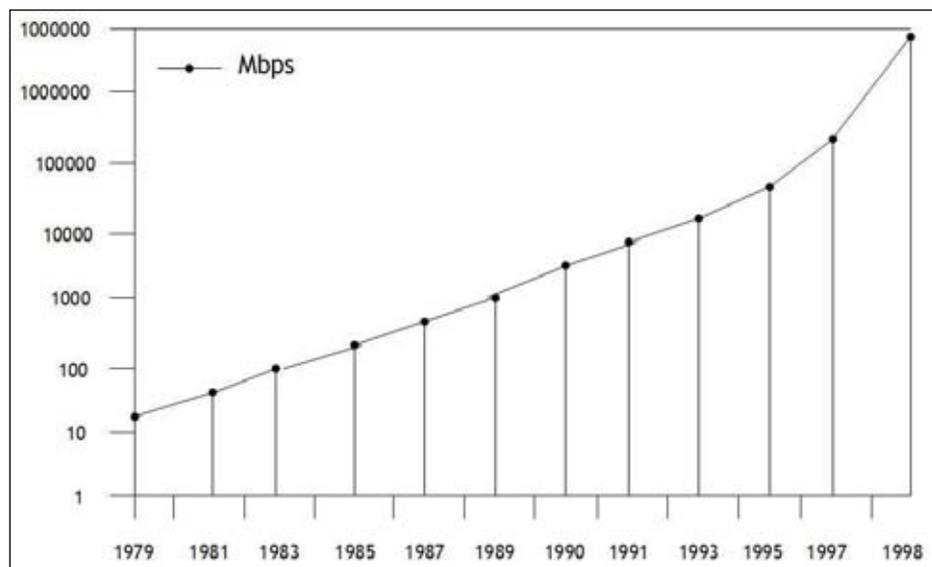


Figura 28.

Los dispositivos WDM permiten incrementar enormemente la capacidad de los sistemas de transmisión actuales sin requerir de desarrollos tecnológicos significativos y sin alterar las arquitecturas de red implantadas, es decir, permiten una evolución flexible y económica de las



presentes redes, respondiendo a la demanda de mayor ancho de banda por parte de los nuevos servicios de telecomunicaciones avanzadas.

La primera técnica de multiplexación óptica fue SDM, que consiste en la implementación de varios enlaces SDH entre puntos terminales que cubren un tramo en común, en otras palabras, consiste en la mera disposición en paralelo de fibras ópticas, con el fin de incrementar la capacidad del enlace, transportando la misma longitud de onda entre el origen y el destino. Así WDM puede verse como una FDM óptica. La técnica FDM (*Frequency Multiplexing o Multiplexación por División de Frecuencia*) transporta cada señal en una frecuencia subportadora que puede ser filtrada electrónicamente por el receptor.

Tras evolucionar las comunicaciones analógicas a las digitales, y de PDH a SDH, ahora se está pasando de SDH a WDM y DWDM. Así, considerando la capacidad de las diferentes tecnologías como la tasa de transmisión de bits utilizada y el factor de multiplexación ofrecido por los nodos de conmutación y multiplexación, se puede notar una clara evolución

- Al comienzo la transmisión digital soportaba 2 Mbps (multiplexores básicos o primer nivel de multiplexación), donde cada una de las señales tributarias era de 64 Kbps que conforman la tasa de bit de las redes telefónicas tradicionales.
- Luego se mejoró la eficiencia en la transmisión elevando las tasas de bits, para llegar a 140 Mbps con tasas intermedias como por ejemplo: 8 Mbps o 34 Mbps. Esta tecnología se llama PDH.
- Después apareció SDH, que permite un factor de multiplexación de 150 Mbps y una capacidad de 10 Gbps. Aquí también son posibles tasas intermedias.
- Una nueva etapa consiste en el uso generalizado de WDM, que debido a la rápida evolución de sus equipos aun no ha sido totalmente estandarizado, siendo esta una clara desventaja frente a SDH. Ahora se puede alcanzar una capacidad de 320 Gbps (32 longitudes de ondas), con un factor de multiplexación de 10 Gbps.

- El paso siguiente se dará cuando se incremente el factor de multiplexación a 320 Gbps con una capacidad total de 10 Tbps. Quizás esto sea logrado por la combinación de WDM con el principio de TDM en el dominio óptico.

5.9.2 Especificaciones de DWDM

En su núcleo, DWDM consta de un pequeño número de funciones de nivel físico. Cada canal funciona con una longitud de onda específica. La longitud de onda se expresa (usualmente en nanómetros) como un punto absoluto en el espectro electromagnético. La luz efectiva a una determinada longitud de onda se confina estrechamente alrededor de su longitud de onda central.

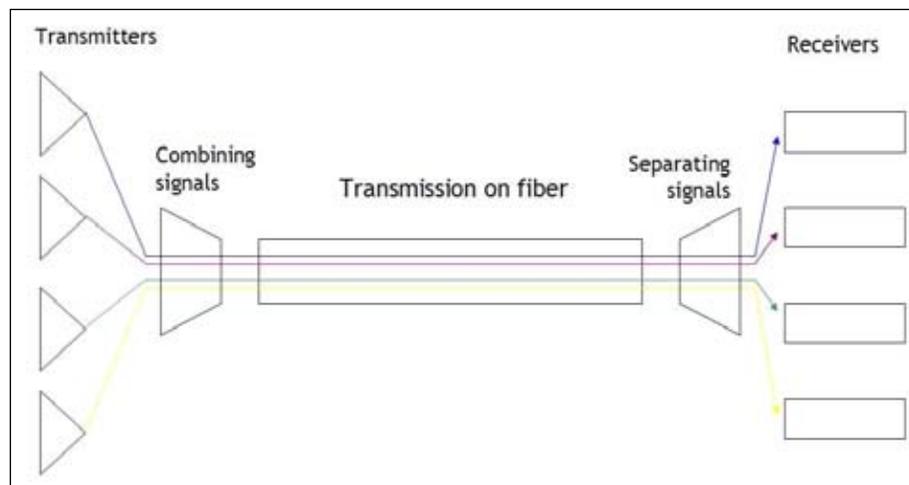


Figura 29.

El sistema realiza las siguientes funciones principales:

- **Generación de la señal.** La fuente, un láser de estado sólido, debe suministrar una luz estable dentro de un ancho de banda específico y estrecho, que transporta los datos digitales modulados como una señal analógica.



- **Combinación de señales.** Los modernos sistemas DWDM emplean multiplexadores para combinar las señales. Hay alguna pérdida inherente asociada a la multiplexación y desmultiplexación. Esta pérdida depende del número de canales pero se puede mitigar con amplificadores ópticos que amplifican todas las longitudes de onda a la vez sin conversión eléctrica.
- **Transmisión de señales.** Los efectos de diafonía y la degradación o pérdida de la señal óptica deben ser tenidos en consideración en la transmisión por fibra óptica. Estos efectos pueden ser minimizados mediante el control de las variables tales como el espaciado entre canales, la tolerancia de la longitud de onda, y los niveles de potencia del láser. En un enlace de la transmisión, se puede necesitar una amplificación de la señal.
- **Separación de las señales recibidas.** En el lado del receptor, las señales multiplexadas deben ser separadas. Aunque esta tarea parece ser simplemente el opuesto a la combinación de señales, en la actualidad es técnicamente más difícil.
- **Recepción de señales.** La señal demultiplexada es recibida por un fotodetector. Además de estas funciones, un sistema DWDM también debe estar equipado con interfaces en el lado cliente para recibir la señal de entrada. Esta función la realizan los transponders. En el lado DWDM son las interfaces a la fibra óptica que enlazan a los sistemas DWDM.

Las redes ópticas a diferencia de las SONET/SDH no dependen del procesamiento eléctrico de datos. Así su desarrollo estará más ligado a la óptica que a la electrónica. En su forma anterior, como se ha descrito previamente, el WDM era capaz de transportar señales sobre dos longitudes de onda espaciadas y de ancho espectro y a una distancia relativamente corta. Para moverse más allá de este estado inicial, WDM necesitó mejoras de las tecnologías existentes e inventar nuevas tecnologías. Las mejoras en filtros ópticos y láseres de banda estrecha permiten al DWDM combinar más de dos longitudes de onda en una fibra. La invención de un amplificador óptico de ganancia plana acoplado a la línea de fibra amplificando la señal óptica, incrementó dramáticamente la viabilidad de los sistemas DWDM extendiendo de forma importante la distancia máxima. Otras tecnologías que han sido importantes en el desarrollo del



DWDM incluyen la mejora de la fibra óptica con menor pérdida y mejores características de transmisión óptica, EDFAs, y dispositivos tales como las rejillas de fibra Bragg usadas en los multiplexadores ópticos add/drop.

DWDM es una tecnología a utilizar en el corazón de una red de transporte óptico. Los componentes esenciales del DWDM se pueden clasificar por su posición en el sistema de la manera siguiente:

- En el lado transmisor, láseres con longitud de onda precisa y estable.
- En el enlace, fibra óptica con bajas pérdidas y buen rendimiento en la transmisión en el espectro de la longitud de onda relevante además de amplificadores ópticos de ganancia plana para amplificar la señal en distancias largas.
- En el lado receptor, fotodetectores y desmultiplexadores ópticos usando filtros de poco espesor o elementos difractivos.
- Multiplexadores ópticos add/drop y componentes cross-connect ópticos. Estos y otros componentes, junto a sus tecnologías asociadas, se discuten a continuación. Mientras mucha de esta información, particularmente los pros y contras de varias tecnologías competidoras, puede ser de más importancia al diseñador del sistema que al usuario final o al diseñador de la red, también puede ser de interés a otros lectores.

5.9.3 Fibras Ópticas en DWDM

El principal trabajo de las fibras ópticas es guiar la luz con la atenuación mínima (pérdida de señal). Las fibras ópticas están compuestas de finos hilos de cristal en capas, llamadas “core” y “cladding”, que pueden transmitir luz a $2/3$ de la velocidad de la luz en el vacío.

Admitiendo una supersimplificación, la transmisión de luz en fibra óptica se explica con el principio de la reflexión interna total. Con este fenómeno, el 100% de la luz que golpea una

superficie es reflejada. Por contra, un espejo refleja el 90% de la luz que le golpea. La luz o es reflejada (rebota) o es refractada (el ángulo de salida es distinto del de entrada según el medio de que se trate) dependiendo del ángulo de incidencia (ángulo con el que golpea la luz a la superficie en cuestión).

La reflexión interna total ocurre cuando se cumplen las condiciones siguientes:

- El rayo pasa de un material más denso a uno menos denso. La diferencia entre la densidad óptica de un material y el del vacío es lo que se llama índice de refracción del material.
- El ángulo de incidencia es menor que el ángulo crítico. Ángulo crítico es el ángulo de incidencia a partir del cual la luz deja de ser refractada y por tanto pasa a ser totalmente reflejada.

