



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

División de Ingeniería Eléctrica

Tecnología DWDM
(Multiplexaje Denso por División de Longitud de onda) y sus
aplicaciones actuales

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTA:

CRUZ REYES ALMA ROSA



DIRECTOR DE TESIS: Dr. Volodymyr Svyryd

CIUDAD UNIVERSITARIA 2006

AGRADECIMIENTOS

A DIOS por haberme regalado la vida y la oportunidad de vivir mejor.

Al Dr. Svryyd Volodymyr por su paciencia, tiempo y dedicación; del cuál he aprendido muchas cosas buenas. Gracias a su ayuda hoy finalizo una parte importante de mi vida profesional.

Al amor de mi vida Juan y a mi adorada hija Daniela Sofia por ser lo más valioso que DIOS me regaló. A él por ser parte importante de mi existir, por que a través del tiempo me ha brindado alegrías, amor, apoyo, ternura y comprensión; con su ejemplo de superación me motiva a ser mejor como esposa y profesionalista. A mi pequeñita por ser mi hermosa bendición y la luz de mi existir, por que llena mi vida de alegría y felicidad, por regalarme todos los días sus hermosas sonrisas que me motivan a ser mejor madre y mujer.

A mi dulce madre por ser la mejor mujer que he conocido, por su entrega y amor incondicional. Por que gracias a ti madre hoy llego a este peldaño importante de mi vida.

A mi padre por ser un gran hombre al que quiero y admiro, por apoyarme a lo largo de mi carrera profesional para ser lo que hoy soy y por su gran cariño.

A mis queridos hermanos: Leticia, Daniel, Pilar, Ana Lilia, José Manuel y Selene gracias por brindarme su apoyo, amor y paciencia; ustedes son uno de los mejores regalos que la vida me dio. Gracias a su ejemplo de dedicación hoy termino este proyecto de vida.

A Salvador López Ortiz y Margarita Morales Méndez por su apoyo para que yo pudiera finalizar este proyecto mi agradecimiento y mi cariño más sincero.

A todas esas personas que he encontrado en mi camino y de las cuales he recibido apoyo y palabras de aliento para concluir este ciclo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
<u>Capítulo 1. CONCEPTOS GENERALES DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES.....</u>	2
1.1 Sistema básico de comunicación	2
1.2 Señales de comunicación	3
1.2.1 Definición de señal	3
1.2.2 Clasificación de las señales	3
1.2.3 Características fundamentales de las señales	4
1.2.4 Técnicas de modulación	4
1.3 Red de comunicaciones	6
1.3.1 ¿Qué es una red?.....	6
1.3.2 Clasificación de una red por su cobertura	6
1.3.3 Clasificación de las redes por su topología.....	7
1.3.4 Transmisión de información en las redes de comunicación	8
1.4 Medios de transmisión	9
1.4.1 Medios de transmisión guiados.....	9
1.4.1.1 Par trenzado	9
1.4.1.2 Cables coaxiales	10
1.4.1.3 Guías de onda.....	11
1.4.1.4 Fibra óptica	16
1.4.2 Medios de transmisión no guiados ó inalámbricos	19
1.5 Conclusiones	21
<u>Capítulo 2. PROBLEMÁTICA ACTUAL</u>	22
2.1 Crecimiento en la demanda de ancho de banda.....	22
2.2 La fibra óptica como medio de transporte	23
2.3 Opciones para incrementar la capacidad de transmisión de un enlace de fibra óptica	24
2.3.1 Multiplexaje por división de espacio (SDM)	24
2.3.2 Inversión en nueva tecnología TDM.....	24
2.3.3 Incremento del número de longitudes de onda transmitidas en la fibra óptica (WDM).....	25
2.4 WDM como la mejor opción para soportar la demanda actual de ancho de banda	26
2.5 Problemas de desarrollo de los sistemas DWDM	26
2.5.1 Limitantes propias de la fibra.....	26
2.5.1.1 Dispersión Cromática	26
2.5.1.2 Dispersión de Modo de Polarización	27
2.5.1.3 Efectos no lineales.....	27
2.5.2 Fibra óptica y fuentes de transmisión especiales.....	28
2.5.3 Amplificadores ópticos	28
2.5.4 Multiplexores/demultiplexores (Mux/Demux) DWDM	28
2.6 Problemas de desarrollo de las redes totalmente ópticas	29
2.7 Conclusiones	30

Capítulo 3. MULTIPLEXAJE POR DIVISIÓN EN LONGITUD DE ONDA (WDM) 31

3.1 Qué es la tecnología WDM?.....	31
3.2 Un poco de historia	31
3.3 CWDM y DWDM.....	32
3.4 Ventanas ópticas.....	32
3.5 Tipos de fibras ópticas empleadas en los sistemas DWDM y CWDM	34
3.6 Parámetros a considerar en un enlace óptico	35
3.7 Componentes de un sistema de transmisión CWDM y DWDM	35
3.7.1 Transmisores ópticos	36
3.7.1.1 LED vs Láser	37
3.7.1.2 Tipos de Láser	37
3.7.1.3 Comparación de los Láser CWDM y DWDM.....	38
3.7.2 Moduladores externos.....	38
3.7.3 Multiplexores, Demultiplexores y filtros ópticos.....	38
3.7.3.1 Mux/Demux Thin-Film	39
3.7.3.2 Mux/Demux FBG (Fiber Bragg Grating)	39
3.7.3.3 Mux/Demux AWG (Arrayed Waveguide Grating)	40
3.7.3.4 Comparación entre Mux/Demux CWDM y DWDM	40
3.7.4 Detectores ópticos	41
3.8 Dispositivos del enlace.....	41
3.8.1 Amplificadores ópticos.....	41
3.8.1.1 Tipos de amplificadores ópticos	42
3.8.1.2 Limitantes de los Amplificadores ópticos	42
3.8.2 Acopladores	43
3.8.3 Aisladores.....	44
3.8.4 Circuladores	44
3.9 Componentes principales de una red WDM.....	45
3.9.1 Conectores de cruce ópticos (OXC, Optical Cross Connect)	45
3.9.2 Ruteadores.....	45
3.9.3 Multiplexores Ópticos ADD – DROP (OADM).....	45
3.9.4 Convertidores de longitudes de onda.....	46
3.10 Conclusiones.....	47

Capítulo 4. EJEMPLO COMPARATIVO DE DISEÑO SDM Y WDM 48

4.1 La tecnología WDM hoy en día.....	48
4.2 Análisis comparativo de dos tipos de multicanalización: SDM y WDM.....	49
4.2.1 Consideraciones de desempeño para un enlace óptico	49
4.2.2 Metodología de diseño	50
4.2.2.1 Cálculo de la banda de paso	50
4.2.2.2 Cálculo energético.....	52
4.2.3 Requerimientos y arquitectura de las opciones propuestas.....	54
4.2.3.1 Opción empleando SDM.....	54
4.2.3.2 Opción empleando CWDM	55
4.2.3.3 Opción empleando DWDM	56
4.2.4 Componentes y diseño de un enlace para las opciones propuestas	56

4.2.4.1 Diseño de un solo canal con la opción SDM	56
4.2.4.2 Diseño de un solo canal con la opción CWDM.....	59
4.2.4.3 Diseño de un canal utilizando la opción DWDM.....	60
4.2.5 Comparación entre las diversas opciones para cubrir los requerimientos	63
4.3 Conclusiones	64
 CONCLUSIONES GENERALES.....	65
 BIBLIOGRAFÍA	66
 ANEXOS	70

INTRODUCCIÓN

Hoy día se pueden observar nuevas demandas de ancho de banda gracias al crecimiento de servicios ofrecidos por la Internet tales como correos electrónicos, compra por Internet, video sobre demanda, etc. Esto implica que en cuanto a una red corporativa las necesidades del incremento en el intercambio de información van creciendo significativamente.

Actualmente se perfila una tendencia a realizar distintos tipos de trámites que antes se realizaban personalmente, entre otras cuestiones, por medio de la red Internet. Todo esto trae como consecuencia que las diversas técnicas de transmisión utilizadas hasta la fecha sean insuficientes para poder soportar este crecimiento desmedido de ancho de banda solicitado.

El objetivo de este trabajo es exponer y analizar los conceptos de la tecnología DWDM (Multiplexaje Denso por División de Longitud de Onda) como una solución para el incremento del ancho de banda en la transmisión por las fibras ópticas.

El resultado esperado de este trabajo es presentar ventajas de las opciones modernas de tecnología WDM (Wavelength División Multiplexing), que se planea lograr por medio del estudio de la situación actual en el mercado de comunicaciones ópticas, el análisis de necesidades y problemática actual de los sistemas de comunicaciones ópticas modernos y el diseño comparativo de enlace por fibra óptica con opciones diferentes de tecnologías de multiplexaje.

En el primer capítulo de este trabajo se definirán algunos conceptos básicos de un sistema de comunicaciones que nos servirán para comprender y enfocarnos en ciertos aspectos particulares que se abarcan en los capítulos siguientes de un sistema de comunicación en particular.

En el segundo capítulo se hablará de la problemática que se presenta actualmente en los sistemas de comunicaciones ópticas debido al incremento en la demanda del ancho de banda y se presentaran varios métodos de multiplexaje para satisfacer tales demandas, entre las cuales se mostrara que la tecnología WDM es una de las mas viables. Además, se presentan los problemas del desarrollo de esta tecnología.

En el tercer capítulo se explicará en que consiste un sistema de comunicaciones ópticas usando la tecnología WDM o sus opciones modernas DWDM (Dense WDM) y CWDM (Course WDM), de que dispositivos se conforma así como los tipos de fibras empleadas y en que bandas espectrales se trabaja.

En el último capítulo se pretende presentar ejemplos de diseño en los que se muestra una aplicación particular de dos tecnologías de multiplexaje diferentes como SDM (Multiplexaje por División de Espacio) y WDM. Se compararán estos ejemplos de diseño para descubrir las ventajas de la tecnología WDM en general y sus opciones CWDM y DWDM.

1. CONCEPTOS GENERALES DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES

La palabra comunicación esta ligada al concepto de comunidad [1]. El ser humano desde su existencia ha tenido la necesidad de comunicarse; y el desarrollo de la humanidad se ha debido en gran medida a la capacidad de los seres humanos para intercambiar información. Desde principios de la civilización el hombre ha buscado constantemente medios que permitan que dicha información vaya mas allá del alcance normal del oído y de la vista, es decir, que permitan el intercambio de información de un punto a otro en cualquier lugar en donde se encuentren. En la actualidad esos alcances se han logrado (con sus respectivas limitantes) y el desarrollo de las comunicaciones sigue incrementándose enormemente. Un ejemplo de comunicaciones a grandes distancias es la transmisión vía satélite.

Dentro de las comunicaciones, las redes ocupan un papel muy importante y su desarrollo debido a nuevas tecnologías que están siendo creadas indica que este papel será mayor en el futuro. A esta evolución de las comunicaciones, que sigue el ritmo de la transformación de la sociedad, hay que añadir nuevas exigencias como son: la creciente demanda cada vez mayor, respuesta rápida a la solicitud de nuevos servicios, etc.

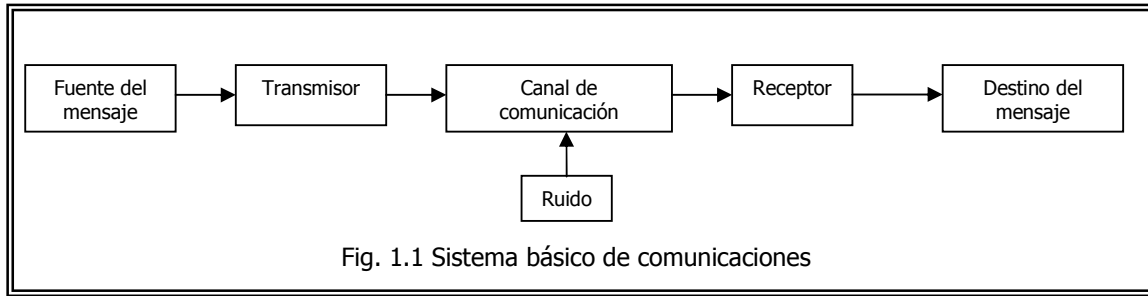
Sin duda las comunicaciones juegan y seguirán jugando un papel muy importante en el desarrollo de la humanidad. Este capítulo esta enfocado a dar los conceptos fundamentales de un sistema de comunicaciones, así como de un esquema general de dicho sistema. También se explicaran algunos conceptos fundamentales de una red de comunicaciones.

Por último nos enfocaremos a hablar de un bloque muy importante dentro del sistema básico de comunicaciones; llamado canal de transmisión; que es el medio por el cual se va a enviar la información. Este medio esta constituido por cables conductores o la atmósfera (se hablara de cada uno de estos elementos).

1.1 SISTEMA BÁSICO DE COMUNICACION

El objetivo de un sistema de comunicaciones es transportar información de un origen a un destino. Dicha información puede estar contenida en una señal eléctrica, en una onda electromagnética o en un haz de luz. Un sistema de comunicaciones básico esta formado por los siguientes elementos: Fuente de información, transmisor, canal de comunicación, receptor y destino (ver figura 1.1). Un factor que interviene en un sistema de comunicaciones es el ruido el cual puede llegar a distorsionar el mensaje. El ruido surge en todos los elementos del sistema [1].

- ♦ **Fuente de información:** Es en donde se generan los datos a transmitir, el cual puede consistir en palabras, imágenes, fotografías, música, etc.
- ♦ **Transmisor:** Normalmente los datos generados por la fuente no se transmiten directamente tal y como son generados por lo tanto el transmisor se encarga de acoplar el mensaje al canal de comunicación.
- ♦ **Canal de comunicación:** El canal de comunicación es la vía de transmisión de la señal, puede ser un par de alambres, un cable coaxial, una fibra óptica o bien el espacio atmosférico.
- ♦ **Receptor:** Es el que se encarga de recuperar el mensaje de la señal recibida, demodulandola si es que ha sido modulada o decodificándola si es que ha sido codificada.
- ♦ **Destino:** Es la persona o maquina a quien va dirigido el mensaje



1.2 SEÑALES DE COMUNICACIÓN

1.2.1 Definición de señal

SEÑAL. Es una magnitud física sobre la cual se apoya la información. Pueden ser: Eléctricas, magnéticas, ópticas y electromagnéticas [2].

1.2.2 Clasificación de las señales

Las señales pueden ser clasificadas dependiendo de diferentes criterios [3]:

- A) **Según el numero de variables independientes que la forman.** Pudiendo ser Unidimensionales o Multidimensionales.
 - I. *Señales Unidimensionales.* Si varían en una sola dimensión, es decir, al representarlas matemáticamente solo existe una variable independiente. Un ejemplo es una señal de audio en donde la variable independiente es el tiempo.
 - II. *Señales Multidimensionales.* Son aquellas en las que sus funciones matemáticas tienen más de una variable independiente. Un ejemplo de este tipo de señales es la de una imagen en donde la variable independiente es la posición $(x,y) = (\text{altura}, \text{anchura})$ de la imagen.
- B) **Según sus características estadísticas.** Pueden ser determinísticas o aleatorias.
 - I. *Determinísticas.* Cuando su valor es predecible en todo instante de tiempo.
 - II. *Aleatorias.* Son aquellas cuyos valores futuros no son predecibles. De este tipo de señales pueden hacerse estudios estadísticos de tal manera que sus valores futuros sean predecibles tan solo en probabilidad.
- C) **Según su naturaleza.** Dependiendo de la naturaleza de las señales tenemos 4 clasificaciones.
 - I. *Señales continuas en amplitud y tiempo (o analógicas).* Son aquellas que presentan una variación continua tanto en amplitud como en el tiempo.
 - II. *Señales continuas en amplitud y discretas en tiempo.* Son aquellas en las que la variable dependiente es continua (toma cualquier valor) y la variable independiente es discreta.
 - III. *Señales discretas en amplitud y continuas en el tiempo.* Son también llamadas señales cuantificadas y son aquellas en las que la variable dependiente es discreta y la independiente continua.
 - IV. *Señales discretas en amplitud y tiempo.* También llamadas señales digitales y corresponden a señales discretas en ambas variables (tanto en amplitud como en tiempo).

1.2.3 Características fundamentales de las señales a transmitir [33]

Las señales transportadas en los sistemas de comunicaciones pueden ser analógicas o digitales. Dentro de dicho sistema una de las características importantes es el ancho de banda de la señal a transmitir y el ancho de banda del canal de comunicación.

El ancho de banda de una señal analógica es el rango de frecuencias que conforman dicha señal y es medida en Hertz (Hz). En cuanto al ancho de banda de las señales digitales para fines más prácticos no se hace referencia a su ancho de banda si no a su velocidad de transmisión por unidad de tiempo (Tasa de transmisión binaria) medida en bits/seg.

El ancho de banda de un canal es el margen de frecuencias que dicho canal es capaz de transmitir. En el caso de los sistemas de transmisión digital aunque lo correcto es hablar de ancho de banda para definir un margen de frecuencias, en este sentido el ancho de banda también suele decirse que es una medición de la máxima capacidad de información digital de un enlace de comunicación. Por tanto, es usual decir que aquellos usuarios de estaciones de trabajo o de redes que utilizan la red de un modo intenso, utilizan un elevado o gran ancho de banda.

Otro parámetro importante a considerar es la calidad de la señal transmitida (o recibida), en el caso de las señales analógicas este parámetro es conocido como la Relación Señal-Ruido (SNR) y en el caso de las señales digitales se le conoce como la Tasa de Error Binaria (BER).

Para que una señal sea transportada por un canal de comunicación generalmente tiene que pasar por un proceso de modulación. La modulación es el desplazamiento de una señal de su banda original hacia frecuencias más altas. Este desplazamiento se hace modificando amplitud, frecuencia o fase de la señal llamada portadora, que generalmente es sinusoidal y que es generada a una alta frecuencia.

1.2.4 Técnicas de modulación.

I) Modulación de las señales analógicas

En un sistema de comunicaciones la transmisión de información puede ser llevada a cabo (en el caso de las señales analógicas) por medio de su frecuencia original, en cuyo caso se conoce como banda base; o puede ser que la información se transporte a través de una frecuencia diferente. A esta última técnica se le llama modulación, en donde la señal original modula en un parámetro específico a la señal de frecuencia mayor (llamada portadora) para que esta a su vez sea transportada.

La señal portadora puede ser modulada en amplitud, en frecuencia o en fase. El primer caso consiste en modificar la amplitud de la onda (esto es, la intensidad de la señal) llamándose modulación por amplitud (AM). Cuando se modifica la frecuencia de una onda a este tipo de modulación se le llama modulación por frecuencia (FM) y por último, cuando se modifica la fase de una onda se le llama modulación por fase (phase modulation, PM). Estas tres técnicas de modulación se usan en la transmisión convencional por radio y televisión; FM y PM se utilizan también en las comunicaciones por satélite [4].