El “core” de la fibra tiene un índice de refracción más alto que su “cladding”, permitiendo que el rayo que golpea esta superficie lo haga con un ángulo menor al crítico, con lo que es completamente reflejado. Si un rayo no cumple este requisito, será refractado.

Principio de Reflexión Interna Total

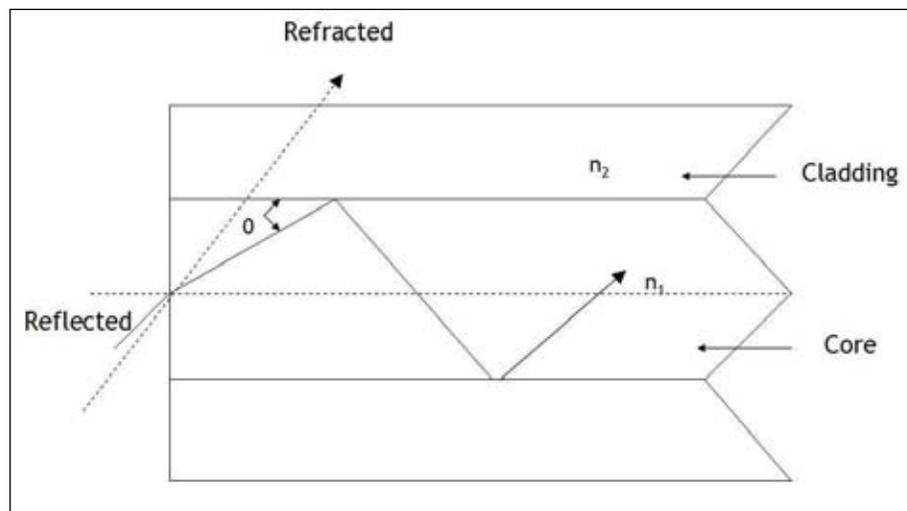


Figura 30.

Una fibra óptica consiste de dos tipos diferentes de cristal sólido de alta pureza, el core y el cladding, que están mezclados con elementos específicos, llamados dopantes, para ajustar sus índices de refracción. La diferencia entre los índices de refracción de los dos materiales es la causa de que la transmisión de la luz no atravesase el cladding y permanezca dentro del core. El requerimiento de ángulo crítico es para controlar el ángulo en que la luz se inyecta en la fibra. Dos o más capas protectoras alrededor del cladding aseguran que el cristal se pueda manejar sin daños.

5.9.4 Fibras Multimodo y Fibras Monomodo

Hoy hay dos categorías generales de fibra óptica, la fibra multimodo y la fibra monomodo. La multimodo, el primer tipo de fibra que se comercializó, tiene un core de mayor diámetro que la fibra monomodo. Su nombre viene del hecho de que numerosos modos, o rayos de luz, se pueden transportar simultáneamente a través de la fibra. A este tipo de transmisión se le llama “step-index”, debido al hecho de que hay un índice uniforme de refracción a lo largo del core, así hay un salto en el índice de refracción de la interface del core y el cladding. Notar que los dos modos deben viajar distancias diferentes para llegar a su destino. Esta disparidad en cuanto al tiempo de llegada de los modos del rayo de luz llega se llama dispersión modal. Este fenómeno es la causa de una señal de calidad pobre en la recepción y que limita la distancia de transmisión. Esto es la razón por la que la fibra multimodo no se usa en aplicaciones de área amplia.

Luz reflectada paso a paso en fibra multimodo

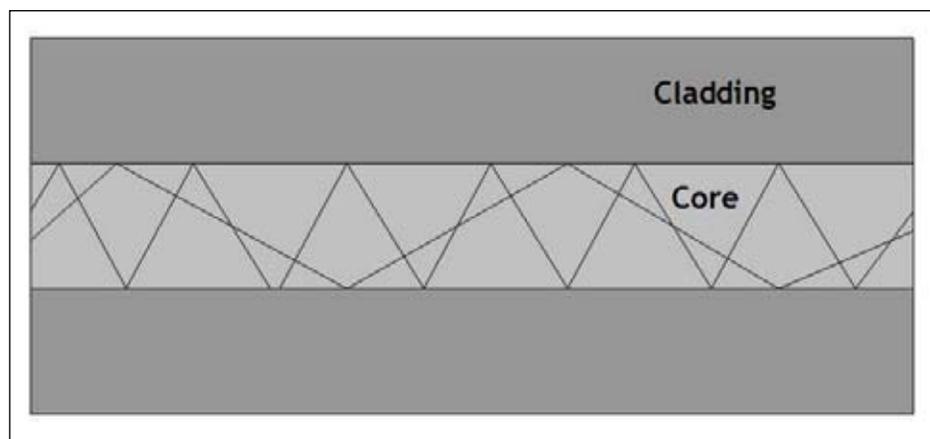


Figura 31.

Para compensar el inconveniente de la dispersión del paso a paso de la fibra multimodo, se inventó la fibra “graded-index”. “Graded-index” significa que el índice de refracción del core disminuye gradualmente desde el centro hacia afuera. La refracción más alta en el centro del core ralentiza la velocidad de algunos rayos de luz, permitiendo que todos los rayos lleguen a su destino casi al mismo tiempo y con una reducida dispersión modal.

El segundo tipo de fibra, monomodo, tiene un core de diámetro menor que permite que un solo modo de luz viaje por el core. Como resultado de ello, la señal se atenúa menos y por tanto se alcanzan mayores distancias. Estos factores contribuyen a una capacidad de ancho de banda mayor que el caso de las fibras multimodo. Para gran capacidad de transmisión y bajas pérdidas, la fibra monomodo se prefiere en aplicaciones de larga distancia y mayor ancho de banda incluido el DWDM.

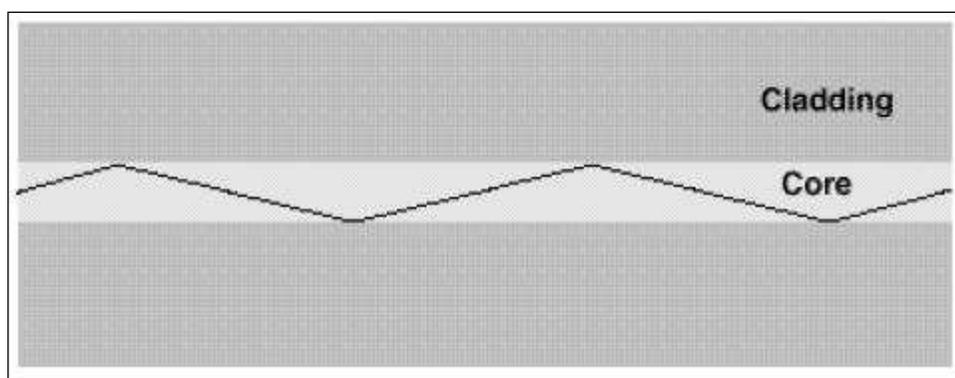


Figura 32. *Un solo haz de luz reflejada, fibra monomodo.*

5.9.5 Diseños de Fibra Monomodo

Los diseños de la fibra monomodo han evolucionado a medida que pasan los años.

Los tres principales tipos y sus especificaciones ITU-T son:

- NDSF (Non-Dispersion-Shifted Fiber), G 652
- DSF (Dispersion-Shifted Fiber), G 653
- NZ-DSF (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber), G 655



Como se ha explicado antes, hay cuatro ventanas dentro del espectro infrarrojo que ha sido explotado en la transmisión por fibra óptica. La primera ventana, cerca de los 850 nm, se usó casi exclusivamente para aplicaciones multimodo de distancias cortas. Las fibras NDSF, comúnmente llamada la fibra monomodo estándar, se diseñó para usarla en la segunda ventana, cerca de los 1310 nm. Para optimizar el rendimiento de la fibra óptica en esta 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 hacía más común y aumentaban las necesidades de un mayor ancho de banda y mayores distancias, se explotó una tercera ventana, cercana a los 1550 nm, en transmisión monomodo. La tercera ventana o banda C, ofreció dos ventajas: tenía mucha menos atenuación y su frecuencia de operación era la misma que la de los nuevos amplificadores dopados con erbio (EDFAs). Sin embargo sus características de dispersión lo limitan severamente. Esto se solucionó con el uso de láseres de una banda más estrecha y más potentes. Pero debido a que la tercera ventana tiene menor atenuación que la ventana de 1310 nm, los fabricantes se han decantado por el tipo DSF, que desplaza el punto de dispersión cero a la región de los 1550 nm. Aunque ahora esta solución significa que la atenuación óptica menor y el punto de dispersión cero coinciden con la ventana de 1550 nm, resulta que hay no linealidades destructivas en la fibra óptica cerca del punto de distorsión cero y no hay compensación efectiva a ello. Por esta limitación, estas fibras no sirven para aplicaciones DWDM.

El tercer tipo, NZ-DSF, está diseñado específicamente para cubrir las necesidades de las aplicaciones DWDM. La dirección de este diseño es hacer la dispersión baja en la región de 1550 nm, pero no cero. Efectivamente esta estrategia introduce una cantidad controlada de dispersión, que cuenta los efectos no lineales tales como la mezcla de cuatro ondas que pueden perjudicar el rendimiento de los sistemas DWDM.

5.9.6 Retos de la Transmisión por Fibra

La transmisión de luz en fibra óptica presenta varios retos que deben tratarse. Estos caen dentro de las tres categorías siguientes:

- Atenuación. Caída de la fuerza de la señal, o pérdida de la potencia de luz, a medida que la señal se propaga por la fibra.
- Dispersión cromática. Ampliación de los pulsos de luz a medida que viaja por la fibra.
- No linealidades. Efectos acumulativos de la interacción de la luz con el material a medida que viaja por la fibra, cuyos resultados son cambios de la longitud de onda e interacciones entre longitudes de onda.

Cada uno de estos efectos tiene varias causas, y no todas ellas afectan al DWDM.

A continuación se explican las más relevantes, con respecto a DWDM.

5.9.7 Atenuación

La atenuación en las fibras ópticas es una causa de los factores intrínsecos, primariamente dispersión y absorción y de factores extrínsecos, incluyendo defectos del proceso de fabricación, el entorno y la torcedura física como se vio en la primera parte de este trabajo. La forma más común de dispersión es la dispersión Rayleigh, causada por pequeñas variaciones en la densidad del cristal a medida que se enfría. Estas variaciones son más pequeñas que las longitudes de onda que se usan y por lo tanto actúan como objetos de dispersión. La dispersión afecta a las longitudes de onda cortas más que a las largas y limita el uso de las longitudes de onda por debajo de 800 nm.

Dispersión Rayleigh

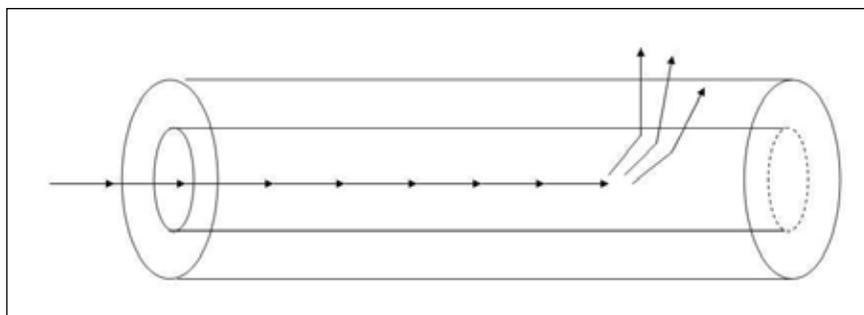


Figura 33.

La atenuación debido a la absorción es causada por propiedades intrínsecas del propio material, las impurezas del vidrio y cualquier defecto atómico en el vidrio. Estas impurezas absorben la energía óptica, haciendo que la potencia de la luz disminuya. Mientras que la dispersión Rayleigh es importante en longitudes de onda cortas, la absorción intrínseca es una cuestión de longitudes de onda más largas y aumenta dramáticamente por encima de 1700 nm. Sin embargo, la absorción debido al agua introducida en el proceso de fabricación de la fibra está siendo eliminada en algunos nuevos tipos de fibra.

Los factores primarios que afectan a la atenuación en las fibras ópticas son la longitud de la fibra y la longitud de onda de la luz. En la figura siguiente se muestra la pérdida en dB/Km por longitud de onda debido a la dispersión Rayleigh, la absorción intrínseca y la atenuación total.

Curva total de atenuación

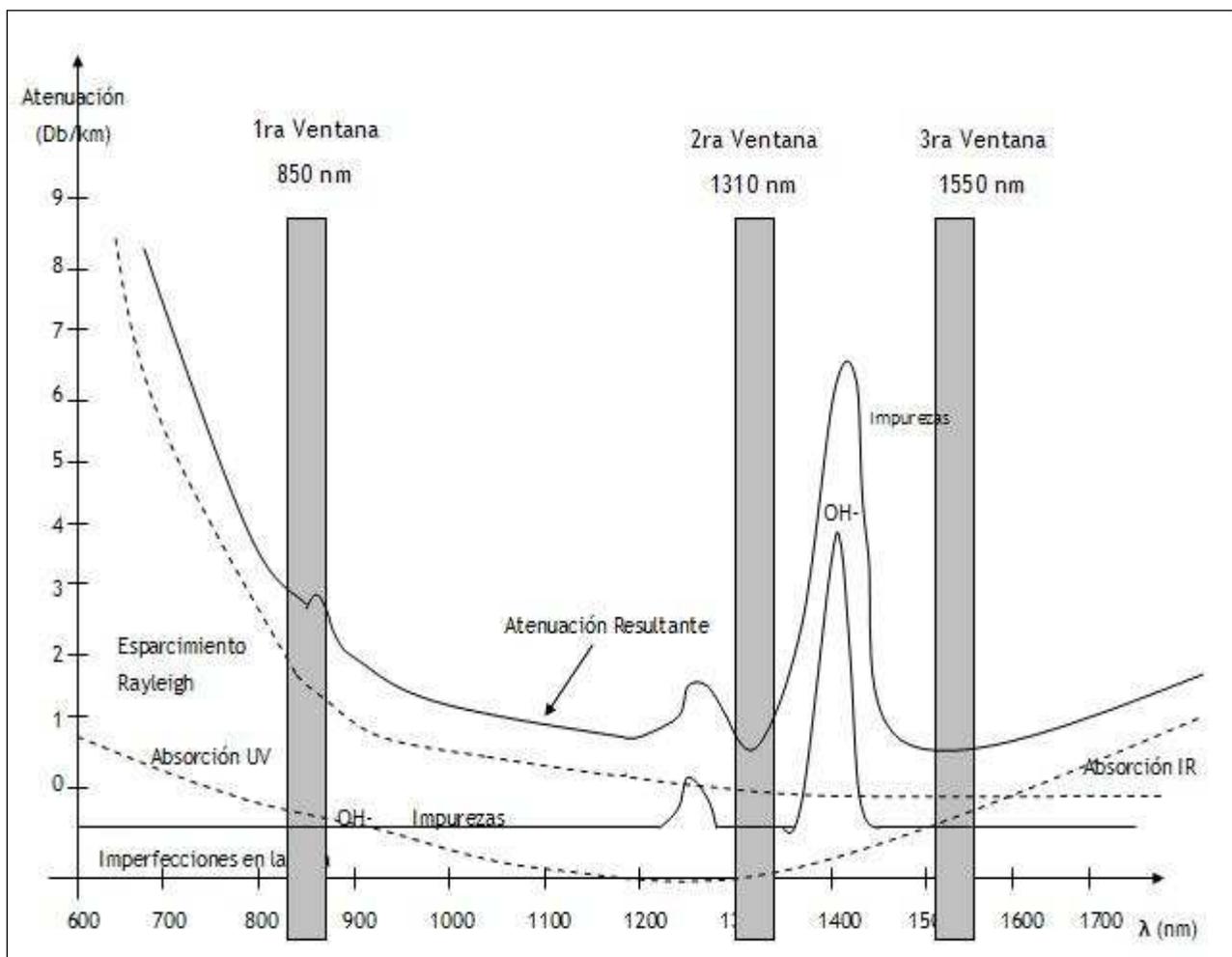


Figura 34.

La atenuación en fibra se compensa primariamente con el uso de amplificadores ópticos.

5.9.8 Dispersión

Es la dispersión de pulsos de luz mientras viaja a través de la fibra. El resultado de la dispersión es una distorsión de la señal que limita el ancho de banda de la fibra.

Principio de Dispersión

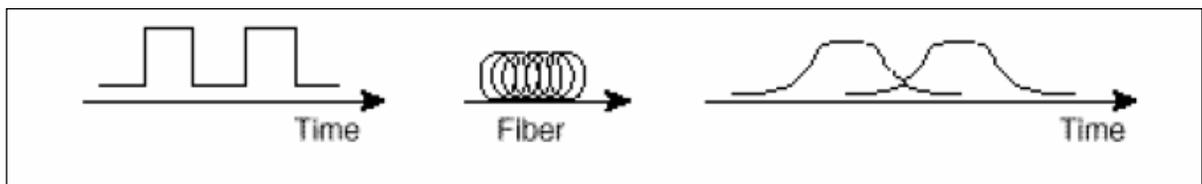


Figura 35.

Dos tipos generales de dispersión afectan a los sistemas DWDM. Uno de estos efectos, la dispersión cromática es lineal mientras que la otra, la dispersión en modo polarizado (PMD) no es lineal.

5.9.9 Dispersión Cromática

La dispersión cromática es consecuencia de que las diferentes longitudes de onda se propagan a diferentes velocidades. El efecto de la dispersión cromática se incrementa con el cuadrado de la velocidad. En la fibra monomodo, la dispersión cromática tiene dos componentes: la dispersión material y la dispersión de guía de onda.

La dispersión material ocurre cuando las longitudes de onda viajan a diferentes velocidades a través del material. Una fuente de luz, no importa lo estrecho que sea su espectro, emite varias longitudes de onda dentro de un rango. Así cuando este rango de longitudes de onda viaja a través de un medio, cada longitud de onda individual llega a una hora distinta.

El segundo componente de la dispersión cromática, es la dispersión guía de onda, es consecuencia de los diferentes índices de refracción del core y el cladding de la fibra. El índice de refracción efectivo varía con la longitud de onda de la forma siguiente:

- En cuanto a las longitudes de onda cortas, la luz va bien confinada dentro del core. Así el índice de refracción efectivo es un valor próximo al índice de refracción del core.
- En cuanto a las longitudes de onda medias, la luz se pierde ligeramente en el cladding. Esto disminuye el valor del índice de refracción efectivo.
- En cuanto a las longitudes de onda largas, la luz se pierde mucho en el cladding, y esto hace que el índice de refracción efectivo sea muy parecido al índice de refracción del cladding.

El resultado del fenómeno de la dispersión de la guía de onda es un retardo de propagación en una o más de las longitudes de onda relativas a las demás. La dispersión cromática total junto con sus componentes, está representada en la figura siguiente por longitud de onda para el tipo de fibra DSF. Para el tipo de fibra NDSF, la longitud de onda de dispersión cero es 1310 nm.

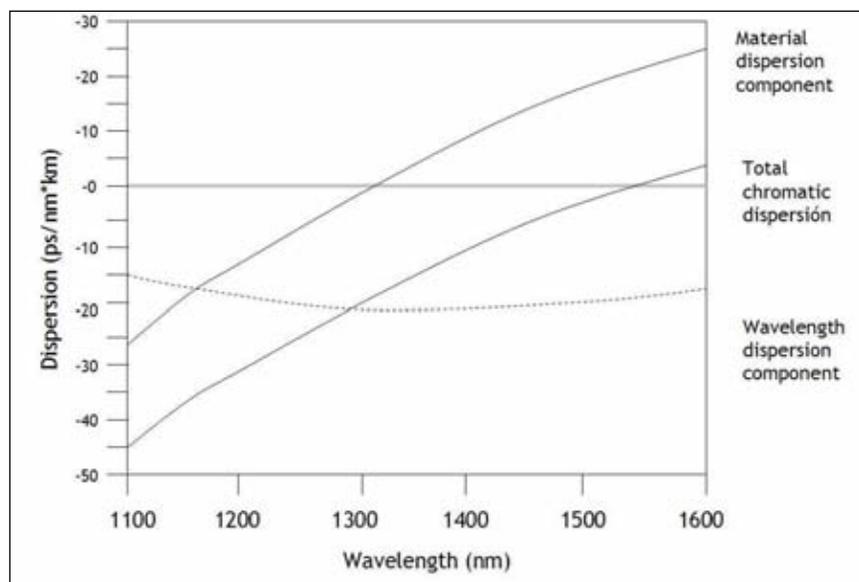


Figura 36. *Dispersión Cromática*



Aunque la dispersión cromática no es generalmente una cuestión a tener en cuenta a velocidades por debajo de OC-48, si la tiene con velocidades mayores debido al ancho del espectro requerido. Nuevos tipos de fibras ZDSF reducen en mucho estos efectos. El fenómeno también se puede mitigar con los compensadores de dispersión.

5.9.10 Dispersión en modo polarizado

La mayoría de las fibras monomodo soportan dos modos de polarización perpendiculares, uno vertical y otro horizontal. Debido a que los estados de polarización no se mantienen, hay una interacción entre los pulsos y como consecuencia un ensanche de la señal.

La dispersión en modo polarización (PMD) es causada por la ovalidad de la forma de la fibra como resultado del proceso de fabricación o de tensiones externas. Debido a que las tensiones pueden variar con el tiempo, la PMD, a diferencia de la dispersión cromática, puede variar con el tiempo. La PMD no es generalmente un problema a velocidades por debajo de OC-192.

5.9.11 Otros Efectos no lineales

Además de la PMD, hay otros efectos no lineales. Debido a que los efectos no lineales tienden a manifestarse cuando la potencia óptica es muy alta, llegan a ser importantes en DWDM.