II) Modulación de señales cuantificadas

En ciertas condiciones la información de una señal se puede transmitir conociendo ciertos valores instantáneos de su amplitud sin provocar ninguna pérdida en la información. La toma de estos valores instantáneos se realiza por la operación llamada muestreo. Los valores de esas muestras se puede transmitir por medio de pulsos y en la transmisión de dicho pulso cierto parámetro del mismo (amplitud, ancho o posición) se hace proporcional al valor de la muestra. Por tanto existen tres tipos de modulación del pulso: Modulación de amplitud de pulsos (PAM), Modulación por duración de pulsos (PDM) y Modulación por posición de pulsos (PPM).

En la modulación PAM a cada muestra se le hace corresponder un pulso cuya amplitud es proporcional a la magnitud de la muestra. Los pulsos tienen un ancho y periodo constantes. En la modulación PDM a cada muestra se le hace corresponder un pulso cuya duración es proporcional a la magnitud de la muestra. En la modulación PPM a cada muestra se le hace corresponder un pulso desplazado un tiempo con respecto al instante de muestreo, dichos pulsos tienen amplitud y anchos constantes.

III) Modulación de las señales digitales

En el caso de la transmisión digital a través de una red de comunicaciones se modula una señal analógica continua (es decir, una portadora) de manera que la señal se conforme a los datos digitales que son transmitidos y luego en el receptor se convierte la señal en su forma digital. Este proceso de modulación implica codificar y decodificar los datos para transmitirlos. Estas técnicas de modulación son llamadas modulación por desplazamiento de la amplitud (ASK), modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) y modulación por desplazamiento de fase (PSK) [5].

En la modulación por desplazamiento de amplitud (ASK) se altera la amplitud de una señal conformándola a los datos digitales (0 y 1). Este proceso implica variar el voltaje de la señal mientras la frecuencia se mantiene constante. Una amplitud se usa para representar un 0 binario y una segunda amplitud se usa para representar un 1 binario.

En la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) altera la frecuencia de una señal para adecuarla a los datos digitales (0 y 1). En este caso la amplitud se mantiene constante. Una frecuencia se usa para representar un 0 binario y una segunda frecuencia se usa para representar un 1 binario [5].

En la modulación por desplazamiento de fase (PSK) se modifica el ángulo de fase de la onda portadora con base en los datos digitales que son transmitidos. Los cambios en el ángulo de fase son los que comunican los datos en una señal modulada por fase [5].

IV) Modulación por Espectro Esparcido

Existe una forma de modular las señales digitales por medio de la modulación de espectro esparcido. Spread Spectrum Modulation (SSP) es una técnica en la cual la onda modulada ocupa un ancho de banda mucho mayor que el mínimo ancho de banda requerido para transmitir información en las portadoras. Existen varias razones para utilizar esta técnica de las cuales, un punto en común es el rechazo de interferencia de canales, es decir, la información se transmite de tal manera que nos sea intervenida tan fácilmente y que sea confiable. Este tipo de modulación se utilizó primero en comunicaciones militares, ahora es

empleada en sistemas de posición global, teléfonos móviles y en sistemas de comunicación personal [5].

1.3 RED DE COMUNICACIONES

En un sistema de comunicaciones la transmisión de información entre los dispositivos forman un arreglo particular llamado red, en donde varios elementos se comunican entre si para el intercambio de dicha información. A continuación se hablará de lo que es una red y de algunos tipos de redes que existen.

1.3.1 ¿Qué es una red?

RED: Una red es conjunto de objetos interconectados entre si y que transfieren información. Una red puede estar constituida por personas, teléfonos, televisiones, radios, computadores, etc. La red posibilita la transferencia de información entre usuarios y dispositivos. Dicha información transmitida puede ser voz, datos, e-mail, video o una combinación de estas. Las redes pueden estar unidas por cable, líneas de teléfono, ondas de radio, satélites, etc.

1.3.2 Clasificación de una red por su cobertura

Una red se puede clasificar dependiendo del área geográfica que ocupa. Su clasificación es la siguiente [6]:

- **LAN** (LOCAL AREA NETWORK)
- **MAN** (METROPOLITAN AREA NETWORK)
- **WAN** (WIDE AREA NETWORK)
- **GAN** (GLOBAL AREA NETWORK)

REDES DE AREA LOCAL (LAN)

Una red LAN son redes dentro de un solo edificio o campus de unos pocos kilómetros de extensión (aproximadamente hasta 2 Kilómetros). Se utilizan para conectar computadoras personales y estaciones de trabajo en oficinas y fábricas con el objetivo de compartir recursos tales como impresoras y también para poder intercambiar información.

La tecnología de transmisión que utilizan estas redes consiste en un cable sencillo en el cual están conectadas todas las máquinas. La velocidad de transmisión es del orden de los Megabits por segundo.

La LAN más difundida que es la Ethernet utiliza un mecanismo denominado Call Sense Multiple Access-Collision Detect (CSMA-CD) que significa que cada equipo conectado sólo puede utilizar el cable cuando ningún otro equipo lo esta utilizando, de existir un conflicto, el equipo que esta intentando la conexión efectúa un nuevo intento más adelante.

REDES DE AREA METROPOLITANA (MAN)

Es más grande que una red LAN (aproximadamente hasta los 100 Km) y se basa en una tecnología similar. Una red de área metropolitana cubre extensiones mayores como puede ser una ciudad o un distrito. Interconecta varias redes LAN para la distribución de información a los diferentes puntos de la ciudad. Un ejemplo donde se utiliza este tipo de red es una biblioteca o Universidad.

REDES DE AREA AMPLIA (WAN)

Este tipo de red es de tamaño superior a una MAN (aproximadamente hasta los cientos de kilómetros). Las redes de área extensa o amplia cubren grandes regiones geográficas como un país o un continente. Es la interconexión de redes de área metropolitana. Los satélites se utilizan para enlazar este tipo de redes.

REDES DE ÁREA GLOBAL (GAN)

Este tipo de redes es mucho más extenso que las anteriores, ya el área geográfica que cubre se extiende de tal forma que abarca todo el planeta, es decir enlaza todos los continentes.

1.3.3 Clasificación de las redes por su topología

Las redes también se caracterizan por la forma en que se encuentran conectadas entre sí. Las principales topologías son las que se muestran a continuación, aunque se han creado nuevas topologías que son combinaciones de las topologías básicas [6].

Topología de Anillo. La arquitectura de anillo consiste en la conexión de los elementos en un ciclo cerrado. Esta topología enlaza el tráfico (voz o datos) de tal manera que regresen a su punto original. Ninguno de los nodos controla totalmente el acceso de la red. Si una de las estaciones falla la red no puede seguir trabajando. En la fig. 1.2 se muestra una configuración básica de una red con topología de anillo.

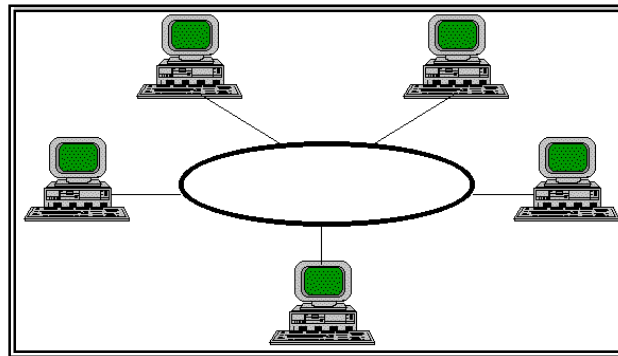


Fig. 1.2 Topología de anillo. En este caso si una estación falla la red deja de funcionar

Topología de Árbol. Esta topología como su nombre lo indica tiene la forma de un árbol. Esta arquitectura es la forma más eficiente de distribuir el mismo conjunto de señales de comunicación a múltiples terminales. En la fig. 1.3 se muestra este tipo de topología. Los sistemas de televisión por cable han sido desarrollados utilizando esta arquitectura.

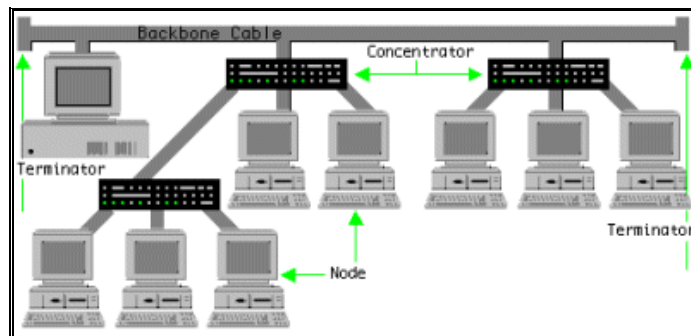


Fig. 1.3 Topología de árbol.

Topología de estrella. Todas las estaciones están conectadas por separado a un centro de comunicaciones o nodo central que concentra el tráfico de la información. Si el nodo central se cae la red deja de funcionar. Este tipo de red tiene la ventaja de que se puede aumentar su tamaño dependiendo de las necesidades que tengamos. En la figura 1.4 se muestra esta arquitectura. Es la más típica configuración que se utiliza en las compañías telefónicas.

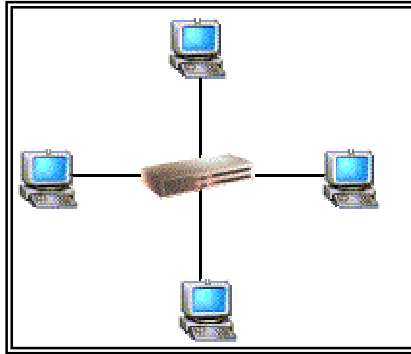


Fig. 1.4 Topología tipo estrella. Si el nodo central se cae la red deja de funcionar

1.3.4 Transmisión de información en las redes de comunicación

Además del área geográfica y la topología, las redes pueden también clasificarse por el tipo de trayectoria de las comunicaciones que usan y la manera en que los datos son transmitidos. Existen por tanto dos clasificaciones que son: Red de circuito conmutado y la red de paquete conmutado [6].

En una **red de circuito conmutado** se establece un circuito físico dedicado entre los nodos fuente y destino. El sistema telefónico es un ejemplo de una red de circuito conmutado. Cuando se realiza una llamada telefónica se establece una trayectoria de comunicación física directa entre el aparato telefónico y el receptor. Esta trayectoria es una conexión punto a punto que interconecta los conmutadores de la compañía de teléfonos, que están localizados por toda la red telefónica. Una vez establecida esta comunicación, el circuito se dedica exclusivamente a la transmisión; cuando dicha transmisión es finalizada es entonces cuando el circuito es liberado, quedando disponible para otra transmisión de comunicación. Una característica de la conmutación de circuitos es que permite la utilización de los mismos circuitos para diferentes transmisores, aunque esto no se lleva a cabo al mismo tiempo ya que como se menciona, durante una transmisión particular el canal de comunicación esta reservado exclusivamente para ese par emisor-receptor específico.

En una **red de paquete conmutado** los mensajes son subdivididos en mensajes más pequeños llamados paquetes. Un paquete representa la unidad de datos más pequeña que puede ser transferida a través de una red dada. Cada paquete lleva la dirección del nodo destino, así como una secuencia de números; a diferencia de una red de circuito conmutado en donde sólo el primer mensaje de datos lleva la dirección del destino. Los paquetes son enviados al nodo destino uno a la vez por medio de conmutadores intermedios en donde el nodo destino especificado es responsable de reensamblarlos en el orden correcto. Cuando un paquete llega a un conmutador intermedio, éste examina la dirección de destino del paquete para determinar qué trayectoria debe de tomar el paquete hacia el siguiente conmutador. Esta técnica de conmutación, en la que los datos son almacenados en un nodo de un enlace punto a punto y luego son enviados al siguiente nodo repetidamente en ruta al nodo destino, se llama almacenar y enviar. En este tipo de red en vez de utilizarse un circuito físico dedicado utiliza un

canal de comunicación por medio de un circuito virtual que no es más que una trayectoria lógica de comunicación en vez de una física. En esta trayectoria virtual todos los paquetes son transportados a lo largo de la misma trayectoria, como si fuera un circuito dedicado. La diferencia es que los enlaces dentro de este circuito pueden ser usados también para otras transmisiones al mismo tiempo. Además de los circuitos virtuales se puede usar un mecanismo de transporte de datagramas, en el cual los paquetes son transmitidos independientemente uno de otro en cualquier momento. Por tanto los paquetes no son transmitidos necesariamente en un orden específico.

1.4 MEDIOS DE TRANSMISIÓN

Un canal de transmisión es cualquier medio por el cual se pueda transportar información. Los canales de transmisión se pueden clasificar en dos tipos: Los guiados y los no guiados ó inalámbricos

Para efectuar dicha transmisión se tienen que utilizar técnicas de transmisión que permitan transportar la señal por ese medio.

1.4.1 Medios de transmisión guiados

Son aquellos que necesitan de un medio físico para que se puedan transmitir los datos y de los cuales encontramos los siguientes: **par trenzado, cable coaxial, guías de onda y fibra óptica.**

1.4.1.1 Par trenzado [7]

La transmisión de información a través del cable de par trenzado es aún muy utilizada debido a su bajo costo, flexibilidad, fácil conexión ya que en muchos edificios el cableado ya se encuentra instalado; por lo que ya no sería necesario gastar en la infraestructura.

La transmisión de este tipo de cables se lleva a cabo en distancias cortas, debido a que por sus características eléctricas a distancias largas la señal sufriría una atenuación demasiado grande para poder ser captada. Su utilización por lo general es en las redes LAN y las velocidades de transmisión típicas son de 10 Mbps y de 100 Mbps.

Este tipo de cables esta constituido por dos conductores de cobre aislados por papel o plástico y se le llama así por estar trenzados en pares. El trenzado se realiza con el fin de eliminar las interferencias electromagnéticas, el ruido y la diafonía. Esta última conocida también como crosstalk (en inglés) es el ruido producido por el acoplamiento entre dos señales, por tanto al trenzar los cables el campo electromagnético producido por un cable será cancelada por el campo electromagnético producido en oposición por el otro cable.

El cable de par trenzados se utiliza en distancias cortas debido a que la señal se atenúa y se necesita de repetidores para regenerarla. Se utiliza tanto para transmisión analógica como digital. Un ejemplo de este tipo de cable es para las conexiones telefónicas. En la figura 1.5 se muestra la constitución del par trenzado.

Se clasifica en dos tipos: Cable de par trenzado sin blindar (UTP) y cable de par trenzado blindado (STP).

El cable **UTP (Unshielded twisted pair)** no cuenta con revestimiento o blindaje entre la cubierta exterior y los cables. Un cable de par trenzado puede tener pocos o muchos pares, en transmisión de datos lo común es que estén compuestos de 4 pares. Se clasifica en

categorías y la cantidad de datos a transmitir depende de la categoría en la que se encuentre. En la figura 1-7 se muestra un cable de par trenzado UTP.

El cable **STP (Shielded Twisted Pair)** tipo de cable se diferencia del UTP debido que cuenta con un blindaje especial que permite tener mejor protección en cuanto a las interferencias electromagnéticas y a la diafonía. En cuanto al costo, es un poco más caro que el cable UTP debido a las mejores protecciones que proporciona. Por ser más grueso su instalación se dificulta un poco más. Por lo general su velocidad de transmisión es superior a los 100 Mbps y su aplicación es para lugares en donde existan ambientes industriales ruidosos.

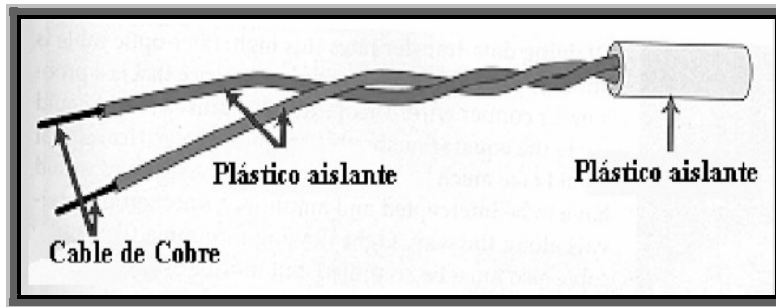


Fig. 1.5 Cable de par trenzado

1.4.1.2 Cables coaxiales [7]

Este tipo de cable minimiza las limitantes de un cable de par trenzado aunque su instalación es más complicada. En el par trenzado conforme aumenta los datos a transmitir (frecuencia) la corriente que circula por los alambres tiende a fluir sólo por la superficie exterior del alambre y esto ocasiona que aumente la resistencia eléctrica de los mismos lo que lleva a una atenuación mayor. El cable coaxial está compuesto de un conductor central rodeado de un material aislante que a su vez está rodeado por una malla fina de hilos de cobre o aluminio. Todo el cable está rodeado por un aislamiento que le sirve de protección para reducir las emisiones eléctricas. La malla aísla al conductor central de las señales de interferencia externas y las pérdidas por conducción superficial son mínimas; es por ello que el cable coaxial se utiliza para la transmisión de datos a frecuencias más altas que las del par trenzado aunque su costo es mucho mayor. Por todo lo anterior se puede decir que las ventajas de este tipo de cable son: Menor susceptibilidad a las interferencias electromagnéticas, a la diafonía y cubre distancias de transmisión mayores a las del par trenzado.

Es muy utilizado para la transmisión de señales de televisión. En la figura 1.6 se muestra el esquema de un cable coaxial. Comúnmente este tipo de cables se utiliza en la transmisión de radiofrecuencias (RF)

Existen dos tipos de cable coaxial: Los de **banda base** y los de **banda ancha**.

El **cable coaxial de banda base** sirve para la transmisión de una sola señal digital, dicha señal ocupa todo el espectro a través del cual es posible transmitir el cable coaxial. Cuenta con una buena inmunidad al ruido y su impedancia es de 50 Ohms. Su tasa de transmisión es de 10 Mbps y pueden alcanzar en una distancia de 1 Km velocidades de transmisión de hasta 2 Gbps.

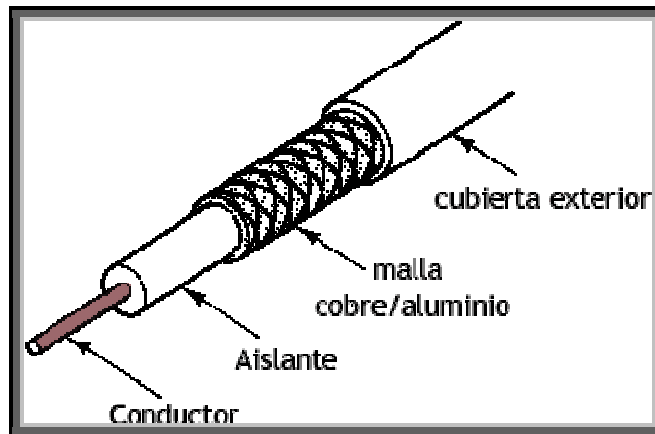


Fig. 1.6 Estructura física de un cable coaxial

La IEEE 802.3 estandarizó a los cables coaxiales de banda base en dos tipos: 10BASE2 y 10BASE5 en donde el primer número indica la tasa de transmisión en Mbps, la palabra BASE indica que es de banda base y el último número indica la longitud máxima del cable multiplicado por 100.

El **cable coaxial de banda ancha** es utilizado para transmisiones analógicas y cuenta con un ancho de banda de 300 a 400 MHz a 100 Km. Este tipo de cable permite la transmisión de video, audio y datos a la vez. Su costo es un poco más elevado que el cable coaxial de banda base y requiere de mucho mantenimiento.