Los efectos lineales tales como la atenuación y la dispersión pueden ser compensados, pero los efectos no lineales son acumulativos. Son mecanismos fundamentales que limitan la cantidad de datos que pueden ser transmitidos por fibra óptica. Los más importantes tipos de efectos no lineales están estimulados por la dispersión Brillouin, la dispersión Raman estimulada, la modulación “self-phase”, y la mezcla de cuatro ondas. En DWDM de estos tipos, la mezcla de cuatro ondas es la más crítica.

La mezcla de cuatro ondas está causada por la naturaleza no lineal del índice de refracción de la fibra óptica. Interacciones no lineales entre diferentes canales DWDM crean



bandas laterales que pueden causar interferencia entre canales. En la figura siguiente se muestra tres frecuencias que se interaccionan produciendo una cuarta como resultado de la diafonía y la degradación por la relación señal/ruido.

Mezcla de cuatro ondas

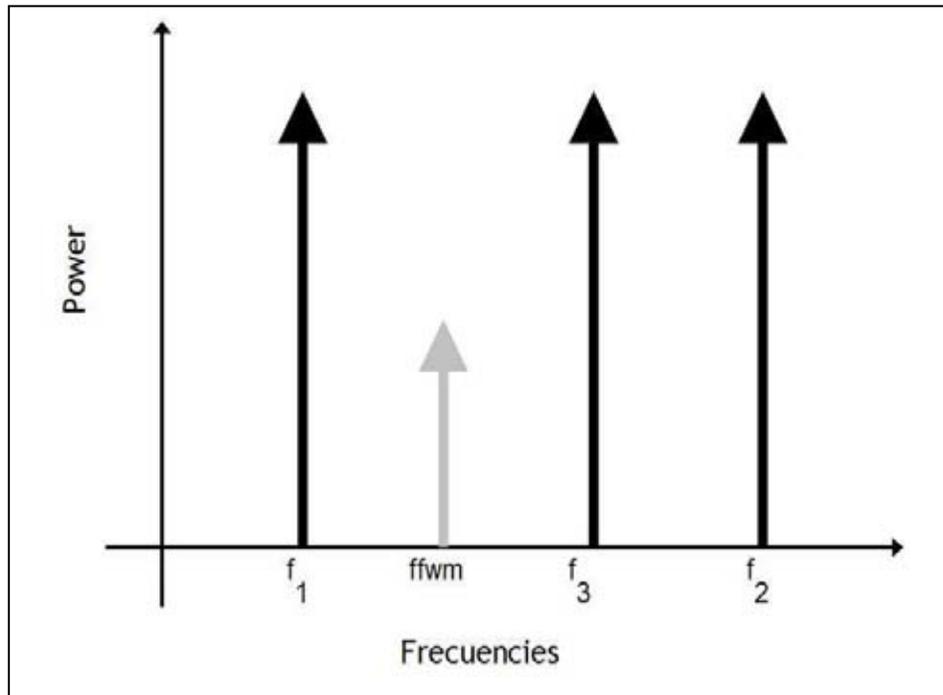


Figura 37.

El efecto de la mezcla de las cuatro ondas es limitar la capacidad del canal del sistema DWDM. La mezcla de las cuatro ondas no se puede filtrar, ni ópticamente ni eléctricamente y aumenta con la longitud de la fibra. Debido a la propensión de la mezcla de cuatro ondas, no se puede emplear el tipo DSF para aplicaciones DWDM. Esto aceleró la invención del tipo NZ-DSF, que lo aventaja en cuanto a que una pequeña cantidad de dispersión cromática se puede usar para mitigar el efecto de la mezcla de cuatro ondas.



En las redes de larga distancia, la mayoría de la fibra utilizada es la estándar monomodo (G.652) con alta dispersión en la ventana de 1550 nm, y que limita la distancia para las transmisiones OC-192. La dispersión se puede mitigar algo mediante el empleo de compensadores de dispersión. La fibra del tipo NZ-DSF se puede emplear en el transporte de OC-192 pero a potencias ópticas mayores se introducen efectos no lineales.

En las redes de corta distancia, la PMD y los efectos no lineales no son tan críticos como en los sistemas de larga distancia, donde las altas velocidades (OC-192 y más) son habituales. Los sistemas DWDM usando señales ópticas de 2,5 Gbps o menores, no están sujetas a efectos no lineales por estar en distancias cortas.

Los principales tipos de fibra monomodo y sus aplicaciones se puede resumir de la manera siguiente:

- Fibra NDSF (fibra estándar SM) – Está en el 95% de las instalaciones, útil para TDM (un canal) y usa la región de los 1310 nm o DWDM en la región de los 1550 nm (con compensadores de dispersión). Este tipo de fibra también puede soportar 10 Gigabit Ethernet hasta 300 m.
- Fibra DSF – Útil para TDM en la región de los 1550 nm pero no útil para DWDM en esta región.
- Fibra NZ-DSF – Buena para TDM y DWDM en la región de los 1550 nm.
- Fibras de nueva generación, incluyen tipos que permiten a la energía viajar incluso en el cladding, creando una pequeña cantidad de dispersión para contrarrestar la mezcla de cuatro ondas, y las fibras de dispersión planas que permiten el uso de longitudes de onda mayores que la óptima sin ensanchamiento del pulso.



A velocidades de 40 Gbps o más, la interdependencia entre el diseño del sistema y el diseño de la fibra será cada vez más importante en cuanto a la planificación estratégica.

5.9.13 Fuentes de luz y detectores ópticos

Los emisores de luz y los detectores de luz son dispositivos activos en extremos opuestos de un sistema de transmisión óptico. Las fuentes de luz, o los emisores de luz, son dispositivos en el lado transmisor que convierten las señales eléctricas a pulsos de luz. El proceso de esta conversión, o modulación, se puede llevar a cabo mediante modulación externa de una onda continua de luz o usando un dispositivo que puede generar luz modulada directamente. Los detectores de luz realizan la función opuesta de la función de los emisores de luz. Son dispositivos opto-electrónicos en el lado receptor que convierten los pulsos de luz en señales eléctricas.

5.9.14 Emisores de luz

La fuente de luz usada en el diseño de un sistema es un asunto importante porque puede ser uno de los elementos caro. Sus características son a menudo un factor importante en cuanto a la limitación en el rendimiento final del enlace óptico. Los dispositivos emisores de luz usados en la transmisión óptica deben ser compactos, monocromáticos, estables y de larga duración.

Monocromático es un término relativo; en la práctica hay solamente fuentes de luz con un rango determinado. La estabilidad de la fuente de luz es una medida de cuan constante es su intensidad y longitud de onda. Se usan dos tipos generales de dispositivos emisores de luz en transmisión óptica, los LEDs (Light-Emitting Diodes) y los láseres (diodos o semiconductores).

Los LEDs son dispositivos lentos, útiles para velocidades inferiores a 1 Gbps, tienen un espectro relativamente ancho y transmiten la luz en un cono relativamente ancho. Estos dispositivos baratos se usan a menudo en comunicaciones con fibra multimodo. Por otro lado los láseres semiconductores tienen como característica un rendimiento mejor y se pueden utilizar en aplicaciones con fibra monomodo.



En la figura siguiente se ven los principios generales de como enviar luz láser en una fibra. El chip diodo láser emite luz en una dirección que se debe enfocar en la fibra con una lente y en la otra dirección en un fotodiodo. El fotodiodo, que tiene un ángulo para reducir las reflexiones en la cavidad del láser, es una forma de monitorizar la salida del láser y suministrar la retroalimentación necesaria para los ajustes.

Típico láser

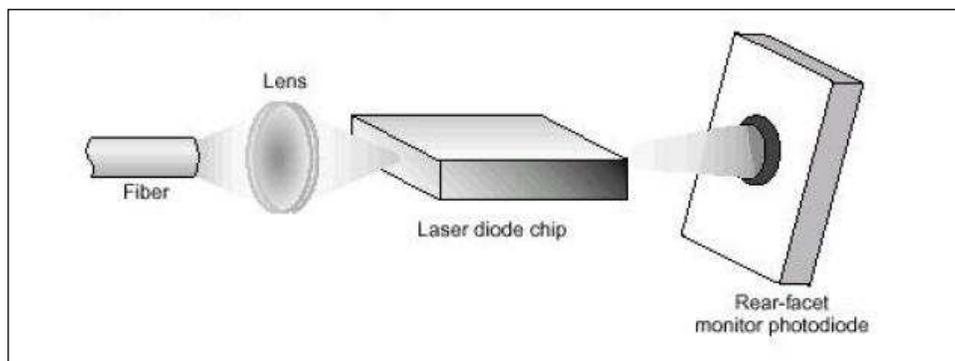


Figura 38.

Los requerimientos para láseres incluyen una longitud de onda precisa, un ancho del espectro estrecho, suficiente potencia, y control del chirp (el cambio en frecuencia de una señal en el tiempo). Los láseres semiconductores satisfacen bien los tres primeros requerimientos. Sin embargo el chirp puede estar afectado por los medios usados para modular la señal. En los láseres modulados directamente, la modulación de la luz que representa el dato digital se hace internamente. Con la modulación externa, la modulación se hace en un dispositivo externo. Cuando los láseres semiconductores son modulados directamente, el chirp puede llegar a ser un factor limitador a altas velocidades (por encima de 10 Gbps). Por otro lado la modulación externa ayuda a limitar el chirp.

Los tipos de láseres semiconductores habituales son: láseres monolíticos Fabry- Perot, y láseres con realimentación distribuída (DFB). El segundo tipo se adapta bien a las aplicaciones DWDM, emitiendo una luz casi monocromática, que es capaz de funcionar a altas velocidades, tiene una favorable relación señal/ruido, y tiene una linealidad superior. Los láseres DFB también tienen frecuencias centradas en la región de los 1310 nm y de 1520 a 1565 nm. El último rango de longitud de onda es compatible con EFDAs. Hay muchos otros tipos y subtipos de láseres. Los láseres sintonizables de espectro estrecho son útiles, pero su rango de



sintonización está limitado a 100-200 Ghz aproximadamente. En desarrollo hay un amplio espectro de láseres sintonizables, que serán importantes en las redes ópticas con conmutación dinámica.

5.9.15 Detectores de luz

En el lado receptor, es necesario recuperar las señales transmitidas a diferentes longitudes de onda en la fibra. Debido a que por naturaleza los fotodetectores son dispositivos de banda ancha, las señales ópticas son desmultiplexadas antes del detector.

Se utilizan fundamentalmente dos tipos de fotodetectores, el fotodiodo PIN (Positive-Intrinsic-Negative) y el fotodiodo de avalancha (APD). El fotodiodo PIN trabaja bajo principios similares a los LEDs pero al revés, es decir, la luz es absorbida más que emitida, y los fotones se convierten en electrones en una relación 1:1. Los APDs son dispositivos similares a los fotodiodos PIN, pero su ganancia se obtiene a través de un proceso de amplificación. Un fotón actuando en el dispositivo libera muchos electrones. Los fotodiodos PIN tienen muchas ventajas, incluido su coste y su fiabilidad, pero los APDs tienen mayor sensibilidad de recepción y mayor exactitud. Sin embargo los APDs son más caros que los fotodiodos PIN, y pueden tener requerimientos de intensidad mayores y más sensibles a la temperatura.