Una de las aplicaciones de este tipo de cable coaxial es para el sistema: **CATV** (Community Antena Televisión) el cuál es un sistema de comunicaciones que permite la distribución simultánea de varios canales de televisión hacia los clientes mediante cable coaxial.

1.4.1.3 Guías de onda

Las guías de onda son estructuras huecas rectangulares y circulares que permiten transmitir señales electromagnéticas en su interior y hacen posible el transporte de los campos eléctricos y magnéticos. En frecuencias altas los cables coaxiales sufren atenuaciones muy elevadas que impiden que la transmisión sea adecuada, especialmente de señales cuyas longitudes de onda son del orden de los centímetros, esto es, microondas. Las guías de onda se utilizan en estas frecuencias de microondas ya que presentan poca atenuación para el manejo de señales de alta frecuencia.

La transmisión en las guías de onda se inicia a partir de ciertas frecuencias, cuyo valor depende de la geometría y dimensiones de la guía. A esta frecuencia mínima a partir de la cual es posible que la información viaje se le denomina frecuencia de corte.

Los modos de propagación en las guías son de dos tipos: TE (Transversal Eléctrico) y TM (Transversal Magnético). El primero indica que solo el campo eléctrico es perpendicular a la dirección axial a lo largo de la guía, el segundo nos dice que el campo magnético es el que se mantiene perpendicular. Existen las guías de onda rectangulares y las guías de onda circulares.

Guías de onda rectangulares [32]

En una guía de onda rectangular la atenuación de la señal disminuye a medida que se aumenta la frecuencia. Esto es al contrario de lo que sucede en un cable coaxial, en donde la atenuación aumenta progresivamente con la frecuencia. En el caso de la guía de onda rectangular, esta atenuación disminuye conforme la frecuencia aumenta hasta cierto valor de frecuencia de trabajo, a partir del cual la atenuación comienza a ascender otra vez. Se utiliza en tramos cortos debido a su rigidez ya que no se puede doblar.

Las ecuaciones que rigen una guía de onda rectangular son obtenidas con base a las ecuaciones de Maxwell.

Recordando las ecuaciones de Maxwell

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot D = \rho$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

Donde:

E = Campo eléctrico

H = Campo magnético

J = Densidad de corriente de conducción

D = Densidad de flujo eléctrico

B = Densidad de flujo magnético

ρ = Densidad de carga

Con base a estas ecuaciones se desarrollan las ecuaciones de onda en coordenadas rectangulares. Para la solución de dichas ecuaciones se aplican condiciones de frontera que son:

- Los campos eléctricos deben terminar normalmente en el conductor, ya que la componente tangencial del campo eléctrico debe ser cero.
- Los campos magnéticos deben estar enteramente tangenciales a lo largo de la superficie de la pared, esto es, que la componente normal del campo magnético debe ser cero.

Al desarrollar un método de solución en específico para ondas TE en una guía de onda rectangular hueca (figura 1.7), considerando para el espacio libre de carga ($\rho = 0$) y la dirección de propagación el eje x , se obtienen las soluciones para las componentes de campo de la guía rectangular hueca de ancho z_1 y altura y_1 :

$$H_x(y, z, x, t) = H_0 \cos \frac{n\pi y}{y_1} \cos \frac{m\pi z}{z_1}$$

$$H_y = \frac{\gamma H_0}{k^2} \frac{n\pi}{y_1} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{y_1} \cos \frac{m\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

$$H_z = \frac{\gamma H_0}{k^2} \frac{m\pi}{z_1} \cos \frac{n\pi y}{y_1} \operatorname{sen} \frac{m\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

$$E_x = 0$$

$$E_y = \frac{\gamma Z_{yz} H_0}{k^2} \frac{m\pi}{z_1} \cos \frac{n\pi y}{y_1} \operatorname{sen} \frac{m\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

$$E_z = -\frac{\gamma Z_{yz} H_0}{k^2} \frac{n\pi}{y_1} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{y_1} \cos \frac{m\pi z}{z_1} e^{-\gamma x}$$

Donde:

H_0 = una constante

γ = constante de propagación

Z_{yz} = impedancia de onda transversal

$$k^2 = \gamma(\gamma - YZ_{yz})$$

Y = Admitancia

m y n son enteros (0, 1, 2, 3, ...)

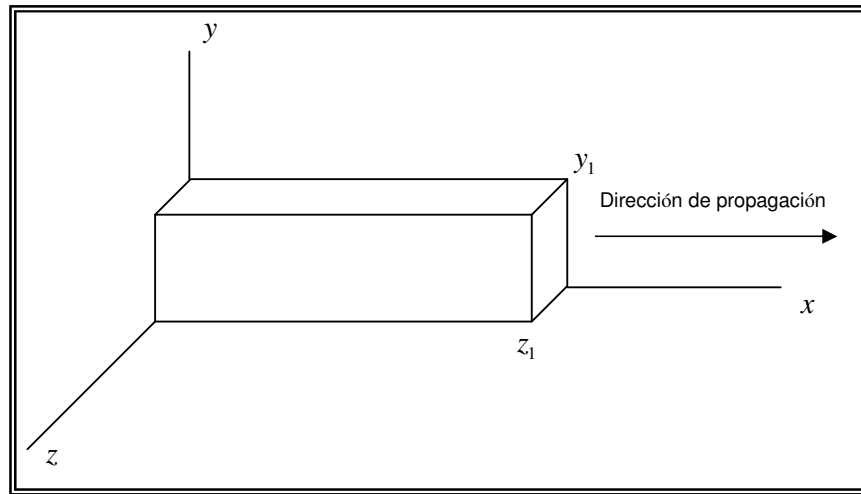


Fig. 1.7 Coordenadas para guía de onda rectangular hueca

Cada combinación de valores m y n representa una configuración diferente de campo o modo de la guía. Como se está hablando de modos TE es conveniente designarlos agregando

el subíndice mn de manera que, en general, cualquier modo TE puede ser designado con la notación TE_{mn} , donde m es el número de variaciones de semiciclo de cada componente de campo en la dirección z y n es el número de variaciones de semiciclo de cada componente de campo en la dirección y .

De igual manera desarrollando métodos algebraicos se obtiene la frecuencia de corte f_c y la longitud de onda de corte λ_{oc} para cualquier modo TE_{mn} en una guía rectangular hueca. Se deduce también que a frecuencias bajas la onda no se propaga y a frecuencias altas la onda si se propaga y que existe una frecuencia intermedia f_c que es la frecuencia de transición.

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{n}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{m}{z_1}\right)^2} \quad (\text{Hz})$$

$$\lambda_{oc} = \frac{2}{\sqrt{(n/y_1)^2 + (m/z_1)^2}} \quad (\text{m})$$

Donde:

μ = permeabilidad del medio

ϵ = permitividad del medio

Guías de onda circulares [32]

Cuentan con atenuación muy baja a frecuencias elevadas en la banda de 40-110 GHz. Es un conducto flexible de unos cuantos centímetros de diámetro el cual puede doblarse sin excesivas reflexiones, caso contrario de la guía de onda rectangular que es más rígida. Estos sistemas tienen un costo muy elevado comparado con otros medios de transmisión.

Las guías de onda circulares tienen aplicaciones muy específicas e importantes. En particular, son útiles en los sistemas de radar y en la fabricación de muchos dispositivos de microondas que requieren de una unión que gire libremente, tales como atenuadores y cambiadores de fase. Son muy importantes para alimentar sistemas de microondas terrestres, estaciones terrenas transmisoras y receptoras, satélites de comunicación, etc.

De igual manera que en las guías de ondas rectangulares huecas se utilizan las ecuaciones de Maxwell para obtener las ecuaciones en coordenadas cilíndricas de una guía de onda cilíndrica hueca de radio r_0 y cuya dirección de propagación es el eje z (Figura 1.8).

Se considera que las paredes del cilindro son perfectamente conductoras, el medio interior sin pérdidas ($\sigma = 0$) y además de no tener carga ($\rho = 0$). Las ecuaciones generales para una onda de modo TE en una guía cilíndrica son:

$$E_r = \frac{n\gamma H_0 Z_{r\phi}}{k^2 r} \text{sen } n\phi J_n(kr) e^{-\gamma z} = Z_{r\phi} H_0$$

$$E_\phi = \frac{\gamma H_0 Z_{r\phi}}{k^2} \cos n\phi \frac{dJ_n(kr)}{dr} e^{-\gamma z} = -Z_{r\phi} H_r$$

$$E_z = 0$$

$$H_r = \frac{-\gamma H_0}{k^2} \cos n\phi \frac{dJ_n(kr)}{dr} e^{-\gamma z}$$

$$H_\phi = \frac{n\gamma H_0}{k^2 r} \sin n\phi J_n(kr) e^{-\gamma z}$$

$$H_z = H_0 \cos n\phi J_n(kr) e^{-\gamma z}$$

Donde:

n es un entero

$$k = \sqrt{\gamma^2 + ZY}$$

$H_0 = \text{Constante} / j$

$\gamma = \text{constante de propagación}$

r y ϕ son las coordenadas polares

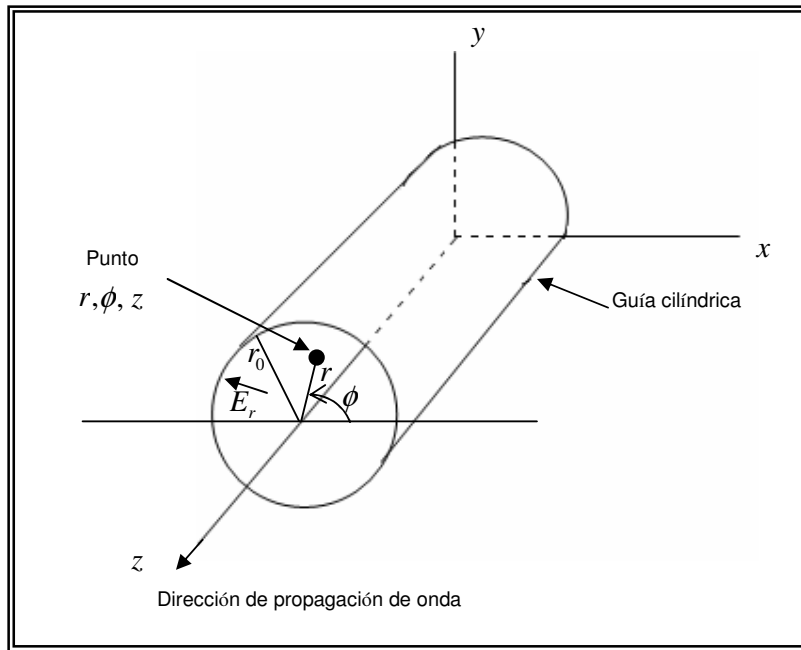


Fig. 1.8 Coordenadas para guía de onda cilíndrica

Aplicando las condiciones de frontera $E_\phi = 0$ en $r = r_0$ se tiene como consecuencia que

$$k = \frac{k'_{nr}}{r_0}$$

Donde k'_{nr} es la raíz r -ésima de la derivada de la función de Bessel de orden n -ésimo. En general, un modo TE en una guía cilíndrica se designa como TE_{nr} donde el subíndice n indica el orden de la función de Bessel y r indica el rango de la raíz.

Igual que para las guías de onda rectangulares se obtiene la frecuencia de corte y la longitud de onda de corte de una guía de onda cilíndrica.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \frac{k'_{nr}}{r_0} \quad (\text{Hz})$$

$$\lambda_{oc} = \frac{2\pi r_0}{k'_{nr}} \quad (\text{m})$$

1.4.1.4 Fibra óptica [7]

Los cables de fibra óptica transportan los datos transmitidos en forma de un haz de luz el cual viaja a través de una fibra de vidrio a diferencia de los medios de transmisión anteriores en la cual son señales eléctricas las que viajan a través de un alambre. Las ondas de luz tienen un ancho de banda mayor a la de las ondas eléctricas lo que hace que por una fibra se transmitan mayores cantidades de información.

La fibra óptica consiste en un cable compuesto por fibras de un tipo especial de vidrio. Cada filamento esta constituido por un núcleo central de plástico o cristal con un alto índice de refracción cuyo diámetro varía entre 8, 50 y 6.25 micras. Dicho núcleo esta rodeado a su vez con una capa de material similar pero con un índice de refracción ligeramente menor llamada revestimiento cuyo diámetro estándar es de 125 micras. Después del revestimiento, la fibra tiene una cubierta de protección. En la figura 1.9 se muestra el esquema de un cable de fibra óptica.

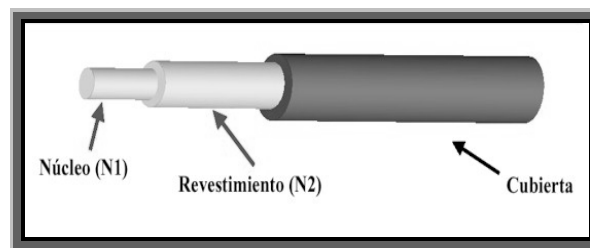


Fig. 1.9 Esquema de un cable de fibra óptica

Este medio de transmisión es más seguro en cuanto a las interferencias electromagnéticas y sufre menor atenuación que los anteriores ya que su atenuación es independiente de la frecuencia. Su distancia entre repetidores es mucho mayor y permite un mayor ancho de banda. Se utiliza para la transmisión de voz, datos, imagen y video. Su rango de frecuencias es todo el espectro visible y parte del infrarrojo.

El cómo se propague la luz a través de un cable de fibra óptica depende del **modo de propagación** y el **perfil del índice de la fibra**. En lo que respecta al **modo de propagación** (trayectoria), si existe una sola trayectoria que la luz toma durante su viaje a

través de la fibra se llama *monomodo* (*modo sencillo*). Si existe más de una trayectoria se llama *multimodo*. En cuanto al **perfil del índice** se refiere al valor del índice refractivo a través de la fibra. Existen dos tipos básicos de perfiles de índice: de escalón y graduado. Una fibra de índice escalón esta compuesta por un núcleo central cuyo índice refractivo es uniforme. Dicho núcleo esta rodeado por una cubierta exterior con un índice refractivo también uniforme pero menor al del núcleo central. En una fibra de índice graduado no existe cubierta y el índice refractivo del núcleo no es uniforme, esta mas alto en el centro y disminuye gradualmente con la distancia hacia el borde exterior.

De acuerdo a lo anterior existen tres configuraciones básicas en la transmisión de fibra óptica: Fibra monomodo convencional (de índice de escalón), fibra multimodo de índice de escalón y fibra multimodo de índice graduado.

Leyes de reflexión y de refracción de Snell y reflexión total interna [32]

Considerando una onda plana polarizada linealmente que incide en forma oblicua en una frontera entre dos medios. La onda incidente del medio 1 forma un ángulo θ_i con el eje y , la onda reflejada (medio 1) forma un ángulo θ_r con el eje y y la onda transmitida forma un ángulo de θ_t con el eje y negativo como se muestra en la figura 1.10.

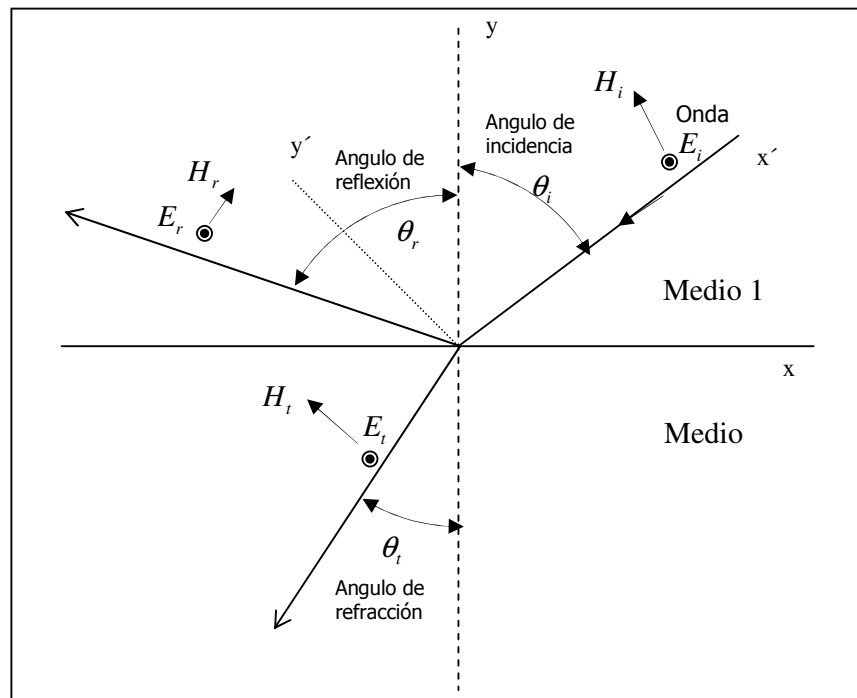


Fig. 1.10 Geometría en el plano de incidencia (plano xy) para una onda polarizada linealmente con incidencia oblicua y para polarización perpendicular. La dirección z es hacia fuera de la página.

Se observa de la figura anterior los ejes $x'y'$ ortogonales con el eje x' orientado a lo largo de la dirección de la onda incidente.

Se va a considerar el caso en el que el campo eléctrico es perpendicular al plano de incidencia (el plano xy). Al realizar ciertos procesos algebraicos y empleando los coeficientes de reflexión y de transmisión de Fresnell tenemos las siguientes ecuaciones de onda en forma

exponencial, donde los campos reflejados de la onda se denotan por (E_r, H_r) y los campos transmitidos por (E_t, H_t) .

$$E_i = \hat{z} E_0 \exp[j\beta_1(x \text{ sen } \theta_i + y \cos \theta_i)]$$

$$H_i = \left(-\hat{x} \cos \theta_i + \hat{y} \text{ sen } \theta_i \right) \frac{E_0}{Z_1} \exp[j\beta_1(x \text{ sen } \theta_i + y \cos \theta_i)]$$

$$E_r = \hat{z} \rho_{\perp} E_0 \exp[j\beta_1(x \text{ sen } \theta_r - y \cos \theta_r)]$$

$$H_r = \left(\hat{x} \cos \theta_r + \hat{y} \text{ sen } \theta_r \right) \rho_{\perp} \frac{E_0}{Z_1} \exp[j\beta_1(x \text{ sen } \theta_r - y \cos \theta_r)]$$

$$E_t = \hat{z} \tau_{\perp} E_0 \exp[j\beta_2(x \text{ sen } \theta_t + y \cos \theta_t)]$$

$$H_t = \left(-\hat{x} \cos \theta_t + \hat{y} \text{ sen } \theta_t \right) \tau_{\perp} \frac{E_0}{Z_2} \exp[j\beta_2(x \text{ sen } \theta_t + y \cos \theta_t)]$$

Donde $\hat{x}$, $\hat{y}$ y $\hat{z}$ son los vectores unitarios en dirección del eje x , y y z respectivamente.

$\rho_{\perp}$ = coeficiente de reflexión para una onda perpendicularmente polarizada

$\tau_{\perp}$ = coeficiente de transmisión para una onda perpendicularmente polarizada

β = constante de fase

Las condiciones de frontera son como sigue: (1) las componentes tangenciales de los campos eléctricos en ambos medios deben ser iguales en $y=0$ y (2) las componentes tangenciales de los campos magnéticos en ambos medios deben ser iguales en $y=0$.