5.9.16 Amplificadores ópticos

Debido a la atenuación, hay límites en cuanto a la longitud de un segmento de fibra. Si se sobrepasan es necesaria una regeneración de la señal. Antes de la existencia de los amplificadores ópticos (OA), había que haber un repetidor por cada señal transmitida, como se ha visto anteriormente. El OA ha hecho posible el hecho de poder amplificar todas las longitudes de onda a la vez y sin conversión OEO (Optical-Electric-Optical). Además de ser usados en enlaces ópticos, los amplificadores ópticos también se pueden usar para aumentar la potencia de la señal después de la multiplexación o antes de la demultiplexación, dado que ambos procesos introducen pérdidas en el sistema.

5.9.17 Amplificador de fibra dopado con erbio

El EFDA fue una tecnología clave para hacer posible el transporte de gran cantidad de información de que es capaz el DWDM de transmitir a largas distancias, Al mismo tiempo, ha sido un gran hito en el desarrollo de otros elementos y tecnologías de las redes.

El erbio es un raro elemento que, cuando se excita, emite luz alrededor de $1,54 \mu\text{m}$, la longitud de onda de menor pérdida para las fibras ópticas usadas en DWDM. En la figura siguiente se ve un diagrama simplificado de un EFDA. Una señal débil entra en una fibra dopada con erbio, en que la luz a 980 nm o 1480 nm es inyectada mediante una bomba láser. De esta manera la luz inyectada estimula los átomos de erbio que liberan su energía almacenada como luz adicional de 1550 nm . Como este proceso continua por la fibra, la señal se refuerza. Las emisiones espontáneas en el EFDA también añaden ruido a la señal como se ve en la figura.

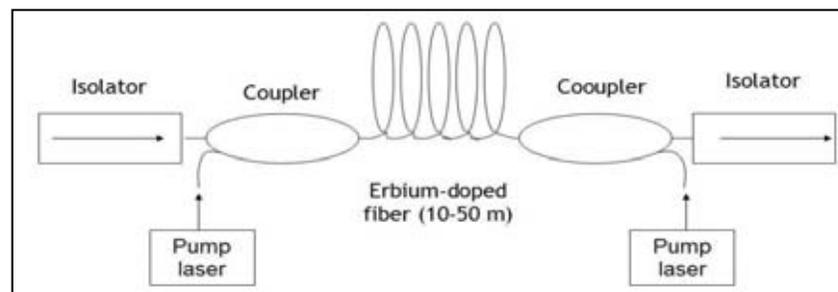


Figura 39.



Los parámetros clave de los amplificadores ópticos son la ganancia, la igualdad de ganancia, el nivel de ruido y la potencia de salida. Típicamente los EDFAs son capaces de ganancias de hasta 30 dB o más y potencias de salida de +17 dB o más. Sin embargo los parámetros clave cuando se selecciona un EFDA son el bajo ruido y la igualdad de la ganancia. La ganancia es plana porque todas las señales deben ser amplificadas uniformemente. Mientras la ganancia de señal suministrada por la tecnología EFDA depende inherentemente de la longitud de onda, se puede corregir con filtros de ganancia plana. A menudo estos filtros se construyen en modernos EDFAs.

El bajo ruido es un requerimiento porque el ruido es amplificado con la señal. Dado que su efecto es acumulativo, y no se puede filtrar, la relación señal /ruido es un factor limitativo en el número de amplificadores que se pueden concatenar y, por tanto, la longitud del enlace de una sola fibra. En la práctica, las señales pueden viajar hasta 120 km. entre amplificadores. A distancias superiores de 600 a 1000 Km. la señal se debe regenerar. Esto es porque el amplificador óptico solo amplifica las señales y no realiza las funciones 3R (Reshape, Retime, Retransmit). Los EDFAs se pueden emplear en las bandas C y L.

5.9.18 Multiplexadores y demultiplexadores

Dado que los sistemas DWDM envían señales de varias fuentes sobre una sola fibra, debemos incluir algunos dispositivos para combinar las señales de entrada. Esto lo hace un multiplexador, que toma las longitudes de onda ópticas de múltiples fibras y las convierte en un solo rayo. En el extremo receptor, el sistema debe poder separar los componentes de luz así que puedan ser discretamente detectados.

Los demultiplexadores realizan esta función desglosando el rayo receptor en sus componentes de longitud de onda y acoplándolos a la fibra individual. La demultiplexación se debe hacer antes de la detección de la luz, porque los fotodetectores inherentemente son dispositivos de banda ancha y no pueden selectivamente detectar una sola longitud de onda.



En un sistema unidireccional, hay un multiplexor en el lado emisor y un desmultiplexor en el lado receptor. Se requerirían dos sistemas en cada extremo en las comunicaciones bidireccionales, y se necesitarían dos fibras separadas.

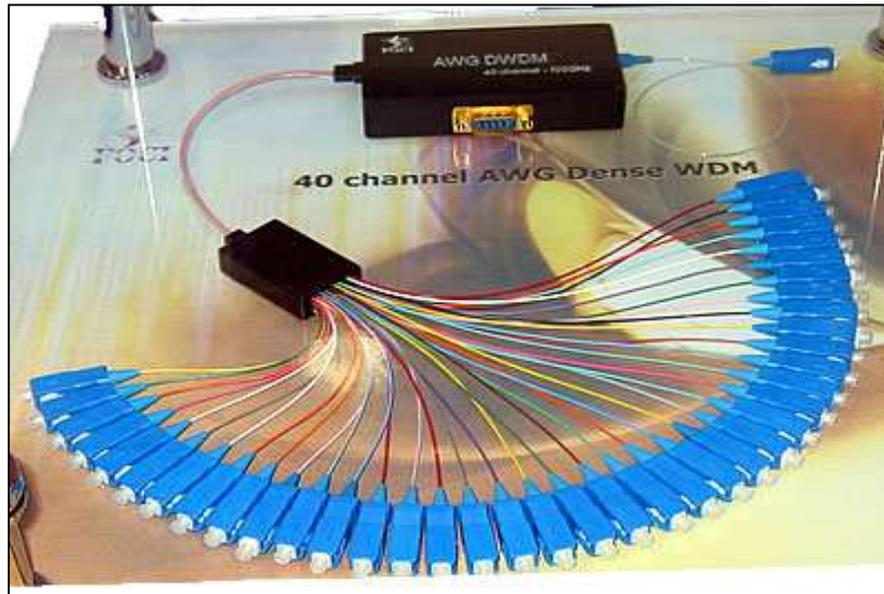


Figura 40. Multiplexor DWDM

En un sistema bidireccional, hay un multiplexador/desmultiplexador en cada extremo y la comunicación es sobre un solo par de fibras.

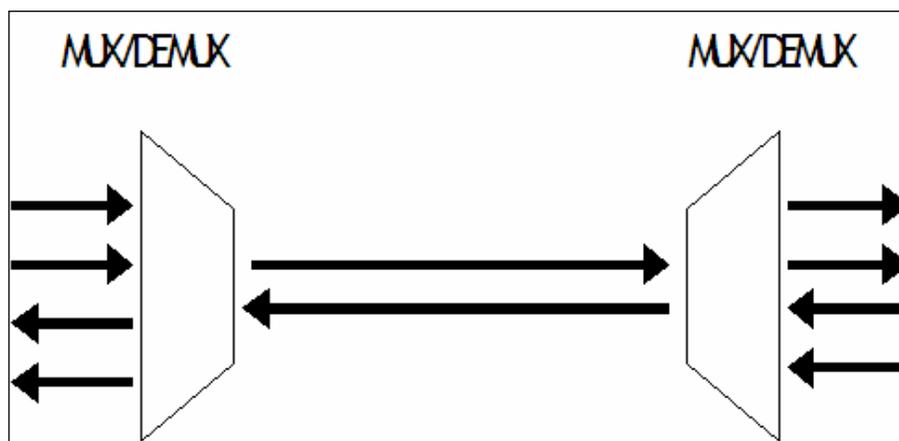


Figura 41. Multiplexador y desmultiplexador en un sistema bidireccional



Los multiplexadores y los desmultiplexador pueden ser de diseño pasivo o activo. El diseño pasivo se basa en prismas, rejillas de difracción, o filtros mientras que el diseño activo combina dispositivos pasivos y filtros sintonizables. Los principales retos en estos dispositivos es minimizar la diafonía y maximizar la separación de canal. La diafonía es una medida de cuanto están separados los canales, mientras que la separación de canales se refiere a la posibilidad de distinguir cada longitud de onda.

5.9.19 Técnicas de multiplexación y desmultiplexación

Una forma simple de multiplexar y desmultiplexar la luz se puede hacer con un prisma. En la figura siguiente se muestra un caso de desmultiplexación. Un rayo paralelo de luz policromática incide en la superficie de un prisma; cada componente de longitud de onda es refractado de forma distinta. Es el efecto arco iris. En la luz de salida, cada longitud de onda se distingue del siguiente mediante un ángulo. Entonces una lente enfoca cada longitud de onda a un punto donde necesita entrar en una fibra. Los mismos componentes se pueden usar de forma inversa para multiplexar diferentes longitudes de onda en una fibra.

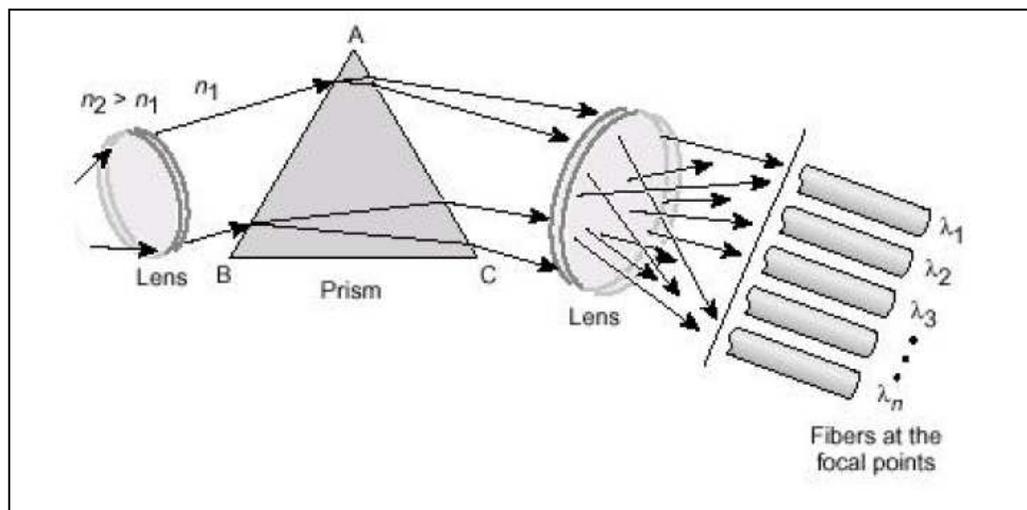


Figura 42. Prisma Demultiplexor



Otra tecnología está basada en los principios de la difracción e interferencia óptica. Cuando una fuente de luz policromática incide en una rejilla de difracción, cada longitud de onda es difractada con un ángulo diferente y por tanto a un punto distinto del espacio. Usando una lente, estas longitudes de onda se pueden enfocar en fibras individuales.