Tomando como base la condición (1) y utilizando las ecuaciones E_i , E_r y E_t tenemos que:

$$\exp(j\beta_1 x \text{ sen } \theta_i) + \rho_{\perp} \exp(j\beta_1 x \text{ sen } \theta_r) = \tau_{\perp} \exp(j\beta_2 x \text{ sen } \theta_t)$$

Considerando la ecuación que relaciona el coeficiente de reflexión y de transmisión $1 + \rho_{\perp} = \tau_{\perp}$. Se sigue que los argumentos de las exponenciales todos son iguales, por lo que

$$\beta_1 \text{ sen } \theta_i = \beta_1 \text{ sen } \theta_r = \beta_2 \text{ sen } \theta_t$$

De la primera igualdad se tiene

$\theta_r = \theta_i$ es decir, el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, esta es llamada la **Ley de reflexión de Snell**.

Utilizando la segunda igualdad y empleando la ley de reflexión de Snell se tiene

$$\text{sen } \theta_t = \frac{n_1}{n_2} \text{ sen } \theta_i$$

Esta ecuación es conocida como la **ley de refracción de Snell** donde n_1 y n_2 , donde n_1 es el índice de refracción del medio 1 y n_2 el índice de refracción del medio 2.

Tomando en cuenta la condición de frontera (2) y empleando H_i, H_r y H_t junto con una de las ecuaciones descrita anteriormente $\beta_1 \sin \theta_i = \beta_1 \sin \theta_r = \beta_2 \sin \theta_t$ y $1 + \rho_{\perp} = \tau_{\perp}$ tenemos

$$\rho_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{(\epsilon_2/\epsilon_1) - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{(\epsilon_2/\epsilon_1) - \sin^2 \theta_i}}$$

Si se considera que el medio 2 es un dieléctrico más denso que el medio 1 $\epsilon_2 > \epsilon_1$ la cantidad bajo la raíz cuadrada será positiva y $\rho_{\perp}$ será real. No obstante si la onda incide del medio más denso hacia el medio menos denso $\epsilon_1 > \epsilon_2$, y si $\sin^2 \theta_i \geq \epsilon_2/\epsilon_1$, entonces $\rho_{\perp}$ se vuelve complejo y $|\rho_{\perp}| = 1$. En estas condiciones, la onda incidente se refleja totalmente en forma interna hacia el medio más denso.

El ángulo incidente para el que $\rho_{\perp} = 1 \angle 0^\circ$ se llama ángulo crítico θ_{ic} de tal manera que

$$\theta_{ic} = \sin^{-1} \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \text{ang} \sin \frac{n_2}{n_1}$$

El principio de **reflexión total interna** nos dice: Cuando la onda incide de un medio más denso ópticamente a otro menos denso ópticamente con un ángulo igual o mayor que el ángulo crítico, la onda será reflejada totalmente en forma interna y será acompañada también por una onda superficial en el medio menos denso.

Este fenómeno de reflexión total interna es el que se utiliza en la transmisión de la luz por fibra óptica. El haz de luz que contiene la información viaja a través de la fibra por medio de reflexiones como se muestra en la figura 1.11, sin pérdidas debidas a reflexión.

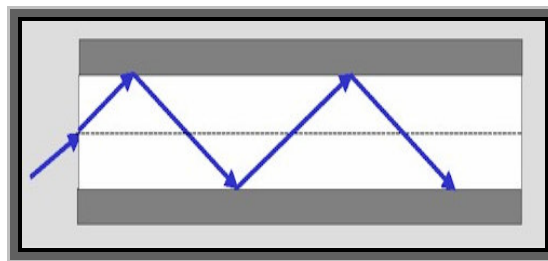


Fig. 1.11 Haz de luz viajando a través de una fibra óptica por medio del fenómeno de reflexión total interna

1.4.2 Medios de transmisión no guiados ó inalámbricos [5]

La transmisión de información inalámbrica se lleva a cabo por ondas electromagnéticas que viajan en el espacio. Gracias a la teoría de las ondas electromagnéticas del físico escocés James Clerk Maxwell quien concluyó que la energía eléctrica y magnética generada por la variación de un campo de alguno de los dos tipos podía viajar en forma de ondas transversales propagándose por el vacío a la velocidad de la luz.

Poco después el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz logro generar tales ondas en el laboratorio y observo que no eran mas que descargas eléctricas que creaban un fuerte campo eléctrico, parte de cuya energía era radiada en forma de ondas electromagnéticas.

Debido a que las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz (aproximadamente 300 000 Km/s) existe una relación entre la longitud de onda y la frecuencia dada en la ecuación siguiente: $c = \lambda f$, en donde c es la velocidad de la luz, λ es la longitud de onda, f es la frecuencia de la señal.

Las características de las ondas electromagnéticas dependen de las frecuencias de las señales propagadas. Estas ondas se transmiten por medio de una antena y son recibidas por otra antena. Existen dos configuraciones para la transmisión y recepción de dichas ondas: direccional y omnidireccional. En la direccional toda la energía se concentra en un haz que es emitida en una cierta dirección por lo que el emisor y el receptor deberán de estar alineados. En la omnidireccional la energía es dispersada en múltiples direcciones por lo que varios receptores pueden captarla.

El espectro utilizable de radiación electromagnética se extiende desde un rango de frecuencias que va desde los 100 Hz hasta frecuencias más arriba de los 10^{20} Hz (rayos X). Dentro de las altas frecuencias encontramos la radiación infrarroja, la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos Gamma (Figura 1.12). Este espectro se divide en bandas de frecuencias y cada una de estas tiene una aplicación dentro de la transmisión de información.

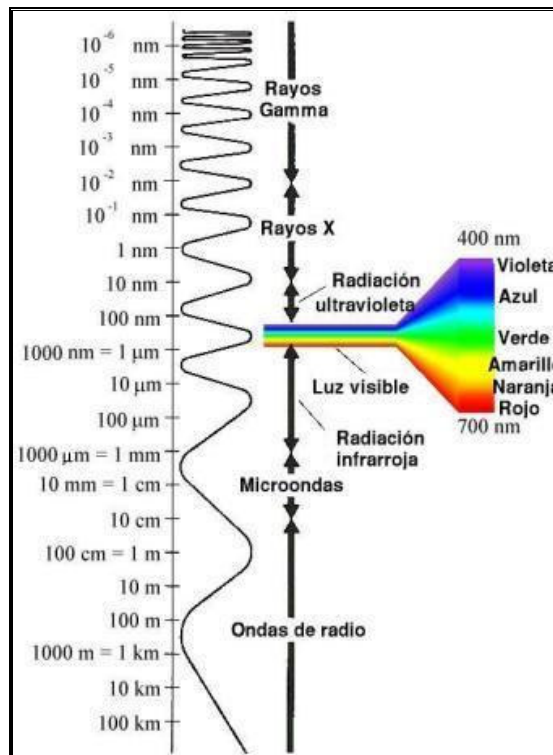


Fig. 1.12 Espectro electromagnético

Dentro de los medios inalámbricos los medios de transmisión que se encuentran son: **Ondas de radio, Microondas (terrestres y satelitales) y Transmisión infrarroja.**

1.5 CONCLUSIONES

Es importante dar a conocer los fundamentos de un sistema de comunicaciones, ya que nos ayudan a manejar conceptos y terminologías que nos sirven como apoyo para poder visualizar de una manera más clara que punto específico de las mismas estamos manejando en ciertos casos concretos.

En un caso particular se habla de los medios de transmisión que actualmente nos ofrecen la capacidad de ser el medio por el cual se va a transmitir información de un punto a otro. Cada uno de estos medios de transmisión cuenta con características específicas que los hacen importantes dependiendo de las necesidades de un sistema de comunicaciones en particular. Cada uno de estos cuenta con diferentes capacidades referentes a la cantidad de información que pueden transmitir y al alcance (distancia) de transmisión.

En un caso concreto dentro de los medios de transmisión guiados encontramos la fibra óptica, que cuenta con ventajas significativas comparadas con otros medios guiados en cuanto a la cantidad de información que se puede enviar a través de ésta (gracias al ancho de banda total grande ofrecida en el espectro óptico) y a su vez a la distancia de transmisión que se puede lograr (gracias a la atenuación pequeña por la reflexión total interna en fibra óptica).

2. PROBLEMÁTICA ACTUAL

2.1 CRECIMIENTO EN LA DEMANDA DE ANCHO DE BANDA

No cabe duda que las Telecomunicaciones han estado en un constante estado de evolución y que han presentado una mejora significativa desde los años 80's. Nuevos servicios tales como Internet, video, multimedia, e-mail, etc, han permitido que los seres humanos interaccionen mas fácilmente en cuestiones de negocios, entretenimiento, personales, etc; generando una creciente demanda de capacidad (Ancho de Banda). Es por ello que cada día con mayor rapidez se hace uso de estos recursos, y como consecuencia es necesario el desarrollo de nuevas tecnologías de transmisión que permitan soportar este crecimiento desmedido de información [8].

Este incremento de demanda de información (voz y datos) ha causado gran impacto en las capacidades de red, de hecho, en los años 80 se hablaba de capacidades entorno a decenas de Mbits/s, mientras que en el año 2000 se multiplica constantemente el número de Tbits/s admitidos por las redes. La explosión en la demanda de ancho de banda en las redes se debe más que nada al crecimiento del tráfico de datos cuya tasa de crecimiento es de un 300 % al año, mientras que la tasa de crecimiento de voz es únicamente un 13% anual. Estudios de mercado han predicho que entre los años 2000 y 2006, el tráfico de datos llegará a ser casi el 100% del tráfico total en las redes de comunicación. Los Proveedores de Servicio reportan que la demanda de ancho de banda en sus Backbones se duplica en un lapso de 6 a 9 meses [9]. En la figura 2.1 se muestra el crecimiento de volumen de tráfico de voz y datos en porcentaje con respecto al incremento anual.

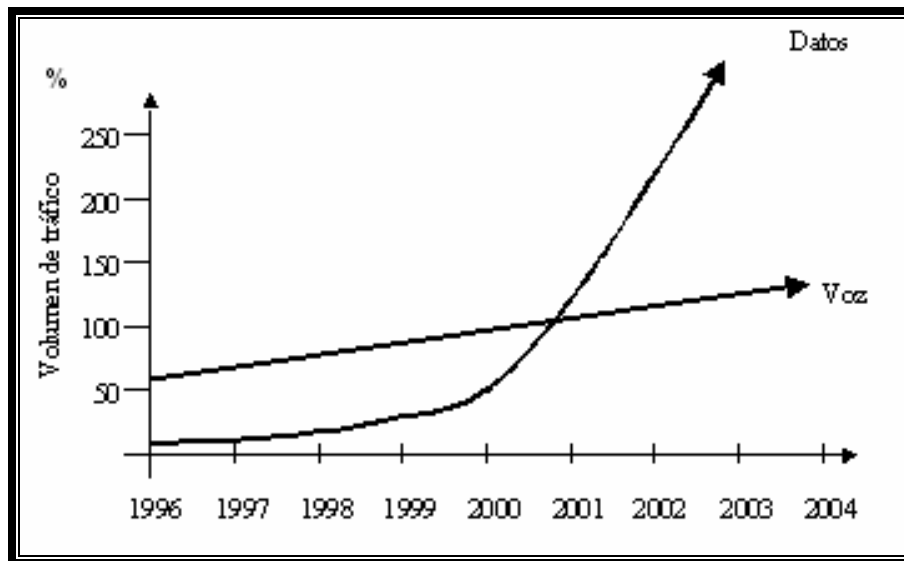


Figura 2.1 Crecimiento del volumen de tráfico de voz y datos

En la figura 2.2 se observa que el crecimiento de la demanda de ancho de banda durante los últimos años tiene una tendencia exponencial cuyo valor es del orden de los Terabits por segundo.

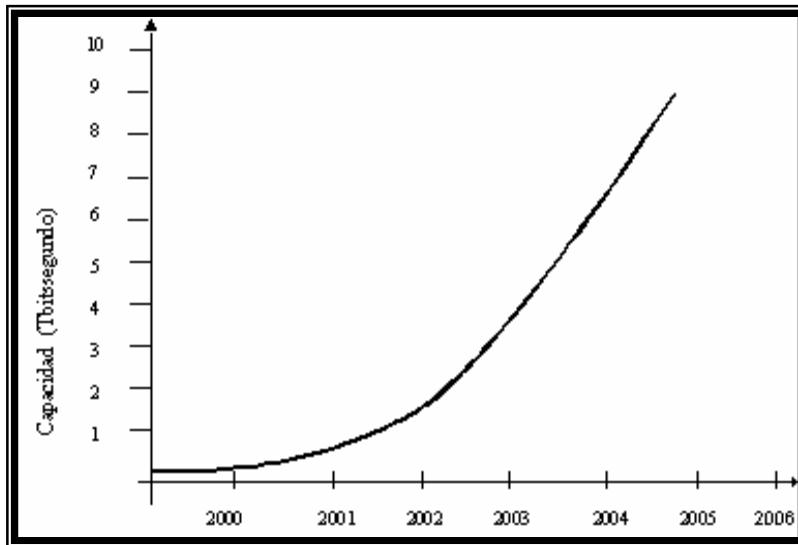


Figura 2.2 Crecimiento del ancho de banda en los últimos años

Por todo lo mencionado anteriormente surge la necesidad de nuevas tecnologías que permitan solucionar esta problemática.

2.2 LA FIBRA ÓPTICA COMO MEDIO DE TRANSPORTE

Durante la última década la fibra óptica, con respecto a otros medios de transmisión, ha sido el preferido para las comunicaciones punto a punto de larga distancia, para las redes de Área Metropolitana e inclusive para las redes de Área local. Cada año miles de kilómetros de fibra se instalan alrededor del mundo; y es que los avances en la tecnología de fabricación de las fibras han permitido que se logren atenuaciones del orden de 0.2 dB/Km. Otra de las causas por la que las fibras son utilizadas es que cuentan con una gran capacidad de ancho de banda (del orden de los Terabits), aunque en realidad la tasa de transmisión está limitada a los Gbits/s por la velocidad de los componentes electrónicos. Debido a las ventajas que la fibra proporciona se le ha considerado el medio de transmisión que puede resolver las demandas de tráfico de información.

Sin embargo, debido a las propiedades intrínsecas de la fibra (al igual que cualquier otro medio de transmisión) la señal óptica sufre pérdida de potencia (atenuación) al ser transportada a su destino. Dichas pérdidas se deben a efectos como la absorción del material con el que está constituida la fibra, la dispersión cromática y la dispersión modal, entre otras. Este fenómeno limita el alcance máximo que puede tener una señal antes de sufrir una pérdida considerable de su potencia, por tanto es necesario el uso de regeneradores que la reestablezcan y así lograr que llegue tal y como fue enviada. El número de regeneradores utilizados depende del tipo de fibra que se está empleando y de la distancia que se quiera lograr en la transmisión.

Por otro lado, debido a los fenómenos mencionados anteriormente (dispersión cromática y dispersión modal) las redes de fibra óptica que están instaladas y operando ya tienen

establecido en su diseño el ancho de banda máximo que pueden transportar sin que se presenten fenómenos tales como la interferencia simbólica entre los pulsos transmitidos (afectando la legibilidad de la señal).

En resumen, a pesar de que la fibra óptica cuenta con limitantes que condicionan el máximo incremento en el ancho de banda a ser transmitido es considerada como el mejor medio de transmisión guiado que puede satisfacer las grandes demandas de información gracias a sus características propias y a las ventajas que proporciona.

2.3 OPCIONES PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN DE UN ENLACE DE FIBRA ÓPTICA

Al hacer frente al nuevo reto de transmitir mayor cantidad de información para resolver la problemática que surge en las telecomunicaciones existen tres posibilidades que permiten lograr el incremento del ancho de banda requerido las cuales son [8] [9] [10]:

- Multiplexaje por división de espacio (SDM). Mantiene la tasa de transmisión pero utiliza más fibra.
- Aumentar la tasa de un canal por una nueva tecnología TDM para lograr grandes tasas de transmisión del equipo electrónico.
- WDM (Multiplexaje por división de longitud de onda). Mantiene la tasa de transmisión de un canal pero agrega más canales con longitudes de onda diferentes.

2.3.1 Multiplexaje por división de espacio (SDM). [10]

Esta es la alternativa más directa que se puede emplear para incrementar la capacidad de transmisión de un enlace, ya que consiste en la instalación de más fibra. Sin embargo, ésta cuenta con dos desventajas principales. La primera es que la instalación de nueva fibra resulta ser complicada y a su vez muy costosa. Este alto costo que representa instalar nueva fibra dentro de la infraestructura se debe más que nada a los costos de permiso y de construcción más que al costo de la fibra en sí. La segunda desventaja es que se requiere la instalación de amplificadores o regeneradores para cada una de las fibras instaladas, lo que representa un costo aún más significativo. Básicamente la instalación de más fibra se utiliza cuando se quiere ampliar la red ya existente ó cuando las distancias son relativamente cortas y que no requieran el uso de amplificadores o regeneradores.

2.3.2 Inversión en nueva tecnología TDM. [10]

Utilizando la tecnología de Multiplexaje por división de tiempo (TDM) se logran incrementar las velocidades de transmisión en la fibra óptica. La tecnología TDM se basa en el multiplexaje de varias señales eléctricas las cuales se turnan en intervalos de tiempo para poder ser transmitidas. Como dichas señales son transmitidas por la fibra óptica la señal eléctrica que resulta de la multiplexión es convertida en una señal óptica y transmitida por la fibra, la transmisión de esta señal se realiza en una sola longitud de onda.

Con esta tecnología se logran normalmente velocidades de transmisión en una sola fibra de 2.4 Gbps, con algunos equipos desarrollados para dicha tecnología ya se pueden alcanzar

tasas de transmisión del orden de los 10 Gbps. Se están desarrollando los equipos con las tasas de transmisión hasta los 100 Gbps.

SONET/SDH son tecnologías de transmisión para fibra óptica basadas en TDM. SONET esta regida por la Norma Americana mientras que SDH se encuentra regida por la Norma Europea. A continuación se muestra una tabla en donde se pueden observar las tasas de transmisión que se manejan en cada una de estas tecnologías y las tasas de transmisión máximas que actualmente se pueden alcanzar dependiendo de la tecnología que se este utilizando. Ambas tecnologías (SONET/SDH) han logrado establecer dentro de la fibra altas tasas de transmisión que cubren las necesidades de incremento de ancho de banda [11].