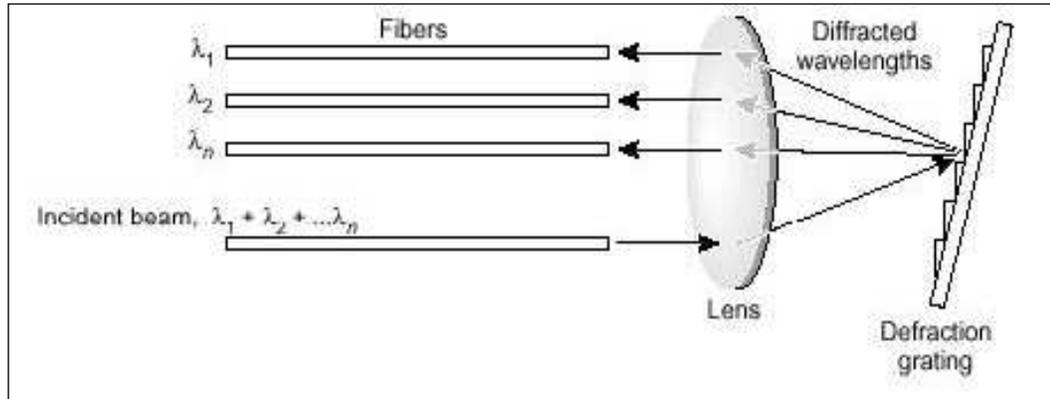


Figura 42.

Las AWGs (matriz de rejillas de guía de onda) también se basan en los principios de la difracción. Un dispositivo AWG, a veces llamado enrutador óptico de guía de onda o enrutador rejilla de guía de onda, consiste en una matriz de guías de onda curvadas con una diferencia fija en la longitud del camino entre canales adyacentes. Las guías de onda están conectadas a cavidades en la entrada y la salida. Cuando la luz entra en la cavidad de entrada, es difractada y entra en la matriz de guías de onda. Allí la diferente longitud óptica de cada guía de onda introduce un desfase en la cavidad de salida, donde un conjunto de fibras está acoplado. El proceso consigue que diferentes longitudes de onda tengan la máxima interferencia en diferentes ubicaciones, que corresponden a los puertos de salida.

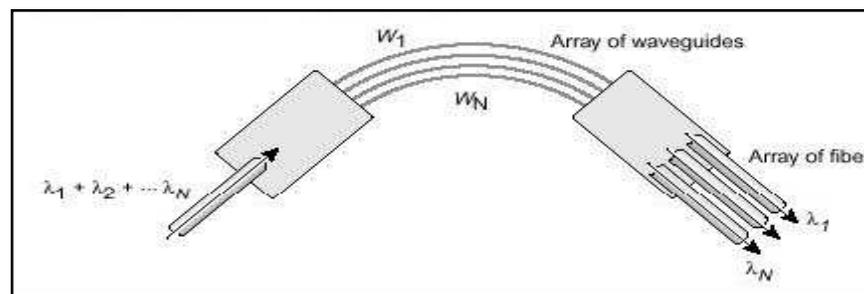


Figura 43.



Otra tecnología usa dispositivos con filtros de interferencia, llamados filtros de película delgada o filtros de interferencia multicapa. Mediante el empleo de varios filtros de película delgada en el camino óptico se pueden desmultiplexar las longitudes de onda. La propiedad de cada filtro es tal que transmite una longitud de onda mientras refleja las demás. Colocando en cascada varios filtros, se pueden desmultiplexar muchas longitudes de onda.

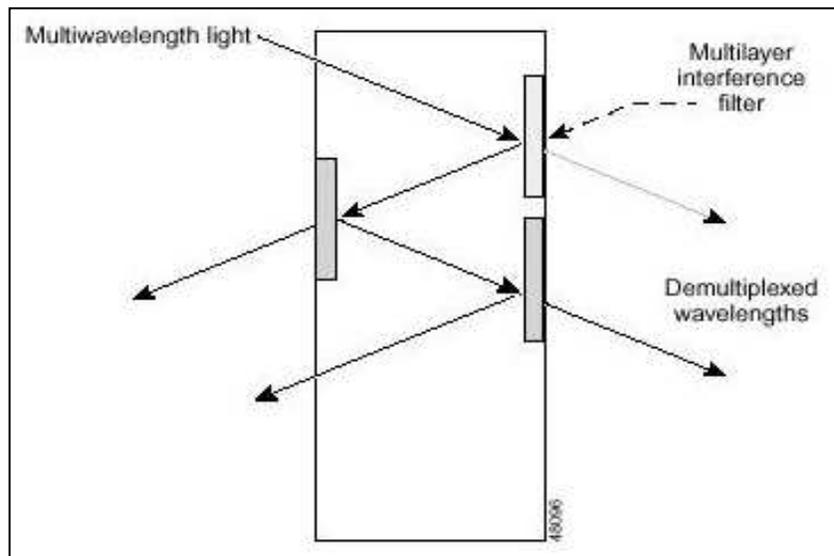


Figura 44. Filtro de interferencia multicapa

De estos diseños, el AWG y los filtros de interferencia de película delgada tienen una ganancia mayor. Los filtros ofrecen buena estabilidad y aislamiento entre canales a un precio moderado pero con una alta pérdida de inserción. Los AWGs dependen de la polarización (que se puede compensar), y exhiben una respuesta espectral plana y de baja pérdida de inserción. Un inconveniente potencial es que son sensibles a las temperaturas de forma que no se pueden emplear en todos los ambientes. Su gran ventaja es que se pueden diseñar para realizar operaciones de multiplexación y desmultiplexación simultáneamente. También los AWGs son mejores para las cuentas de grandes canales, donde el uso de filtros de película delgada en cascada es impracticable.



La mayoría de los sistemas DWDM soportan las interfaces estándar ópticas de corto alcance de SONET/SDH a las cuales se puede conectar cualquier dispositivo cliente compatible con SONET/SDH. En los sistemas WDM de larga distancia actuales, acostumbra a ser una interfase OC-48c/STM-16c a una longitud de onda de 1310 nm. Además también se soportan otras interfaces importantes de redes metropolitanas y de acceso: Ethernet (incluido Fast Ethernet y Giga Ethernet). ESCON, Sysplex Timer y Sysplex Coupling Facility Links, y Fibre Channel. El nuevo estándar 10 Gigabit Ethernet es soportado mediante una interface OC-192 VSR (Very Short Reach) sobre fibra multimodo entre el equipo 10 Gigabit Ethernet y DWDM. En el lado cliente pueden haber terminales SONET/SDH o ADMs, conmutadores ATM o enrutadores. Convirtiendo la señal de entrada óptica en precisas longitudes de onda ITU-estándar que se pueden multiplexar, habitualmente los transponders son un elemento clave de los sistemas DWDM. Dentro de un sistema DWDM, un transponder convierte la señal óptica cliente a una señal eléctrica y realiza las funciones 3R (Reshape, Retime, Retransmit). Esta señal eléctrica se usa entonces para controlar un láser WDM. Cada transponder dentro del sistema convierte su señal cliente a una longitud de onda ligeramente distinta. Las longitudes de onda de todos los transponders del sistema son entonces multiplexadas ópticamente. En la recepción del sistema DWDM, tiene lugar el proceso inverso. Las longitudes de onda individuales son filtradas desde las fibras multiplexadas y alimentan a los transponders individuales, que convierten la señal a eléctrica y la dirigen a través de un interface estándar al cliente.

Funciones de un transponder

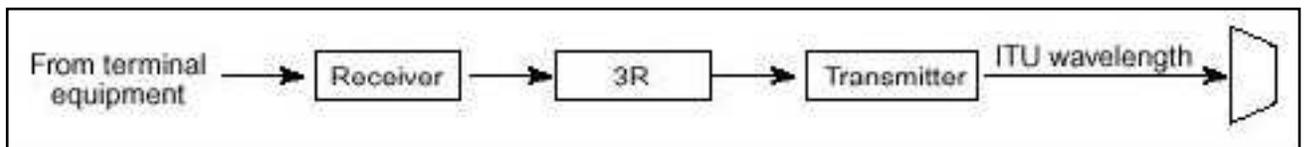


Figura 45.

Los futuros diseños incluyen interfaces pasivas, que aceptan la luz según las normas ITU directamente de un conmutador o enrutador conectado a una interfaz óptica.



5.9.21 Operación de un transponder basado en el sistema DWDM

La figura muestra una operación extremo a extremo de un sistema DWDM unidireccional.

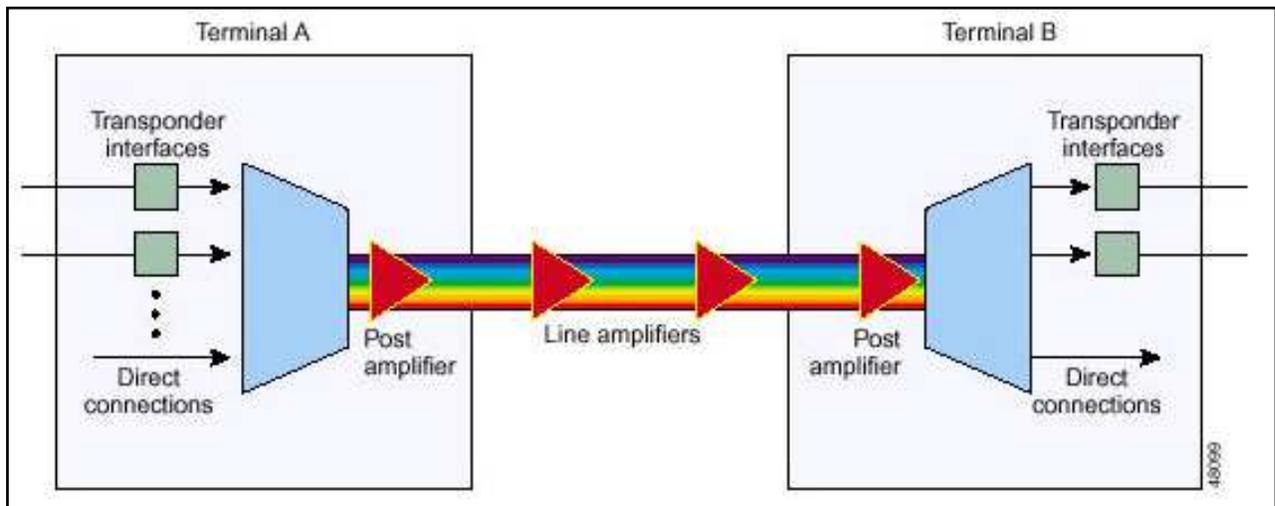


Figura 46.