Tabla 3.1 Diferentes tasas de transmisión que se alcanzan en la tecnología SONET/SDH en la fibra óptica

SDH			SONET		
SEÑAL	VELOCIDAD EXACTA	VELOCIDAD REDONDEADA	SEÑAL	VELOCIDAD EXACTA	VELOCIDAD REDONDEADA
STM-1	155.520 Mbps	155 Mbps	OC-1	51.84 Mbps	51 Mbps
STM-4	622.080 Mbps	622 Mbps	OC-3	155.520 Mbps	155 Mbps
STM-16	2.488320 Gbps	2.5 Gbps	OC-12	622.080 Mbps	622 Mbps
STM-64	9.953280 Gbps	10 Gbps	OC-48	2.488320Gbps	2.5 Gbps
			OC-192	9.953280Gbps	10 Gbps

2.3.3 Incremento del número de longitudes de onda transmitidas en la fibra óptica (WDM) [9][10]

WDM (Multiplexaje por división de longitud de onda) es una tecnología desarrollada para satisfacer las necesidades de ancho de banda requeridas en la actualidad. Esta tecnología tiene el potencial de explotar el gran ancho de banda ofrecido por las fibras ópticas y se basa en el multiplexaje de varias longitudes de onda (diversos canales) que son transmitidas dentro de una sola fibra. La tasa de transmisión total que se logra obtener con esta tecnología se encuentra en el orden de los Terabits por segundo dependiendo del tipo de fibra que se este empleando.

De acuerdo del número de longitudes de onda multiplexadas (número de canales) existen variantes de esta tecnología. En particular hoy se habla mucho de DWDM (Dense Wave División Multiplexing) y para más adelante se habla de HDWDM (High Density WDM).

El crecimiento en la densidad de canales como resultado de la tecnología DWDM ha tenido un gran impacto en la capacidad de las fibras, es por ello que con esta tecnología se tiene un avance significativo en la utilización del mayor ancho de banda posible que por sus características la fibra puede proporcionar.

2.4 WDM COMO LA MEJOR OPCIÓN PARA SOPORTAR LA DEMANDA ACTUAL DE ANCHO DE BANDA

La solución tradicional que se había llevado a cabo para soportar las altas demandas de ancho de banda había sido aumentar la velocidad de las señales transmitidas en la fibra óptica. Con SONET se tenía un camino tendido hacia esa dirección sin embargo al aumentar la velocidad binaria, si bien representa mayor ancho de banda, también depende del desarrollo de circuitos integrados, fuentes y de fotodetectores que funcionen a esa velocidad. Se ha visto que la tasa de crecimiento de la demanda generada está dejando atrás al desarrollo de la tecnología de circuitos integrados que permitan soportar este enorme crecimiento, es decir, se sobrepasan los límites electrónicos con el empleo de la tecnología TDM (SONET).

El multiplexaje por división de longitud de onda WDM (Wavelength division multiplexing) es una tecnología óptica que acopla muchos canales con longitudes de onda diferentes en la misma fibra, de esta manera se incrementa el ancho de banda transmitido y éste es obtenido como la suma de la tasa de transmisión de cada canal. Con esta tecnología se tiene un incremento en el ancho de banda sin embargo; la velocidad binaria transmitida por canal se mantiene permitiendo así que los dispositivos electrónicos no tengan problemas de transmisión de altas velocidades como es el caso de la tecnología TDM.

La tecnología WDM es la opción más práctica hoy en día que puede soportar esos desmedidos incrementos de demanda de ancho de banda que se tienen en la actualidad. Además es considerada una tecnología escalable y la cual puede transportar todo tipo de tráfico y servicios. Esta tecnología es considerada también como un paso a la creación de redes totalmente ópticas en donde ya no sería necesario la utilización de dispositivos electrónicos debido a que toda la red estaría conformada de dispositivos ópticos.

2.5 PROBLEMAS DE DESARROLLO DE LOS SISTEMAS DWDM

2.5.1 Limitantes propias de la fibra

Los sistemas DWDM en su desarrollo se han enfrentado a las limitaciones propias de la fibra. Dichas limitantes han ocasionado que el número de canales transmitidos (banda total), así como la potencia de transmisión de cada canal sean limitados, de igual manera las distancias de alcance son afectadas. Entre las características propias de la fibra se encuentran la Dispersión Cromática, la Dispersión de modo de polarización y los fenómenos no lineales [14] [15].

2.5.1.1 Dispersión Cromática [14] [15]

Este fenómeno se manifiesta por el ensanchamiento del pulso transmitido a lo largo de la fibra. Se presenta debido a que el pulso transmitido no es puramente cromático sino que esta compuesto de una banda espectral de longitudes de onda. Por otro lado el índice de refracción del material del medio y la constante de propagación del medio (asociada la índice de refracción) son dependientes de la longitud de onda. Esto trae como consecuencia que cada longitud de onda que compone el pulso viaje a velocidades diferentes (unas más rápido que otras) y por consecuencia cada una llegue a diferentes tiempos a su destino, creándose así un

retraso entre éstas y ocasionando que el pulso se extienda o ensanche. Este tipo de dispersión limita por ende la habilidad de transmitir a muy altas tasas de transmisión ya que se podría presentar la llamada interferencia intersimbólica entre pulsos. Es medida en picosegundos por nanómetro – kilómetro (retraso por variación de longitud de onda y longitud de fibra).

2.5.1.2 Dispersión de Modo de Polarización [14] [15]

Este tipo de dispersión es consecuencia de un fenómeno llamado birrefringencia que se presenta en algunos materiales ópticos cuando estos son sometidos a un campo eléctrico. Este fenómeno se manifiesta por un valor del índice de refracción diferente (dentro del medio) para el campo eléctrico y magnético que componen a la onda electromagnética que se encuentra viajando. Por tanto a la salida del medio, el pulso compuesto por diversas longitudes de onda es separado en dos componentes que viajan a diferentes velocidades y con diferente polarización. Al final del trayecto cuando las componentes del pulso son combinadas nuevamente se presenta un ensanchamiento del pulso, a este fenómeno se le llama dispersión de modo de polarización y es típicamente medida en picosegundos. Este tipo de dispersión es notable en las fibras monomodo que operan arriba de los 2.5 Gbit/s y es una limitante para los sistemas que operan a elevadas tasas de transmisión.

2.5.1.3 Efectos no lineales [14] [15]

En la fibra óptica se llevan a cabo fenómenos complejos denominados fenómenos no lineales que ocurren cuando los niveles de potencia de transmisión sobrepasan cierto umbral. Estos fenómenos se presentan con la variación de algún parámetro del medio de propagación en función de la potencia de la señal. Estas no linealidades causan limitaciones significantes para los sistemas que trabajan a altas tasas de transmisión como es el caso de los sistemas DWDM.

Las no linealidades pueden ser clasificadas en dos categorías. La primera ocurre por la interacción de las ondas de luz de muy alta intensidad con las moléculas que componen el material con el que esta hecha la fibra. Los dos principales efectos llevados a cabo por esta interacción son: esparcimiento estimulado Raman y esparcimiento estimulado Brillouin. El primero genera una longitud de onda en dirección a las ondas de luz y al encontrarse con otras de la misma longitud se tiene como resultado la diafonía en la señal. En el segundo la longitud de onda generada viaja en sentido contrario a las ondas de luz y es mezclada con la energía transferida incrementando la diafonía en la señal.

La segunda categoría ocurre por la dependencia del índice de refracción con respecto a la potencia de la señal. Dentro de esta categoría se presentan los fenómenos mezcla de cuatro ondas (FWM, four wave mixing), automodulación de fase (SPM, self-phase modulation) y modulación de fase cruzada (CPM, cross-phase modulation). SPM y CPM afectan solamente la fase de la señal y pueden ocasionar el ensanchamiento de la misma siendo así un factor adicional en el incremento de la dispersión.

El fenómeno denominado mezcla de cuatro ondas se presenta por la interacción entre sí de la potencia de tres longitudes de onda, dando como resultado la creación de una cuarta onda de luz que tiene como efecto ruido y diafonía en los canales adyacentes. La potencia de la señal generada por este fenómeno depende del espaciamiento entre los canales, la intensidad de

potencia de cada uno de ellos, la dispersión cromática, entre otras. Si la potencia de las señales de entrada aumenta o el espaciamiento entre los canales es menor, la señal generada es mucho mayor, por tanto dicho fenómeno es una limitante en la capacidad de canales a transmitir en un sistema DWDM.

2.5.2 Fibra óptica y fuentes de transmisión especiales [10][14]

Con toda la problemática anteriormente mencionada se ha tenido la necesidad de investigar y desarrollar nuevos tipos de fibras y fuentes de transmisión que permitan minimizar algunas limitantes presentadas. Un ejemplo son las fibras llamadas DSF (Dispersión- Shifted Fiber) que tienen una dispersión cromática cero en la longitud de onda de 1550 nm. De igual manera otras fibras llamadas NZ-DSF (Non Zero Dispersión- Shifted Fiber) han sido desarrolladas para reducir los efectos no lineales que se presentan en las fibras al contar con cierta cantidad de dispersión.

En cuanto a las fuentes de transmisión se han desarrollado fuentes con un ancho espectral reducido que permiten minimizar la dispersión y además que varios canales puedan ser enviados a la vez. Estas fuentes manejan bajos niveles de potencia que permiten reducir el efecto de mezcla de cuatro ondas.

2.5.3 Amplificadores ópticos [14] [15]

Los amplificadores ópticos son parte esencial de un sistema de transmisión y se encargan de reconstituir la señal óptica atenuada por las pérdidas que ésta presenta al viajar por dicho sistema. Si bien cuenta con ventajas importantes que lo hacen pieza clave en la transmisión óptica (amplificación simultánea de varias señales WDM y su independencia a la tasa de transmisión o al formato de las señales) también cuenta con desventajas que hay que considerar al momento de ser utilizados.

La primera de ellas es la generación de ruido y por otro lado, además de que al mismo tiempo amplifica la señal también amplifica el ruido. Este tipo de ruido es especialmente un problema cuando múltiples amplificadores están conectados en cascada, ya que cada amplificador subsiguiente amplificara el ruido generado por los amplificadores previos. Otra desventaja es que la ganancia que proporcionan no es igual para toda la banda de longitudes de onda a ser amplificadas, entonces algunos canales tienen más ganancia que otros. Por tanto tienen que ser empleados dispositivos que permitan que la amplificación tenga un comportamiento igual en toda la banda de longitudes de onda.

2.5.4 Multiplexores/demultiplexores (Mux/Demux) DWDM [14] [15]

Los multiplexores tienen la función de combinar varias señales de diferentes longitudes de onda sobre un puerto de entrada común, un demultiplexor desempeña la función inversa. Estos dispositivos al igual que los amplificadores ópticos son parte importante en este tipo de sistemas en donde varias señales ópticas pueden viajar a través de una sola fibra. Mientras más canales sean multiplexados mayor será la cantidad de información transmitida, pero es importante tener en cuenta los efectos que se mencionaron anteriormente como lo son: La diafonía y las pérdidas agregadas de estos componentes (Mux/Demux). Aunado a esto, mientras mayor sea el número de longitudes de onda multiplexadas dentro de la fibra menor es la

separación entre éstas y los dispositivos de filtrado que se utilizan para su demultiplexión tendrán que ser mucho más precisos y por tanto serán más caros.

2.6 PROBLEMAS DE DESARROLLO DE LAS REDES TOTALMENTE ÓPTICAS [10]

Se habla de que en un futuro las redes podrían llegar a ser totalmente ópticas, es decir, los datos llevados desde la fuente a su destino no requerirán de cualquier tipo de conversión opto – electrónica a lo largo del trayecto. Esto facilitaría el manejo de más altas capacidades de información que hasta la fecha se pueden efectuar con dispositivos que todavía utilizan este tipo de conversión. Sin embargo, el alcance de dichas redes esta siendo limitado por tareas desempeñadas de los dispositivos electrónicos que los dispositivos ópticos (aún en investigación) son incapaces aún de realizar. Esta problemática se presenta en ambos tipos de infraestructura de redes: conmutación de circuitos y conmutación de paquetes.

Se ha mencionado que una red totalmente óptica es transparente a los protocolos y formatos que puedan ser manejados. Esto es una problemática en las redes de **conmutación de circuitos ópticos**, ya que es necesario que las señales sean regeneradas o, en otros casos, es requerida la conversión de una cierta longitud de onda a otra. En ambas circunstancias se depende del uso de la electrónica para que se puedan realizar dichas tareas de conversión o de regeneración. De igual manera sucede cuando la señal óptica llega a su destino. Estas tareas de inteligencia, por así decirlo, aún no han sido alcanzadas por los dispositivos de este tipo de redes.

En las redes de **conmutación de paquetes ópticos** existen problemáticas similares, una de estas es la carencia de una memoria de acceso óptico que permita el almacenamiento de los paquetes. Por otra parte los dispositivos (routers) no tienen la capacidad de desempeñar muchas funciones de control requeridas como lo son el procesamiento de paquetes, la determinación de la ruta para los mismos, la priorización de paquetes basados en las clases de servicio, información de la topología de las redes, etc.

La problemática mencionada anteriormente señala que el desarrollo de la tecnología óptica en ambos tipos de redes se encuentra aún por debajo de los dispositivos electrónicos que desempeñan dichas tareas, es por eso que las investigaciones continúan en pie para poder lograr en un futuro tener redes que no requieran del uso de la electrónica. Mientras tanto, en la actualidad se tienen subredes totalmente ópticas que utilizan en su periferia convertidores optoelectrónicos que permiten ya sea la regeneración de la señal o la conversión de longitudes de onda.

2.7 CONCLUSIONES

El estudio de mercado ha mostrado que gracias a la Internet y a muchas otras aplicaciones la demandas de ancho de banda (específicamente en las redes backbone) ha crecido y sigue creciendo de manera acelerada, de tal manera que el tráfico de redes de datos ha superado en gran medida al de las redes de voz.

Esta problemática ha requerido obligatoriamente una solución que cubra las necesidades existentes y las que se presenten a futuro. Diversas soluciones han sido propuestas en el caso concreto de las fibras ópticas. Entre estas, dos de las importantes a considerar son SDM (Multiplexaje por división de espacio) y WDM (Multiplexaje por división de longitud de onda). En el primer caso la solución consiste en la instalación de más fibra, en el segundo caso son empleados dispositivos ópticos llamados multiplexores ópticos que sirven para combinar las diferentes señales ópticas y que sean transmitidas todas a través de una misma fibra.

Para algunos casos en que las redes son de tráfico pesado y cuyo incremento de demanda es cada vez mayor en un tiempo relativamente corto SDM no es la opción más viable, ya que el instalar más fibra requiere de tiempo. WDM por otro lado no requiere de la instalación de más fibra a medida que nuestra demanda vaya en aumento, es necesario únicamente contar con los dispositivos ópticos específicos desarrollados para esta tecnología y en caso de requerir más ancho de banda basta con multiplexar un canal óptico más.

Las fibras ópticas desde sus inicios han presentado limitantes tales como la atenuación y la dispersión que determinan la distancia de transmisión y el ancho de banda a transmitir. A pesar de que las fibras han revolucionado para minimizar estos efectos no se puede decir aún que con WDM el ancho de banda a transmitir en la fibra sea ilimitado, sin embargo se aprovecha al máximo permitido.

WDM es una tecnología que pretende aprovechar el ancho de banda que las fibras ópticas pueden ofrecer (del orden de los THz) e intenta explotar al máximo la cantidad de información que puede ser enviada a través de éstas. WDM gracias a su escalabilidad es considerada la opción de las comunicaciones ópticas más viable para cubrir las necesidades a futuro de una red de comunicaciones con crecimiento de demanda acelerado.

Si bien gracias a los dispositivos ópticos empleados en esta tecnología que han revolucionado los sistemas de comunicaciones ópticos, aún falta por hacer para que en un futuro se hable de redes totalmente óptica en las que no tengamos que depender de dispositivos electrónicos.

3. MULTIPLEXAJE POR DIVISIÓN EN LONGITUD DE ONDA (WDM)

3.1 QUE ES LA TECNOLOGÍA WDM?

La tecnología WDM (Multiplexaje por división en longitud de onda, Wave Division Multiplexing) es una técnica utilizada en la fibra óptica que permite explotar lo más posible la capacidad de ancho de banda que la fibra puede ofrecer. Esta técnica consiste en la combinación (multiplexaje) de varias longitudes de onda portadoras transportadas a través de la fibra sin que exista interacción entre ellas. Cada onda portadora corresponde a una longitud de onda diferente cuyo dominio óptico típicamente es del orden de los TeraHertz. Con esta técnica se pueden alcanzar velocidades de transmisión de Gigabits por segundo hasta los Terabits por segundo [10].

El acoplamiento de las diferentes longitudes de onda emitidas por las fuentes ópticas se realiza por medio de un dispositivo llamado multiplexor óptico; al final de la fibra las señales combinadas son separadas por otro dispositivo llamado demultiplexor óptico [16] (ver fig. 3.1). Se puede imaginar que WDM es como un trailer que transporta varias cajas, en donde cada una de ellas esta identificada por un cierto color y cuya capacidad de transmisión total de la fibra es la suma de las velocidades de todas las cajas transportadas.

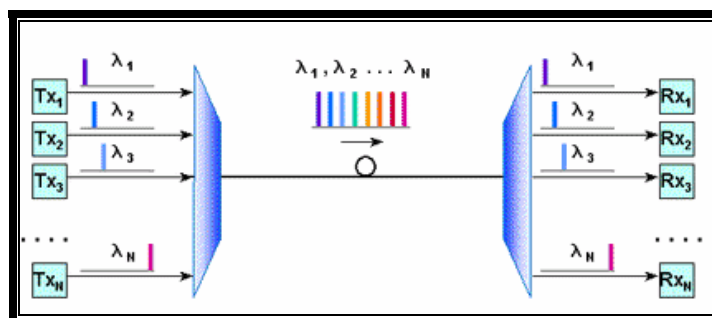


Fig. 3.1 Esquema de la transmisión de varios canales dentro de una fibra. Multiplexaje y Demultiplexaje

3.2 UN POCO DE HISTORIA

Los primeros sistemas WDM surgieron en torno a los años 80's en donde se combinaron dos señales a diferentes longitudes de onda espaciadas ampliamente en las regiones de 1310 y 1550 nm. En esa misma década surgió la tecnología CWDM (Coarse Wavelength División Multiplexing) en la cual ya se lograban multiplexar 4 canales de longitud de onda diferentes y cuya cantidad ha llegado a ser de 8 y hasta 16 canales; aunque comercialmente se encuentran disponibles los sistemas de 8 canales. A mediados de los 90's emergieron los sistemas densos WDM (DWDM, Dense Wavelength División Multiplexing) en donde se lograron transmitir de 32 a 80 canales. La implementación comercial fue de 40 canales a 2.5 Gbit/s cada canal logrando así una velocidad de 100 Gbit/s a una distancia de 500 Km. Después hacia el año 2000 se podían multiplexar de 80 a 160 canales. La transmisión de 16-40 canales en la actualidad se encuentra ampliamente desarrollada, mientras que la transmisión de 80-160 canales todavía se encuentra bajo desarrollo [17].

Con la gran evolución de WDM se han logrado transportar cada vez más mayor cantidad de canales de longitud de onda y en consecuencia una cantidad considerable de ancho de banda en las fibras puede ser utilizado.

3.3 CWDM y DWDM [18] [19]

CWDM es una tecnología intermedia entre WDM y DWDM en donde las longitudes de onda combinadas son mayores que WDM y menores que DWDM. Esta tecnología utiliza un espaciamiento entre canales de 20 nm con un ancho de banda de 13 nm. Propiamente tiene gran aplicación en redes de área metropolitana que necesitan un incremento en su ancho de banda y distancias no tan grandes (aproximadamente no mayores de 70 km).