Los pasos siguientes describen el sistema de la figura anterior:

1. El transponder acepta la entrada en la forma de un láser estándar monomodo o multimodo. La entrada puede venir de distinto medio físico y diferentes protocolos y tipos de tráfico.
2. La longitud de onda de cada señal de entrada es mapeada a una longitud de onda DWDM.
3. Las longitudes de onda DWDM del transponder son multiplexadas en una sola señal óptica y enviada por a la fibra. El sistema también puede incluir la posibilidad de aceptar señales ópticas directas al multiplexador; tales señales pueden venir, por ejemplo, de un satélite.
4. Un post-amplificador refuerza la señal óptica a la salida del sistema (opcional)
5. Los amplificadores ópticos se usan a lo largo del enlace óptico según necesidades (opcional)
6. Un pre-amplificador refuerza la señal antes de que entre en un extremo del sistema (opcional)



7. La señal de entrada es desmultiplexada en lambdas DWDM individuales (o longitudes de onda)

8. Cada lambda individual DWDM es mapeada según el tipo de salida requerido (por ejemplo, fibra monomodo OC-48) y enviada a través del transponder.

CAPITULO VI MEDICIONES ÓPTICAS EN INSTALACIÓN IN BUILDING

En este capítulo se presenta una instalación de sistema de cobertura celular indoor, el cual fue realizado por Leadcom Chile, específicamente en el primer piso y subterráneos de la Clínica Las Condes, ubicada en Santiago de Chile.

Para dicha instalación se realizó toda la ingeniería del sistema irradiante a instalar el cual fue aceptado por el cliente el cual solicitó que dicho sistema sea instalado en su totalidad con Fibra Óptica, por temores a posibles interferencias sobre sus equipos de tratamiento con pacientes.

6.1 Medición Óptica

Existen dos tipos de mediciones de potencia óptica: mediciones de potencia absoluta y mediciones de potencia relativa. Las absolutas son realizadas cuando se miden directamente fuentes, amplificadores y receptores, en cambio, en las relativas se miden las pérdidas, atenuaciones ó ganancias en una red de Fibra Óptica. Las mediciones relativas se expresan habitualmente en decibeles (dB) y las absolutas en dBm (referidas a 1 miliwatt de potencia).

Para realizar una medición de las pérdidas ópticas, primeramente se transmite un nivel de luz conocido con una fuente de luz directamente a un medidor de potencia óptica sin el enlace a medir, este nivel se considera como nivel de referencia. Luego se intercala el sistema a medir y se mide la potencia de la señal recibida, la diferencia entre esta potencia y la de referencia corresponde a las pérdidas del enlace. En un medidor de potencia óptica, básicamente se convierte el valor de la corriente generada por el fotodiodo en un valor de tensión, por medio de



un amplificador. Luego, para evitar eventuales voltajes de ruido para bajas potencias, se coloca un filtro pasa bajo y por último se inserta este valor en un voltímetro digital.

6.2 Reflectómetro óptico de dominio del tiempo

El reflectómetro óptico de dominio del tiempo es una herramienta muy poderosa para el mantenimiento e instalación de un sistema de fibras ópticas.

Posterior a la instalación, todo cable de Fibra Óptica debe ser chequeado para corroborar que la señal de luz inyectada por un extremo alcance en forma apropiada el otro extremo. El parámetro más importante que se mide es la atenuación de la señal de luz a lo largo de toda la fibra. Esta medición, como hemos visto, puede realizarse por medio de una fuente de luz y un medidor de potencia óptica, pero de esta manera no permite obtener los siguientes datos:

- Cómo están distribuidas las pérdidas.
- Existen pérdidas puntuales.
- Si existen rupturas, ¿dónde están ubicadas?

Esta información puede obtenerse a través de un OTDR. Este instrumento básicamente entrega un gráfico de nivel de señal respecto a la distancia, en donde se puede establecer la existencia y localización de rupturas, pérdidas en empalmes, conectores, dobladuras y la pérdida total del sistema. El principio de funcionamiento del mismo se basa en la transmisión de pulsos de luz y el posterior análisis de la energía de luz reflejada debido a la dispersión de Rayleigh y la reflexión de Fresnel. Una ventaja de importancia es que tanto la transmisión como recepción de la señal de luz se encuentra en un solo instrumento, por lo tanto solo se necesita acceder desde un extremo de la fibra a testear. Aquí se inyecta un pulso de luz angosto sobre la fibra a medir, luego la energía luminosa reflejada no penetra en el transmisor gracias a un acoplador direccional. Este acoplador también previene que la energía luminosa muy potente del transmisor no sobrecargue al receptor. El receptor de luz exhibe entonces la energía luminosa reflejada como función del tiempo respecto al pulso transmitido.



6.3 Medición típica

La velocidad con que se propagan los pulsos de luz es igual a la velocidad de la luz afectada por el índice de refracción del material. Cuando por ejemplo, el pulso se encuentra con un conector mal alineado se produce una reflexión, entonces puede evaluarse la distancia en donde se produjo este evento:

$$d = \frac{c t}{2}$$

Donde:

n = índice de refracción de la fibra

c = velocidad de la luz

t = tiempo transcurrido entre el envío y recepción de la reflexión.

Por último, cabe aclarar, que todo OTDR tiene una zona muerta en donde no puede efectuar mediciones. Esta limitación está dada por el ancho de los pulsos transmitidos y el índice de refracción de la fibra. Por ejemplo, para una fibra con $n = 1.5$, el pulso se propagaría a la velocidad de la luz afectada por este índice, esto es, a $2 \cdot 10^8$ m/seg. En un 1 nseg el pulso se propaga 20 cm, con lo cual, si el ancho del pulso fuera del orden del nanosegundo, se enmascararía el pulso reflejado, por lo tanto no sería capaz de detectar reflexiones dentro de esa zona muerta.

6.4 Instrumento de medición

El medidor de potencia óptica utilizado en dicha instalación fue el PROLITE-23, es un instrumento compacto, ligero y fácil de utilizar a la hora de trabajar con redes de Fibra Óptica, con características exclusivas como su capacidad de efectuar tests rápidos. Su calidad, prestaciones, confiabilidad y seguridad lo convierten en una alternativa al resto de equipos de su clase. El PROLITE-23, con sus reducidas dimensiones, es capaz de efectuar tests sobre sistemas de fibra óptica simple o multimodo y presentar los resultados en su gran pantalla LCD. Está protegido frente a golpes y puede alimentarse por la red o baterías. Su microprocesador interno y su tecnología de amplificación lineal aseguran precisión durante mucho tiempo. Así mismo, la memoria interna del PROLITE-23 es capaz de almacenar 3200 medidas, datos que pueden ser transferidos al PC para ser tratados e impresos.



Figura 47. Prolite-23

I Medición

Se comenzó con las mediciones en el primer piso de La Clínica Las Condes, se muestra en el plano la trayectoria de la Fibra instalada, ruta que dio el cliente para no entorpecer su canalización ni la fachada de la estructura, con fibra monomodo, con una potencia de la fuente de 50 W.

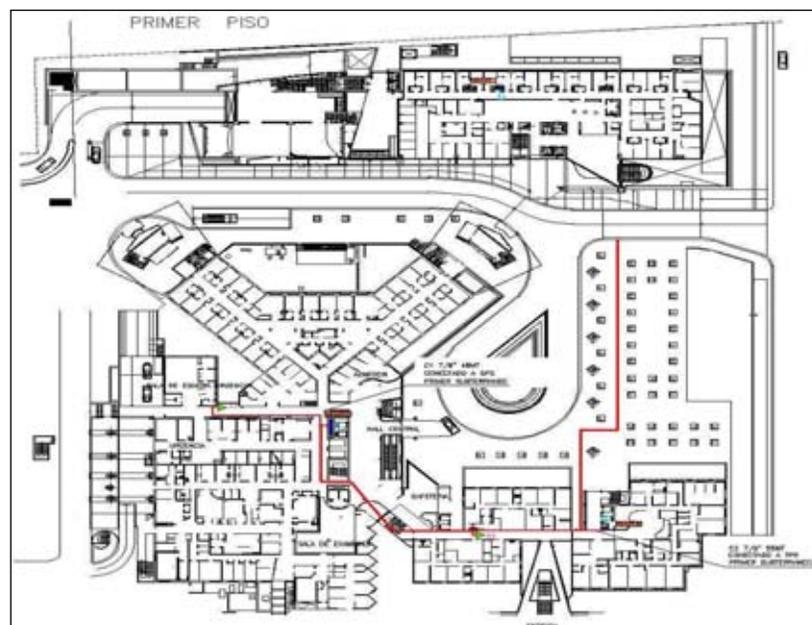


Figura 48. Primer piso

Longitud de la Fibra (Mts)	341
Longitud de Onda utilizada (λ)	1310 nm
Medida Potencia Absoluta dBm	46.998



Conector Óptico	SC
Asegura Enlace 100 %	Si

II Medición

Realizada sobre el primer subterráneo.

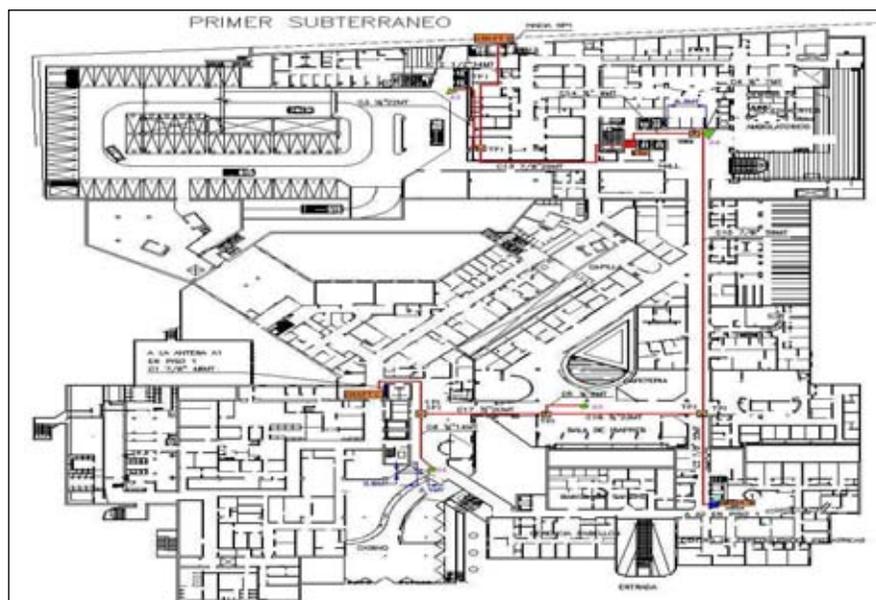


Figura 48. Primer Subterráneo

Longitud de la Fibra (Mts)	521
Longitud de Onda (λ)	1310 nm
Medida Potencia Absoluta dBm	46.78
Conector Óptico	SC
Asegura Enlace 100 %	Si



Realizada sobre el segundo subterráneo.