DWDM multiplexa mucho más canales en una fibra y por ende para poder aumentar la cantidad de longitudes de onda transmitidas el espaciamiento entre dichos canales se encuentra establecido en 200 GHz (1.6 nm), 100 GHz (0.8 nm) y 50 GHz (0.4 nm). Las longitudes de onda operativas en sistemas DWDM están definidas según una escala de frecuencias estandarizada, desarrollada por la Unión Internacional de Telecomunicación.

Esta variante de WDM es utilizada en sistemas que requieran mayor cantidad de información transmitida que en los sistemas CWDM y cuya distancia sea mayor (generalmente más de 70 km). En la tabla 3.1 se muestra la separación entre canales para CWDM y DWDM.

Para el caso DWDM en donde el espaciamiento entre canales es mucho menor se tiene que dar importancia a los efectos no lineales que se pueden presentar en la fibra así como la diafonía, etc. La separación entre canales es necesaria para evitar solapes ó interferencias entre canales adyacentes.

Tabla 3.1 Rango de espaciamiento entre canales para la tecnología CWDM y DWDM

TECNOLOGÍA	ESPACIAMIENTO ENTRE CANALES
CWDM	20 nm
DWDM	200 GHz (1.6 nm) 100 GHz (0.8 nm) 50 GHz (0.4 nm)

3.4 VENTANAS ÓPTICAS [18][19][20][21]

La fibra óptica al igual que todo medio de transmisión cuenta con características propias que hacen que la señal transportada sufra atenuaciones, es decir, pérdidas en la potencia de la señal. Existen rangos espectrales de transmisión específicos (llamados también bandas ó ventanas ópticas) que presentan bajas pérdidas de transmisión en ciertos tipos de fibra y que por ende son utilizados para el transporte de información. De igual forma en estas bandas ópticas el comportamiento de la dispersión de cada fibra es diferente lo que lleva a elegir distintos tipos de éstas dependiendo de su aplicación. WDM es una tecnología que, gracias al desarrollo de diversos dispositivos (tales como láseres y amplificadores ópticos) que trabajan en

esos espectros de baja atenuación y dispersión, ha podido revolucionar la capacidad de transmisión de información en la fibra.

La primera banda óptica en la clasificación actual es la O (Original) que comprende el rango de 1290 a 1350 nm, la banda E (Extendida) comprende de 1380 a 1440 nm), la banda S (Short) está definida en el rango 1470 a 1500 nm, la banda C (Clásica) de 1530 a 1560 nm y la banda L (Larga) de 1560 a 1620 nm. En la tabla 3-2 se presentan las diferentes bandas ópticas con sus respectivos rangos.

Tabla 3.2 Bandas ópticas y sus rangos espectrales

BANDA OPTICA	RANGO
O	1290 a 1350 nm
E	1380 a 1440 nm
S	1470 a 1500 nm
C	1530 a 1560 nm
L	1560 a 1620 nm

La Tecnología CWDM tiene aplicación en todas las bandas ópticas, desde la O hasta la banda L. En la banda O son transmitidos 4 canales ópticos, la banda E también es particionada para la transmisión de 4 canales y en la banda S, C y L son transmitidas 8 longitudes de onda con incrementos de 20 nm. La tecnología DWDM tiene aplicación en la banda C y L en aplicaciones de ultra alta velocidad (10-40 Gbps). Ver tabla 3.3. La banda C es actualmente utilizada en los Estados Unidos y la banda L en Japón.

Tabla 3.3 aplicaciones de las bandas en CWDM y DWDM

TECNOLOGÍA	BANDAS DE APLICACION
CWDM	O (1290, 1310, 1330, 1350 nm) 4 canales E (1380, 1400, 1420, 1440 nm) 4 canales S + C + L = 8 canales con incrementos de 20 nm (1470 , 1490, 1510, 1530, 1550, 1570, 1590, 1610 nm)
DWDM	C y L

Existen estándares definidos por la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) que sugieren el espaciamiento y utilización de los canales. CWDM esta regido por la norma ITU-T G.694.2 y DWDM por la norma ITU-T G.694.1. La ITU recomienda un espaciamiento entre canales de 100 GHz (0.8 nm) ó de 50 GHz (0.4 nm) y múltiplos de éstos en los sistemas DWDM. Los estándares de la ITU de igual manera recomiendan que en la banda C sean empleados 81 canales con un espaciamiento constante de 50 GHz, mientras que en la banda L se recomienda emplear 111 canales con un espaciamiento de 50 GHz.

3.5 TIPOS DE FIBRAS OPTICAS EMPLEADAS EN LOS SISTEMAS DWDM y CWDM [13][15][22]

Existen un número de limitaciones impuestas sobre una transmisión óptica debido a las características propias de la fibra. Entre estas tenemos los efectos lineales como no lineales tales como atenuación que sufre la señal al ser transmitida, la dispersión cromática, el efecto Kerr, FWM, etc. Dichos efectos contribuyen a la degradación de la señal óptica y por tanto al desempeño del sistema. En cuanto a esta problemática las investigaciones se han enfocado al estudio de fibras que permitan disminuir dichas limitantes y hacer un uso más efectivo de la fibra que nos permita transmitir mayor cantidad de información a distancias mayores.

Dos tipos de fibra óptica son comúnmente utilizadas en las redes ópticas. La primera es la fibra monomodo que es empleada para la transmisión a grandes distancias y para aplicaciones de altas tasas de transmisión. Varios tipos de fibras monomodo son popularmente utilizadas, entre estas se encuentran: La **fibra de dispersión no movida Non-DSF** (nondispersion-shifted fiber) también llamada fibra monomodo estándar (SSMF) la cual trabaja en las regiones de 1300 nm con una dispersión igual a cero y en 1550nm con dispersión cromática de aproximadamente 17 ps/nm-km. La **fibra de dispersión movida DSF** (dispersion-shifted fiber) trabaja en la región de 1550 nm con una dispersión igual a cero. La **fibra de dispersión movida no nula NZ-DSF** (nonzero dispersion-shifted fiber) trabaja en la región de 1550 nm con una dispersión de aproximadamente (± 2 ps/nm-km). Esta dispersión de valor diferente de cero que se maneja en esta última fibra ayuda a minimizar las no linealidades inducidas por las altas potencias de transmisión de la señal requeridas en transmisiones de larga distancia. La fibra Non-DSF esta regida por el estándar ITU-T G.652, la DSF por el G.653 y la NZ-DSF por el G.655.

La fibra estándar (SSMF) trabaja en las bandas O,S,C y L, sin embargo ha sido mejorada con una versión llamada E-SSMF (con la atenuación menor en la banda E) para que pueda trabajar en la banda E y de esta manera ser compatible con todas las bandas desde 1260 nm a 1625 nm.

El segundo tipo de fibra es la fibra multimodo en la que además de contar con dispersión cromática presenta otro tipo de dispersión llamada dispersión modal la cual limita significativamente el ancho de banda a transmitir a cierta distancia en un sistema óptico. Por lo que su uso depende de las necesidades del usuario.

Por lo general las fibras empleadas en los sistemas CWDM son las E-SSMF aunque también, dependiendo de la capacidad a transmitir y de la distancia, se utilizan las fibras NZ-DSF. En el caso de los sistemas DWDM las fibras utilizadas, gracias a los niveles moderados de dispersión y de atenuación que presentan, son las fibras NZ-DSF. En la tabla 3.4 se muestran las aplicaciones de los distintos tipos de fibras monomodo que existen actualmente en el mercado de los sistemas ópticos.

Tabla 3.4 Diferentes tipos de fibra monomodo y sus diversas aplicaciones

TIPO DE FIBRA	APLICACION
E-SSMF	CWDM
NZ-DSF G.655	CWDM y DWDM

En la figura 3.2 se muestra las características de estos tipos de fibras tanto de su atenuación como de su dispersión.

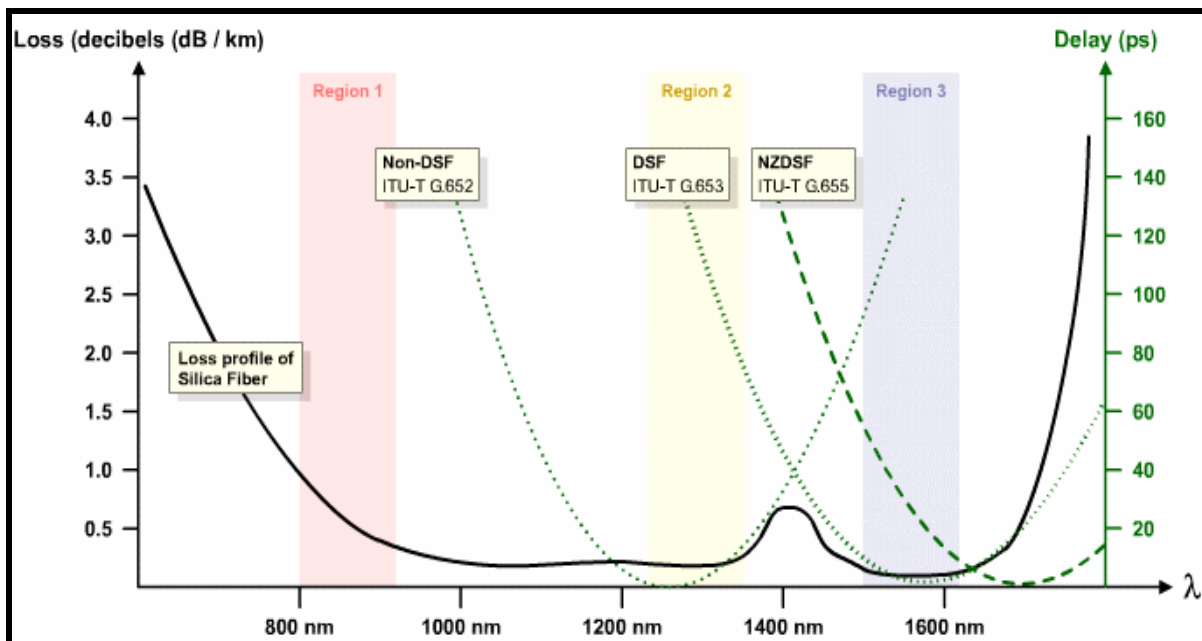


Fig. 3.2 Diferentes tipos de fibra monomodo para aplicaciones en sistemas de fibras ópticas

3.6 PARAMETROS A CONSIDERAR EN UN ENLACE DE FIBRA ÓPTICA

Dependiendo del tipo de fibra que se este utilizando y la región en la que trabaje es importante considerar tres parámetros que van a servir en el diseño de un enlace óptico. El primero es la atenuación que sufre la fibra para cierta longitud y que se determina con el coeficiente de atenuación dado en dB/km, el segundo es la dispersión de pulso que para una fibra óptica monomodo incluye la dispersión cromática y la dispersión por modo de polarización que hay que tomarse en cuenta cuando la tasa de transmisión sobrepasa los 2.5 Gbit/s. El tercero es la no linealidad del material de la fibra ocasionada por la intensidad de la luz, que finalmente afecta la tasa de transmisión y la tasa de errores de los bits.

3.7 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE TRANSMISION CWDM y DWDM

Normalmente los sistemas de comunicaciones ópticos (sistemas que transmiten datos sobre una sola longitud de onda) dependen primordialmente de tres componentes: El transmisor óptico, el receptor óptico y la fibra óptica. En casos en los que la señal no tenga la potencia suficiente para llegar a su destino es necesario el uso de un amplificador óptico [14]. En los sistemas DWDM, en adición a estos cuatro elementos, son requeridos dispositivos ópticos más especializados que permitan llevar a cabo las tareas de multiplexaje de las diversas longitudes de onda y otros que son importantes en el enlace óptico. Dentro de los primeros se encuentran:

Filtros ópticos, Multiplexores ópticos, transmisores y receptores especiales (que trabajen en las ventanas especiales para WDM). En los segundos encontramos acopladores, atenuadores, aisladores, circuladores y polarizadores. En la figura 3.3 se muestra un enlace sencillo punto a punto DWDM.

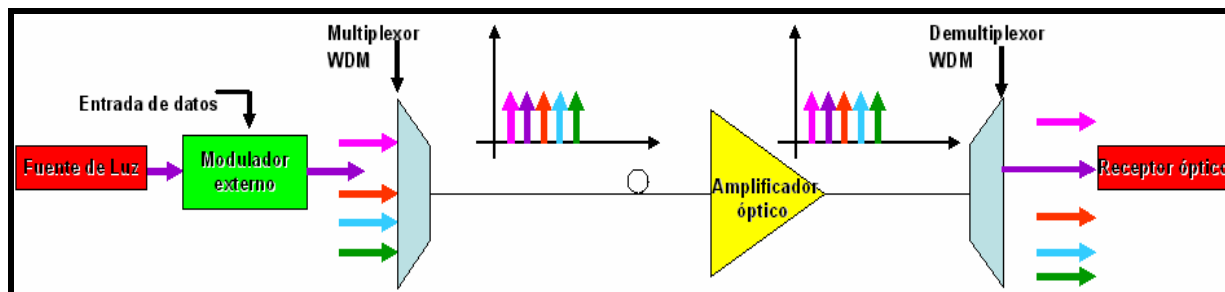


Fig. 3.3 Elementos de un enlace sencillo punto a punto DWDM

Existen otros componentes importantes que son adicionales cuando se está hablando del caso de redes DWDM, entre estos se encuentran los conectores ópticos de cruce OXC (Optical cross connect), los Multiplexores ópticos de adición/extracción OADM (Optical Add/Drop Multiplexer), los convertidores de longitud de onda y los ruteadores WDM [10][15]. En este subcapítulo se describirán los componentes importantes en un enlace punto a punto y se mencionarán únicamente las funciones que desempeñan los componentes de una red DWDM y CWDM.

3.7.1 Transmisores ópticos. [14]

Uno de los principales componentes en las comunicaciones ópticas es el transmisor, específicamente la fuente de luz. En los sistemas ópticos, las fuentes de luz deben de ser compactas, monocromáticas, estables y con largo tiempo de vida (muchos años). En la práctica, no existen fuentes de luz monocromáticas; existen fuentes que generan luz dentro de una banda muy estrecha de longitudes de onda. La estabilidad de las fuentes de luz implica niveles de intensidad constante a variaciones de temperatura y longitud de onda constante.

Estas características deberán de considerarse debido a que, por ejemplo, si la luz emitida no es compacta (es decir el ancho espectral emitido por la fuente es amplio) afectara el espaciamiento entre los canales transmitidos y como consecuencia el ancho de banda será limitado.

Existen dos tipos diferentes de fuentes de luz. El primero transmite una *onda continua* (CW, continuous wave) y requiere de un modulador externo a la salida óptica. En este caso, una señal eléctrica que representa una cadena de datos actúa sobre el modulador externo que modula la luz que pasa a través de éste. El láser de emisión continua y los diodos emisores de luz (LEDs) son ejemplos de este tipo de fuentes. El segundo tipo de transmisores son llamados de *luz modulada* en donde no es necesario un modulador externo. Este tipo de transmisores recibe una cadena de datos eléctricos que directamente modulan la fuente de luz. Los Láseres y LEDs son también ejemplos de fuentes de luz modulada.

3.7.1.1 LED vs Láser [15]

Los Diodos Emisores de Luz (LED's) tienen características que lo ponen en desventaja con el Láser y por las cuales este último es utilizado mayormente en las comunicaciones ópticas. Entre dichas desventajas encontramos que la temperatura afecta significativamente la estabilidad de este dispositivo, la luz emitida es no coherente, no se pueden utilizar en transmisiones de larga distancia, son utilizados en bajas tasas de transmisión (<1 Gbits/s) y cuentan con un relativo amplio ancho espectral. Una ventaja a considerar en este tipo de dispositivos es que su costo no es muy alto. Por otro lado el láser transmite luz coherente, se utiliza en transmisiones de larga distancia y su ancho espectral es reducido en comparación con el LED aunque su costo es mayor. Sin embargo dependiendo de la aplicación el LED es empleado como fuente de luz.

3.7.1.2 Tipos de Láser [14][16]

Al paso del tiempo se han desarrollado diferentes tipos de láser que satisfagan las necesidades de las comunicaciones ópticas. Dentro de éstos los más utilizados son los láseres de semiconductor; debido a que son manufacturados a un costo no tan alto, generan luz a longitudes de onda compatibles con la fibra y son monolíticamente integrados con otros componentes ópticos. Este tipo de láser transmite luz coherente dentro de un cono de emisión muy estrecho además de que pueden ser directamente modulados.

Existen varios tipos de láser de semiconductor entre los cuales se encuentran: Láseres monolíticos Fabry-Perot, láseres DBR (Distributed-Bragg Reflector), láseres DFB (Distributed feedback, retroalimentación distribuida) y los láseres VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, láseres de cavidad vertical y de emisión superficial).

En los sistemas DWDM los tipos de láseres más utilizados son los **DFB**, que están constituidos por una estructura interna basada en InGaAsP y permite la selección de cierta longitud de onda por medio de una rejilla de difracción. En general, la rejilla consiste en una guía de onda, en la cual el índice de refracción alterna periódicamente entre dos valores. Únicamente la longitud de onda que tenga el mismo periodo y el índice de la rejilla serán constructivamente reforzados, mientras que las otras longitudes de onda serán destructivamente interferidas y no se propagaran a través de la guía de onda. Estos tipos de láseres emiten luz casi monocromática, con frecuencias centrales alrededor de la región de 1300 nm, y en el rango 1520-1565 nm.

Por otro lado, dentro de los sistemas DWDM se requiere que estos transmisores tengan la capacidad de sintonizar diferentes longitudes de onda; por lo que se requiere aparte de los láseres fijos que emiten a una cierta longitud de onda específica, de láseres de sintonización que emitan en un cierto rango de longitudes de onda. Los láseres fijos pueden ser sintonizados cambiando cierto parámetro. Existen dos características importantes de los láseres de sintonización: el rango de sintonización y el tiempo de sintonización. El primero se refiere al rango de longitudes de onda sobre las cuales el láser opera y la segunda se refiere al tiempo requerido para que el láser sintonice de una longitud de onda a otra.

3.7.1.3 Comparación de los láseres CWDM y DWDM [19]

Los láseres DBF se usan como fuentes en sistemas DWDM. La longitud de onda deriva aproximadamente $0.08\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ con temperatura. Los láseres DBF se enfrían para estabilizar la longitud de onda y evitar que varíe fuera de la banda de los filtros multiplexor y demultiplexor cuando la temperatura fluctúa en los sistemas DWDM.

Los sistemas CWDM usan láser DBF sin refrigerador de Peltier ni termistor. La banda del filtro óptico y el espaciado entre canales tiene que ser suficientemente ancho para acomodar la variación de longitud de onda de portadora de los láseres no refrigerados de los sistemas CWDM (aproximadamente 12 nm).

3.7.2 Moduladores externos [14][16]

Como se había mencionado la señal óptica emitida por los transmisores ópticos se puede modular de manera directa (modulación interna) por medio de la corriente de inyección que se suministra al láser o de manera indirecta (modulación externa) por medio de moduladores ópticos externos. Dependiendo del mecanismo físico utilizado los moduladores externos son clasificados en dos tipos: Moduladores acusto-ópticos y electro-ópticos, estos últimos son los que se utilizan en este tipo de sistemas por lo que en esta parte se hablará exclusivamente de los moduladores externos basados en efectos electro-ópticos.

Un modulador es un dispositivo que altera una de las características detectables de la luz (intensidad óptica, fase o frecuencia) de acuerdo a señales eléctricas externas. En un modulador electro-óptico se modula la ganancia, el índice de refracción o la absorción del material con el cual este constituido dicho modulador en función de una señal eléctrica externa y la salida de la señal óptica que pasa por el modulador, por tanto, es modificado.

Hoy en día los moduladores externos están constituidos principalmente de guías de onda ópticas debido a la facilidad de éstos para conformar dispositivos de óptica integrada. El material del cual esta constituida la guía de onda deberá poseer propiedades ópticas deseables tales que permitan cambiar dichas propiedades en función de señales eléctricas. Dentro de estos materiales se encuentran el cristal y los semiconductores tales como: GaAs, InP y el LiNbO_3 (Niobato de Litio). El modulador empleado en la tecnología DWDM es un dispositivo electro-óptico basado en la óptica integrada constituido por semiconductores.

3.7.3 Multiplexores, demultiplexores y filtros ópticos [10][15][16]

El multiplexor óptico es un dispositivo muy importante dentro de un sistema basado en la tecnología WDM. Este dispositivo es el encargado de acoplar varios canales dentro de la fibra óptica. Cada uno de estos canales se encuentra a diferentes longitudes de onda y provienen de diferentes fuentes. Un demultiplexor óptico hace la función inversa, es decir, separa los canales provenientes de la fibra para que sean convertidos así por el fotodetector en señales eléctricas. Los filtros ópticos son componentes que como su nombre lo indica separa una señal óptica de un conjunto provenientes de la fibra. Un filtro óptico tiene las mismas funcionalidades de un demultiplexor por lo que al hablar de un demultiplexor se esta haciendo referencia por igual a un filtro.

Los Multiplexores WDM pueden ser unidireccionales o bidireccionales. Los multiplexores unidireccionales son usados para combinar señales de diferentes longitudes de onda dentro de una sola fibra, las cuales al final del trayecto son separadas. Un multiplexor bidireccional es un dispositivo que es utilizado para enviar información en una dirección y simultáneamente recibir información de otra dirección en diferentes longitudes de onda.

Los dispositivos a continuación presentados son igualmente utilizados por su funcionamiento y estructura como multiplexores, demultiplexores y filtros ópticos. A continuación se describirá brevemente su composición de cada uno de estos elementos.

3.7.3.1 Mux/Demux Thin-Film

El Multiplexor *Thin-film* (de capa delgada) esta conformado por varias capas (50 a 100) alternadas de material con un alto y un bajo índice refractivo. Esto permite que ciertas frecuencias logren ser aceptadas y otras sean rechazadas por las capas. (Ver figura 3.4). En los sistemas WDM este tipo de dispositivos permitirán pasar las longitudes de onda para las que fue diseñado y rechazará las demás. Este tipo de elementos constan de una buena estabilidad y pérdidas mínimas debido a la dispersión cromática y a la dispersión de polarización.

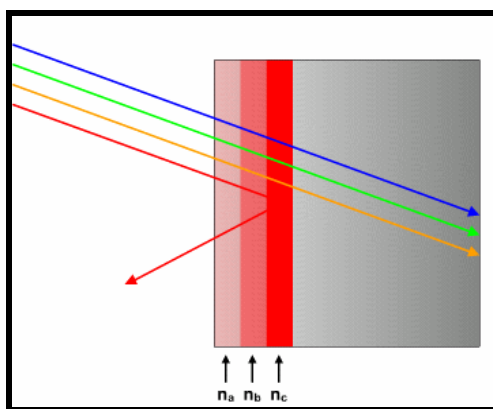


Fig. 3.4 Estructura de un Mux/Demux de capa delgada

3.7.3.2 Mux/Demux FBG (Fiber Bragg Grating)

Un Multiplexor FBG consiste en un segmento de fibra en la cual su índice de refracción varía periódicamente a lo largo de su núcleo. Esta variación periódica es formada exponiendo el núcleo de la fibra constituido por germano-silicate a una intensidad de rayos ultravioleta. Capas alternadas en el núcleo de la fibra con diferentes índices de refracción se producen gracias al efecto de fotosensibilidad (ver fig. 3.5). Una rejilla de Bragg en fibra óptica (FBG) puede tener varios usos, uno de ellos sería colocarla a la salida de un circulador óptico y que refleje aquella longitud de onda para la que fue diseñada, así formando un demultiplexor para sacar un solo canal de sistema DWDM.

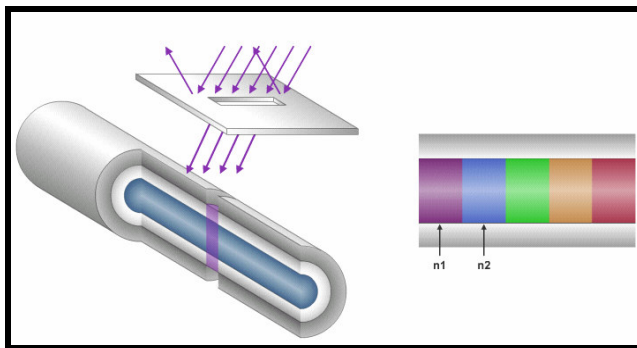


Fig. 3.5 Formación de una rejilla de Bragg en fibra óptica (FBG) exponiéndola a rayos UV

3.7.3.3 Mux/Demux AWG (Arrayed Waveguide Grating)

Los filtros de arreglos de guía de onda (AWG) son dispositivos de óptica integrada. Estos consisten en dos acopladores estrella conectados por medio de un arreglo de guías de onda. (Ver fig. 3.6). Su funcionamiento está basado en el principio del interferómetro Mach-Zehnder, por tanto está conformado por una variación de longitud de cada una de estas guías de onda. Estos filtros son sensibles a la temperatura, son dependientes de la polarización y son recomendables para la integración con fotodetectores. Son empleados para más de 80 canales.

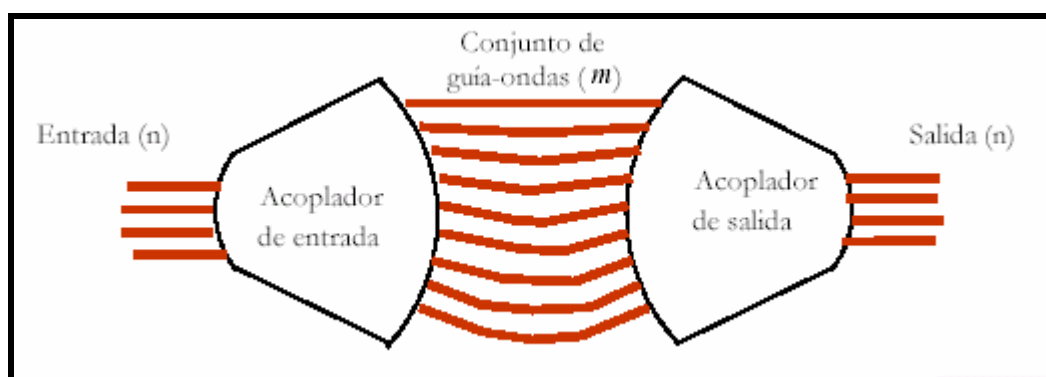


Fig. 3.6 Mux/Demux de arreglo de guías de onda (AWG)

3.7.3.4 Comparación entre Mux/Demux CWDM y DWDM [20]

Como se mencionó anteriormente en los sistemas DWDM son transmitidas mucho más longitudes de onda a través de la fibra, esto implica que el número de capas (suponiendo un multiplexor thin-film) sea mucho mayor que para un multiplexor CWDM. El orden de número de capas empleadas en un Mux/Demux DWDM son aproximadamente 100 mientras que en CWDM son 50. Como resultado, el tiempo de fabricación de los Mux/Demux DWDM es más largo ya que son equipos que requieren una fabricación más complicada. En consecuencia el costo de los filtros CWDM es generalmente menos del 50% comparado con los filtros DWDM.

3.7.4 Detectores ópticos [10][15][16]

Al finalizar la transmisión en un sistema de comunicaciones por fibra óptica, es necesario recobrar las señales provenientes en forma de luz compuestas por diferentes longitudes de onda. Para que la señal sea recobrada son necesarios dispositivos tales como los fotodetectores que son transductores que alteran una de sus características cuando fotones inciden en éstos. Tienen como función convertir la señal óptica en una señal eléctrica, en donde la señal óptica es demultiplexada antes de llegar al detector ya que estos dispositivos no pueden detectar selectivamente una cierta longitud de onda.

Existen dos tipos de fotodetectores empleados: El fotodiodo PIN (Positive-Intrinsic-Negative) y el fotodiodo de avalancha (APD). El fotodiodo PIN absorbe luz que es emitida y convierte los fotones en electrones en una relación 1:1. Los fotodiodos de avalancha son similares a los PIN solo que proveen de ganancia a través de un proceso de amplificación; en donde un foton libera muchos electrones. Los componentes que normalmente son usados para hacer fotodetectores que trabajen en las regiones de 1300 y 1550 nm son los semiconductores hechos de InGaAs e InGaAsP.

Los fotodiodos PIN tienen muchas ventajas, entre ellas se encuentran bajo costo y fiabilidad; mas sin embargo los fotodiodos de avalancha tienen alta sensibilidad de recepción y son más precisos, aunque son más costosos.

3.8 DISPOSITIVOS DEL ENLACE [10][13][15][16]

En un enlace WDM además de saber qué tipos de fibras son las que se emplean en este tipo de sistemas, también es necesario (dependiendo del caso) saber qué dispositivos son requeridos tales como: Amplificadores ópticos, acopladores, aisladores y circuladores.

3.8.1 Amplificadores ópticos

Toda señal óptica experimenta cierto grado de atenuación cuando se va propagando a través del medio, por lo que es necesario que dicha señal sea tratada durante su trayecto de tal manera que la potencia óptica recibida por el receptor sea considerable para que la señal sea detectada a un nivel confiable. En un sistema de comunicaciones óptico convencional son necesarios dispositivos llamados Regeneradores que se encargan de convertir la señal óptica en una señal eléctrica; la señal eléctrica es regenerada y amplificada; y por último es convertida nuevamente a una señal óptica y es enviada a través de la fibra. En un sistema WDM tendrían que ser utilizados una gran cantidad de regeneradores para amplificar las señales ópticas transmitidas, aunado a ello el costo de mantenimiento de la red se incrementaría, así como la utilización de repetidores caros debido al uso de electrónica de alta frecuencia y la poca flexibilidad en cuanto al aumento de la capacidad del canal.

La aparición de los amplificadores ópticos (OA) revoluciono en gran medida las comunicaciones ópticas ya que estos dispositivos se encargan de amplificar directamente la señal óptica sin necesidad de la conversión óptica-eléctrica-óptica. Esto es una gran ventaja para los sistemas DWDM ya que este tipo de dispositivo además de evitar dicha conversión puede amplificar un cierto rango de longitudes de onda.

3.8.1.1 Tipos de amplificadores ópticos

Dependiendo de la tecnología que se emplee para la fabricación de los amplificadores ópticos estos dispositivos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Amplificadores ópticos de semiconductor (SOA)
- Amplificadores de fibra dopada (OFA)
- Amplificadores ópticos basados en efectos no lineales de fibras ópticas (Brillouin y Raman)

Los amplificadores **SOA** se basan en los principios convencionales de un láser por lo que la amplificación de la señal se lleva a cabo por emisión estimulada. La señal es enviada a través de la región activa del semiconductor, la cual, es amplificada y emitida nuevamente hacia la fibra.

Los amplificadores basados en efectos no lineales específicamente los **Raman** (los amplificadores basados en el efecto Brillouin no tienen actualmente mucha aplicación en las redes prácticas) toman ventaja de los efectos no lineales que presenta la fibra de Sílice cuando la potencia es incrementada. Una porción de frecuencias incidentes son convertidas en otras frecuencias, que sumadas a las ondas de luz transmitidas ocasionan que la potencia de la señal sea incrementada.

Los Amplificadores ópticos de fibras dopadas con tierras raras (OFA, Optical Fiber Amplifiers) son fibras especiales dopadas con uno o más elementos pertenecientes a las tierras raras (Er, Yb, Nd, Pr) contenidas en el grupo de los Lantánidos. Su propósito es absorber energía óptica de un cierto rango espectral y emitir energía óptica en otro rango, especialmente en el rango útil para los sistemas de comunicaciones ópticas (800-900 ó 1300-1620 nm). A esta técnica en la que el elemento absorbe cierta energía y emite a otra se le denominada bombeo óptico. Cada uno de estos elementos tiene sus propias características de absorción y de emisión.

El amplificador más utilizado debido a que ha sido desarrollado ampliamente y ha llegado a estar dentro de un ámbito ya comercial es el EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). Este amplificador como su nombre lo dice esta dopado con Erblio cuyas bandas de absorción eficientes son 980 y 1480 nm y emite energía en la banda espectral de 1530-1565 nm la cual es utilizada en los sistemas WDM.

Dentro de las ventajas más importantes que estos dispositivos presentan es que son recomendables para aplicaciones de larga distancia, son transparentes al formato de modulación, son independientes de la polarización y presentan bajo ruido. Entre sus desventajas tenemos la diafonía además de que no son dispositivos pequeños por lo que no pueden ser integrados con otros dispositivos.

3.8.1.2 Limitantes de los amplificadores ópticos

Una limitación de los Amplificadores Ópticos es que no amplifica por igual todo el espectro de longitudes de onda. Esta desventaja, aunada con el ruido de amplificación limita el desempeño de estos dispositivos. Para mejorar el desempeño en cuanto a las variaciones del espectro de ganancia en algunos casos se utilizan filtros, los cuales atenúan la señal en una frecuencia seleccionada. De manera tal, que se trate de suprimir los picos del espectro de

ganancia y así lograr una ganancia por igual en todas las longitudes de onda. En otros casos, todas esas longitudes de onda son demultiplexadas y solo algunas de ellas son seleccionadas y atenuadas de manera tal que todas tengan la misma potencia.

3.8.2 Acopladores

Los acopladores son dispositivos que combinan o dividen el rayo de luz a la entrada o salida de la fibra. Son de gran utilidad ya que son la base para la creación de Multiplexores/Demultiplexores y de interferómetros (como el Mach-Zender) utilizados en la tecnología WDM. Estos acopladores pueden ser clasificados en tres tipos: Acopladores de difracción, de fibra fusionada y de guía de onda plana.

Existen principalmente tres tipos de acopladores: Acopladores 2x2, Acoplador Y y Acoplador Estrella.

El acoplador 2x2 es el tipo de acoplador básico con el cual se pueden tener dispositivos ópticos más complejos. Un acoplador de fibra fusionada 2x2 se obtiene fundiendo dos fibras en una sección de longitud. Esta fusión es de manera tal que los núcleos de las mismas se encuentren lo más cerca posible y así poder llevar a cabo el acoplamiento entre señales ópticas.

El acoplador Y se utiliza para varias aplicaciones tales como un divisor de potencia óptica, un combinador, un switch óptico, etc. Una de las desventajas de este dispositivo son las pérdidas que se presentan (principalmente pérdidas por radiación) en el punto de bifurcación.

El acoplador Estrella combina las señales ópticas introducidas a los puertos de entrada y divide la señal de salida en igual cantidad entre los puertos de salida. Estos acopladores pueden ser clasificados ampliamente en dos tipos: Acopladores estrella NxM y combinadores/divisores 1xM. Este tipo de acoplador puede ser realizado con la técnica de fusión de varias fibras.

En la figura 3.7 se muestra un esquema en donde se presentan un acoplador tipo 2x2, un acoplador tipo Y y un acoplador Estrella.

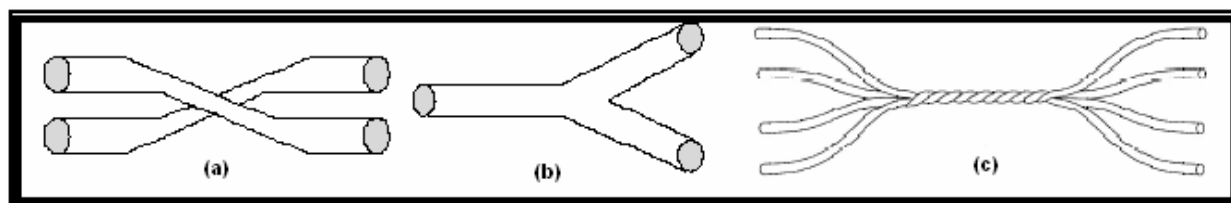


Fig. 3.7 Diagrama de los diferentes tipos de acopladores: (a) acoplador 2x2, (b) acoplador Y (c) acoplador estrella con fibras fusionadas

Estos dispositivos presentan las pérdidas de retorno y pérdidas por inserción. Las primeras se presentan cuando al entrar una señal al acoplador, una pequeña cantidad de potencia es reflejada en dirección opuesta y es regresada a la entrada del acoplador. El segundo tipo de pérdidas se presenta cuando se direcciona la luz fuera de las fibras.

3.8.3 Aisladores

Los sistemas de comunicaciones de fibras ópticas pueden ser afectados en su desempeño si parte de la potencia óptica enviada por la fuente es reflejada hacia la misma. Para prevenir estas reflexiones no deseadas son puestos aisladores ópticos. Los aisladores ópticos comercialmente disponibles utilizan el efecto Faraday, el cual consiste en cambiar el estado de polarización del campo incidente en presencia de un campo magnético paralelo a la dirección de propagación, este efecto esta representado en la fig. 3.8.

El proceso de aislamiento óptico es el siguiente: El plano de polarización de la luz a la salida de la lente es afectado por la orientación de un primer polarizador (vertical); en donde únicamente la componente vertical de la luz de entrada pasa a través de este polarizador. El Rotador Faraday este ajustado para rotar 45 grados, entonces a la salida del polarizador tendremos ese campo rotado 45 grados, esto implica que la salida de la luz del Rotador Faraday pasara a través de un segundo polarizador (cuya orientación es de 45 grados). La luz que regresa proveniente de las reflexiones no deseadas será nuevamente rotada cuando pase por el rotador Faraday, por tanto, la polarización de la luz reflejada será ortogonal a la orientación del polarizador de entrada y como consecuencia es bloqueada por éste.