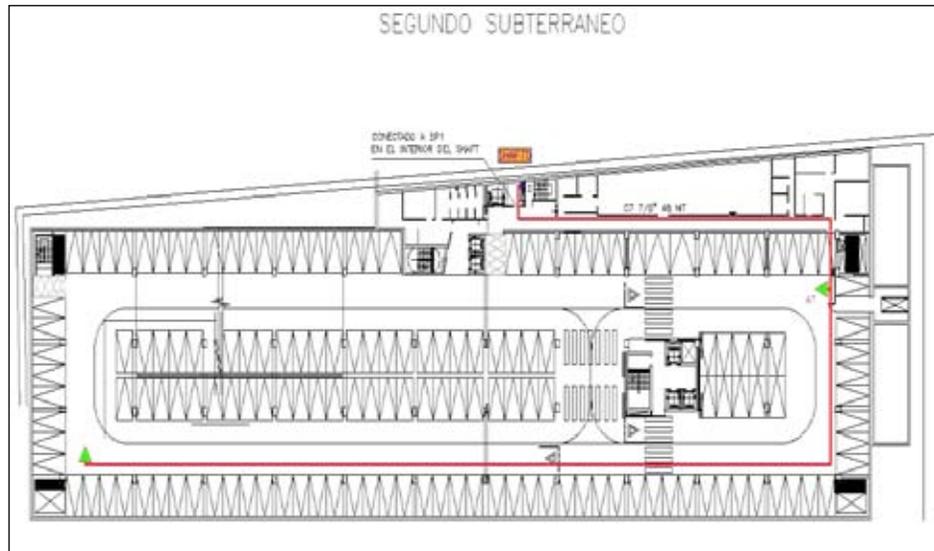


Figura 49. Segundo Subterráneo

Longitud de la Fibra (Mts)	318
Longitud de Onda (λ)	1310 nm
Medida Potencia Absoluta dBm	46.66
Conector Óptico	SC
Asegura Enlace 100 %	Si



VI Medición

Realizada sobre el tercer subterráneo.

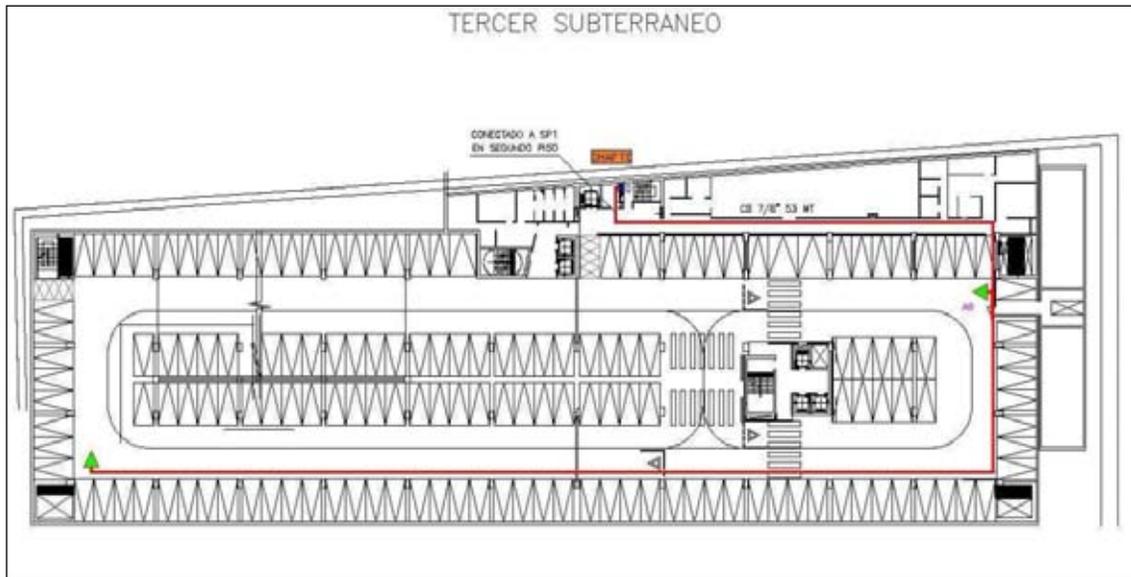


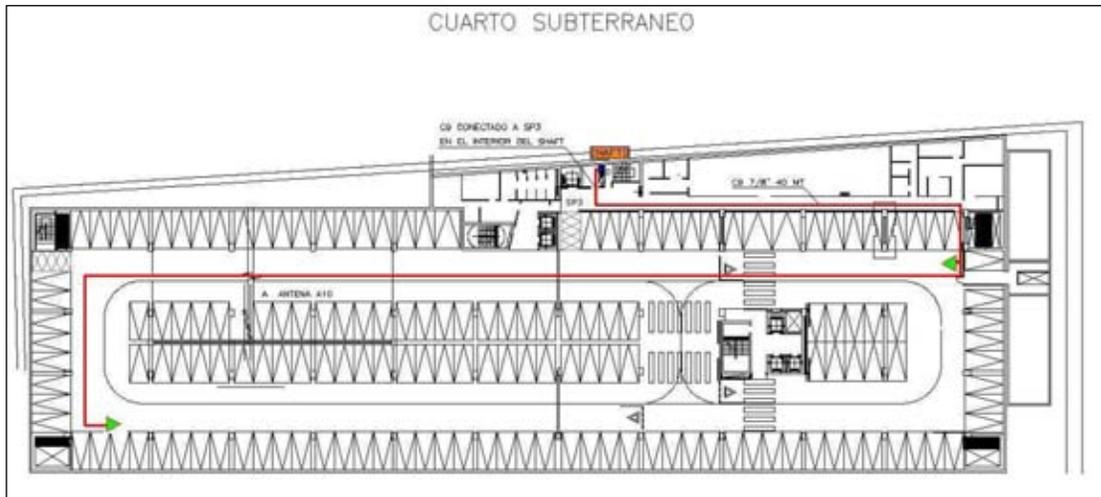
Figura 50. Tercer Subterráneo

Longitud de la Fibra (Mts)	324
Longitud de Onda (λ)	1310 nm
Medida Potencia Absoluta dBm	46.87
Conector Óptico	SC
Asegura Enlace 100 %	Si



V Medición

Realizada sobre el cuarto subterráneo.



igura 51. Cuarto Subterráneo

Longitud de la Fibra (Mts)	352
Longitud de Onda (λ)	1310 nm
Medida Potencia Absoluta dBm	46.99
Conector Óptico	SC
Asegura Enlace 100 %	Si

Cabe señalar que debido a la longitud en metros de la Fibra Óptica en esta instalación en particular, no se aprecian pérdidas de consideración ya que las pérdidas más significativas se obtienen en un extendido de Fibra Óptica de muchos kilómetros. Esta prueba nos da la certeza que la Fibra Óptica esta operando en su totalidad y los posibles problemas que puedan ocurrir en el sistema irradiante se aislara cada componente para verificar su funcionamiento individual. Todos los valores dieron cercanos a 47 dBm que era los esperado, ya que la fuente emisora con la cual se realizaron las pruebas tiene una potencia de 50 W. Cada vez se esta utilizando con mayor frecuencia las Fibra Ópticas en redes de mas corto alcance o para aplicaciones como estas.



VII CONCLUSIONES

No se sabe con certeza cuál será el futuro de la Fibra Óptica pero sí se está seguro en un aspecto de esta nueva tecnología, que está causando una gran revolución en los campos eléctricos, electrónicos, comunicaciones, informáticos y medicina. Sus aplicaciones están creciendo a una velocidad que prácticamente sobrepasa a la del campo de los circuitos integrados.

En robótica, las Fibras Ópticas están siendo desarrolladas con el fin de dar a los robots la capacidad de ver. Proporcionan un control de gran precisión al movimiento de los brazos de un robot, movimiento de manos, etc., pues miden con gran exactitud la posición o movimiento de estas extremidades. También los rayos de luz utilizados con Fibras Ópticas proporcionan la lógica simple luz-oscuridad o uno y cero que tan fácilmente se adapta al control por computadores. En medicina, la Fibra Óptica se utiliza para introducir luz dentro del cuerpo y obtener imágenes de su interior permitiendo a los especialistas examinar lo que ocurre dentro del cuerpo. En industrias petroleras, son empleadas en conjunto con sensores apropiados para facilitar las investigaciones de exploración con el fin de encontrar el oro negro. Existen infinidad de aplicaciones para la Fibra Óptica que van surgiendo como respuesta a nuevas necesidades como en la industria automotriz, nuclear, de la construcción, etc. Para poder satisfacer la demanda de éste producto en cantidad y calidad es necesario el desarrollo continuo de nuevas tecnologías y materiales que permitan cumplir con distintas especificaciones de acuerdo a las necesidades de uso a un bajo costo.

Este es el gran desafío que deben enfrentar las industrias de fabricación de Fibra Óptica. Ser capaces de alcanzar altos niveles de calidad fijando requerimientos a los siguientes parámetros:

- Atenuación
- Dispersión
- Resistencia mecánica

Los mismos deben ser cumplidos y asegurar que estos parámetros sean uniformes en toda la fibra.



Y como se vio el surgimiento de una nueva tecnología DWDM continuará suministrando el ancho de banda para grandes cantidades de datos. De hecho la capacidad de los sistemas crecerá con el avance de las tecnologías que permiten un espaciado menor, y por tanto números más altos de longitudes de onda. Pero DWDM también se está moviendo más allá del transporte llegando a ser la base de las redes ópticas con aprovisionameto de longitud de onda y protección basada en malla. La conmutación a nivel fotónico permitirá esta evolución, así como los protocolos de enrutamiento permitirán caminos de luz que atraviesen la red de la misma forma que lo hacen actualmente los circuitos virtuales. Estos y otros avances están convergiendo hacia una infraestructura óptica.



Bibliografía

- Eduard L. Safford, Introducción a la Fibra Óptica y el Laser, Ed. Paraninfo, 1988, Capítulo 1.
- Frank R. Dungan, Sistemas Electrónicos de Telecomunicaciones, Ed. Paraninfo, Pgs. 449-520.
- Heinz G. Pfaender. “Schott Guide to Glass”. Chapman & Hall.
- Hilberto Jardon Aguilar, Roberto Linares y Miranda, Sistemas de Comunicaciones por Fibras Ópticas,
- Jose María Fernandez Navarro. “El Vidrio. Constitución. Fabricación. Propiedades”. Consejo superior de investigaciones científicas, Instituto de cerámica y vidrio.
- Jose Martín Sanz, Comunicaciones Ópticas, Ed. Paraninfo, 1996.
- Midwinter, J. E., Optical Fibers for Transmission, Ed. John Wiley & Sons, 1979..M. Schwartz, Cableado de Redes, Ed. Paraninfo, 1996.
- Schulz, P.C.. “Fabrication of optical waveguides by the outside vapor deposition process. **IEEE.**