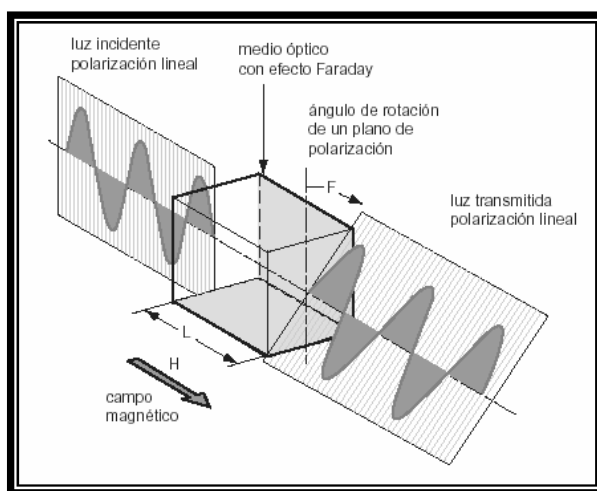


Fig. 3.8 Representación grafica del efecto Faraday

3.8.4 Circuladores

Un Circulador es un dispositivo óptico de n puertos. El modelo de un circulador para $n=3$ se muestra en la fig. 3.9. Idealmente en este dispositivo la potencia de entrada del puerto 1 es la salida del puerto 2, la potencia de entrada del puerto 2 es la salida del puerto 3 y la potencia de entrada del puerto 3 es la salida del puerto 1. Estos dispositivos son utilizados en diversas aplicaciones, una de estas es en los OADM's en donde es necesario extraer y adicionar señales ópticas, también son empleados en conjunto con las fibras FBG para la extracción de la señal seleccionada.

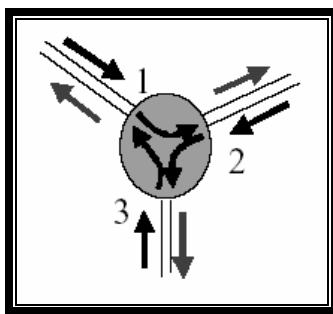


Fig. 3.9 Circulador con 3 puertos

3.9 COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA RED WDM [10][14][15][23]

Cuando se habla de una red DWDM son necesarios ciertos componentes que son muy importantes para el desempeño de dicha red, entre dichos componentes tenemos: Conectores de cruce óptico por sus siglas en inglés OXC, los Multiplexores ópticos de adición/extracción OADM, los convertidores de longitud de onda y los ruteadores WDM.

3.9.1 Conectores de cruce ópticos (OXC, Optical Cross Conect)

Un conector óptico de cruce (OXC) es un elemento constituyente de una red óptica cuya función es conmutar señales ópticas provenientes de varios puertos de entrada a diversos puertos de salida. Este tipo de dispositivos utilizados en una red DWDM tienen la característica de que son transparentes, es decir, insensibles a la longitud de onda, transparentes a las velocidades binarias e incapaces de demultiplexar una señal proveniente de la entrada de una fibra en sus diferentes longitudes de onda. Estos nodos además de realizar tareas de conmutación también pueden realizar tareas de descubrimiento de vecinos ópticos, de la topología y recursos de la red óptica.

3.9.2 Ruteadores

Un dispositivo que es muy importante en los sistemas WDM y que se encarga de dirigir las señales que llegan de diferentes entradas de las fibras a diferentes salidas de fibras ópticas es llamado Router o ruteador. Un ruteador de longitud de onda funciona demultiplexando las señales provenientes de los diferentes puertos de entrada (fibras) y dirigiendo cada longitud de onda separadamente hacia los diferentes puertos de salida en donde por ultimo, en dichos puertos, las señales nuevamente son multiplexadas. Existen dos tipos de ruteadores: Los de longitud de onda no configurables y los de longitud onda configurables, en el ultimo caso la función de ruteo es controlada electrónicamente.

3.9.3 Multiplexores Ópticos ADD – DROP (OADM)

Los multiplexores Add/Drop (Incrementador/Decrementador) juegan un papel muy importante en las redes WDM y tienen la función de extraer o insertar una longitud de onda determinada de un haz compuesto. El OADM extrae en su entrada una longitud de onda de una

multitud que viene por una fibra óptica, pudiendo agregar de nuevo esa longitud de onda a la salida, con un contenido de datos diferente.

Existen generalmente dos tipos de OADM. El primero esta conformado por multiplexores, demultiplexores y conmutadores ópticos que permiten extraer y agregar la señal óptica que va a ser tratada, estas señales están ya predeterminadas. En este tipo de dispositivos las señales provenientes de las diferentes fibras tienen primero que ser demultiplexadas para después seleccionar la señal de interés.

El segundo tipo es un OADM reconfigurable empleado en caso de que un solo canal sea requerido y no sea necesario demultiplexar todas las señales; por lo que envía un solo canal por un puerto, en tanto que los otros canales son transferidos a otro. Dichos dispositivos son comúnmente llamados filtros add/drop ya que filtran a la salida un canal específico sin afectar la señal WDM.

3.9.4 Convertidores de longitudes de onda

La conversión de longitud de onda es una pieza importante en los sistemas DWDM ya que una red que utiliza conversores resulta más fácil de gestionar ya que esta asignación se puede determinar de forma local. Por otro lado, el bloqueo de longitud de onda en los nodos ópticos puede reducirse cuando se conmuta en el dominio de la frecuencia. Por ello la red resulta más fácil y flexible de configurar.

La forma más directa de realizar la conversión de longitud de onda es la basada en un conversor electro-óptico, donde la señal se fotodetecta para modular posteriormente un láser o modulador externo. Sin embargo, esta técnica es válida para tasas de 2,5 Gbit/s e inferiores, ya que a mayores velocidades el consumo de potencia y el costo aumentan considerablemente. De hecho, a 40 Gbit/s sólo resulta factible la conversión de longitud de onda mediante dispositivos completamente ópticos.

3.10 CONCLUSIONES

WDM es una tecnología que surgió gracias al desarrollo de dispositivos tales como los multiplexores y demultiplexores ópticos que son los que se encargan de combinar y separar los canales ópticos. Aunado a estos, los amplificadores ópticos también han formado parte fundamental en el surgimiento de esta tecnología. La evolución de otros componentes tales como los emisores de luz (láseres) y las fibras ópticas, junto con otros dispositivos diversos que son empleados han permitido sin lugar a dudas que WDM haya tenido una evolución importante.

Gracias a esta evolución han surgido dos variantes importantes de WDM las cuales son: CWDM (Coarse Wavelength División Multiplexing) y DWDM (Dense Wavelength División Multiplexing). En el primer caso el espaciamiento entre canales es mayor y el ancho de banda a transmitir es menor, en el segundo caso el espaciamiento entre canales es menor y el ancho de banda transmitido es mayor. Dependiendo de las necesidades es empleada una u otra variante.

En CWDM y DWDM existe diferencia en cuanto a características de dispositivos tales como emisores de luz, fibras empleadas y mux/demux ópticos empleados. CWDM no requiere de dispositivos tan finos en cuanto a precisión ó dispositivos que tengan que emplear elementos de enfriamiento gracias al espaciamiento amplio entre canales (20 nm), además de que generalmente se emplea en casos en los que el crecimiento de demanda de ancho de banda no sea tan acelerado. Para DWDM si se requiere que los dispositivos empleados sean más precisos ya que el espaciamiento entre canales es muy reducido (hasta 0.4 nm) y tiene aplicación en redes de crecimiento de ancho de banda acelerado. También existe diferencia en cuanto a las bandas ópticas en las que operan.

Debido a la diferencia de dispositivos para CWDM y DWDM el costo entre una y otra es notorio, sin embargo nos permite poder elegir la que mas se adecue a nuestras necesidades económicas y de red.

4. EJEMPLO COMPARATIVO DE DISEÑO SDM Y WDM

4.1 LA TECNOLOGÍA WDM HOY EN DÍA

No cabe duda que la tecnología WDM (Wavelength Division Multiplexing) en todas sus variantes esta logrado incursionar en el mercado de las telecomunicaciones de banda ancha gracias a la gran cantidad de información que se puede transmitir y a las posibilidades de escalamiento que se puede obtener dependiendo de las necesidades del usuario. Esta tecnología a su vez esta permitiendo satisfacer el crecimiento desmedido de la capacidad en las redes de comunicaciones que se presentan hoy día. De igual manera se ajusta a la velocidad de los dispositivos electrónicos con los que se cuenta actualmente.

En los Estados Unidos, en donde las redes de fibra óptica han evolucionado considerablemente, WDM se ha consolidado como una de las tecnologías favoritas, debido a las enormes ventajas que ofrece en la optimización del uso del ancho de banda. Su implementación en los mercados de Europa, Asia y América Latina crece día con día, y son cada vez más las redes de cable que la utilizan para ofrecer multi-servicios [25].

Actualmente, WDM no es vista tan solo como una técnica para ampliar la capacidad de una red de fibra óptica, sino más bien, como una tecnología robusta en el "backbone" de redes multi-servicios y redes de acceso móvil, que permite satisfacer el crecimiento en volumen y complejidad que presentan los servicios de telecomunicaciones [25].

Dependiendo del tipo de aplicación es como se utiliza la tecnología WDM en las redes. Para pocas longitudes de onda relativamente se emplea CWDM (Coarse WDM, WDM amplio) en redes MAN (Metropolitan Area Network), cuando se requieren de mas longitudes de onda (más capacidad de transmisión) la tecnología DWDM (Dense WDM) es aplicada tanto en redes MAN, WAN (Wide Area Network) y redes de largo alcance (long-haul). En la tabla 4.1 se muestra una comparación de estas variantes. La tecnología CWDM es especialmente atractiva debido a su bajo coste. En comparación con DWDM, los sistemas CWDM proporcionan ahorros del orden de un 35% a 65% [26].

Tabla 4.1 Comparación entre tecnologías WDM dependiendo del tipo de aplicación

Aplicación/parámetro	CWDM acceso/MAN	DWDM MAN/WAN	DWDM largo alcance
Canales por fibra	4-16	32-80	80-160
Espectro utilizado	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Espaciado entre canales	20 nm (2500 GHz)	0,8 nm (100 GHz)	0,4 nm (50 GHz)
Capacidad por canal	2,5 Gbit/s	10 Gbit/s	10-40 Gbit/s
Capacidad de la fibra	20-40 Gbit/s	100-1000 Gbit/s	>1 Tbit/s
Distancia	hasta 80 km	cientos de km	miles de km

El WDM se consigue usando un multiplexor para combinar longitudes de onda viajando por diferentes fibras hacia una sola fibra. Al final del receptor de la conexión, un demultiplexor separa las longitudes de onda y las dirige hacia diferentes fibras que finalizan en diferentes

receptores ópticos. El espacio entre las longitudes de onda individuales transmitidas a través de la misma fibra sirve de base para diferenciar DWDM del CWDM.

El sistema CWDM ofrece algunas ventajas clave sobre los sistemas DWDM para aplicaciones que requieren hasta 18 o menos canales. Estos beneficios incluyen costes, requerimientos de energía y tamaño [19].

La diferencia de coste entre los sistemas CWDM y los DWDM pueden ser atribuidos al hardware y los costes operativos. El precio de los transceiver DWDM es en general de 4 a 5 veces más caros que los de sus homólogos CWDM. Los costes de los filtros CWDM son aproximadamente de unos 50% más baratos que los filtros del DWDM. Los costes operativos de los sistemas de transporte óptico dependen del mantenimiento y de la energía. Mientras que los costes de mantenimiento son comparables para ambos sistemas CWDM y DWDM, los requerimientos de energía para el DWDM son significativamente más altos. La medida de un láser DWDM de transmisión típico ocupa aproximadamente 5 veces el volumen de un transmisor CWDM [19].

4.2 ANALISIS COMPARATIVO DE DOS TIPOS DE MULTICANALIZACION: SDM Y WDM

En este punto se compararán dos tipos de multicanalización: por división de espacio (SDM) y por división de longitud de onda (WDM); tomando como ejemplo el diseño de un enlace sencillo de fibra óptica para ciertos requerimientos prácticos. Se tendrán en cuenta los dispositivos empleados para cada diseño de una forma muy general (enlace punto a punto) simplemente para mostrar las ventajas ó desventajas de ambos en cuanto al equipo requerido, desempeño, costo y escalabilidad.

4.2.1 Consideraciones de desempeño para un enlace óptico

Existen varias consideraciones que se tienen que tomar en cuenta cuando se trata de diseñar un enlace de comunicaciones para que la información que sea transmitida al medio presente el menor deterioro como sea posible; al mismo tiempo que se satisfaga las limitantes de diseño, como la energía transmitida, el ancho de banda y el costo permisible. Aquí se verán solo aquellas que son de importancia para el diseño de un enlace punto a punto digital óptico.

- A) BER (Bit error rate)
- B) Tasa de transmisión (Bit Rate).
- C) Dispersión
- D) Atenuación
- E) Presupuesto de potencias

Tasa de error de bit (BER): Se refiere a los bits de error que pueden estar contenidos dentro de cierta cantidad de bits. Es una medida de calidad de transmisión. Un sistema de comunicaciones ópticas este valor se encuentra del orden de 10^{-9} ó 10^{-12} .

Tasa de transmisión (BR): En un sistema digital la velocidad de transmisión es la capacidad de los sistemas de enviar un determinado número de bits en un segundo, es medido en consecuencia en b/s. En un sistema óptico que utiliza multiplexaje cada canal puede tener velocidades o tasas de transmisión del orden de los Gbit/s.

Dispersión: De igual manera se vio con anterioridad que el efecto de dispersión en un sistema de comunicaciones óptico afecta la cantidad de bits a transmitir en el enlace (tasa de transmisión), es por esto muy importante considerar esta característica y minimizar, dependiendo del caso, por medio de compensadores esta limitante.

Atenuación: Como se vio anteriormente una señal cuando viaja a través de un medio presenta disminución en su potencia, pero además de esto los dispositivos que son empleados durante el enlace influyen también en la atenuación de la señal. Es necesario considerar este parámetro para el diseño de la distancia a la que estarán colocados los regeneradores o amplificadores (dependiendo del caso) para restablecer la señal y que esta llegue con el menor deterioro posible.

Presupuesto de potencias: Esta característica es importante ya que con base a la potencia generada y a la atenuación que sufre la señal en su trayecto es necesario asegurar que la potencia de recepción será adecuada y correspondiente a las características del equipo de transmisión.

4.2.2 Metodología de diseño [23][24]

En forma muy general existe una metodología que se puede seguir en el diseño de un enlace de comunicaciones ópticas o cualquier enlace de comunicaciones. A continuación se describirá de una manera breve cada uno de estos pasos.

Primeramente se tienen que considerar los requerimientos o especificaciones del diseño tales como la distancia de transmisión, el ancho de banda, medio por el cual se quiere transmitir, etc. En segundo lugar ya que los requerimientos se hayan obtenido, es necesario seleccionar la arquitectura a utilizar para cubrirlos. Después se seleccionan los componentes que satisfagan las necesidades de acuerdo a los requerimientos y arquitectura determinada anteriormente. Se analiza que los componentes cumplan con las necesidades y por último es considerado el costo del diseño.

En el caso de un sistema de transmisión por fibra óptica se consideran dos parámetros que determinan que los requerimientos del enlace se cumplan. El primero de estos es el cálculo de la banda de paso, que define que la tasa de transmisión requerida pueda ser transportada sin problema a través del enlace con los dispositivos definidos en nuestro sistema. El segundo es el cálculo del presupuesto de potencia que nos define si la potencia óptica a la llegada del detector es suficiente para cumplir con el requerimiento de calidad de transmisión del sistema.

4.2.2.1 Cálculo de la banda de paso

En esta etapa del diseño de un enlace óptica se va a determinar por medio de los tiempos de subida de cada uno de los componentes que conforman el enlace, que el ancho de banda requerido se puede transmitir por el enlace, es decir, que cada uno de los componentes son capaces de dejar pasar esa cantidad de información solicitada. Para esto se va a considerar un enlace sencillo, únicamente con transmisor, fibra óptica y receptor óptico (fig. 4.1), mostrando de una forma sencilla el cálculo de la banda de paso.

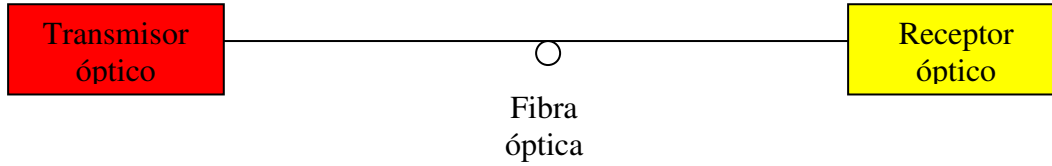


Fig. 4.4 Enlace sencillo en fibra óptica

La relación del tiempo de subida con la tasa de transmisión binaria esta dada por:

Para el código *RZ*

$$B_r = \frac{0.35}{T} \quad (4.1)$$

Para el código *NRZ*

$$B_r = \frac{0.7}{T} \quad (4.2)$$

Donde

B_r = Tasa de transmisión binaria

T = Tiempo de subida

En el cálculo de la banda de paso (o del tiempo de subida) de un enlace se debe cumplir:

$$T_T \leq T_S \quad (4.3)$$

Donde

T_T = Tiempo de subida total del enlace

T_S = Tiempo de subida requerido del enlace

Para el enlace sencillo en donde tenemos únicamente emisor, fibra óptica y detector óptico tenemos

$$T_T = \sqrt{T_{so}^2 + T_{fo}^2 + T_{do}^2} \quad (4.4)$$

Donde

T_{so} = Tiempo de subida de la fuente óptica

T_{fo} = Tiempo de subida de la fibra óptica

T_{do} = Tiempo de subida del detector óptico

En el caso del transmisor y del receptor, en la hoja de especificaciones se define el tiempo de subida de cada uno de estos componentes. En caso contrario teniendo la tasa de

transmisión binaria y dependiendo del código utilizado se puede utilizar la ecuación 4.3 ó 4.4 para obtener los tiempos de subida respectivos.

Para el cálculo de tiempo de subida de la fibra óptica monomodo tenemos

$$T_{fo} = \sqrt{\Delta t_c^2 + \Delta t_p^2} \quad (4.5)$$

Donde

Δt_c = Dispersión cromática presentada en la fibra

Δt_p = Dispersión por modo de polarización presentada en la fibra

A su vez la dispersión cromática

$$\Delta t_c = D_c * \Delta \lambda * L \quad [ps] \quad (4.6)$$

Donde

D_c = Coeficiente de dispersión cromática medido en $[ps / km * nm]$

$\Delta \lambda$ = Ancho espectral de la señal óptica modulada medido en $[nm]$

L = Longitud de la fibra dada en $[km]$

La dispersión de modo de polarización

$$\Delta t_p = D_p \sqrt{L} \quad [ps] \quad (4.7)$$

Donde

D_p = Coeficiente de dispersión por modo de polarización $[ps / \sqrt{km}]$

L = Longitud de la fibra dada en $[km]$

Teniendo estos datos de la fibra, emisor y detector óptico se puede obtener el tiempo de subida total y comparar el resultado con el tiempo de subida requerido para ver si los dispositivos empleados y la fibra son los más apropiados para nuestros requerimientos.

4.2.2.2 Cálculo energético

Este cálculo sirve para determinar si la potencia de llegada al receptor óptico es suficiente para que cubra su umbral de detección.

Se tiene que cumplir

$$P_{or} \geq P_{om} \quad (4.8)$$

Donde

P_{0r} = Potencia óptica recibida (valor promedio)

P_{0m} = Umbral de detección

La potencia óptica recibida se obtiene

$$P_{0r} = P_{0t} - (D_T + A + SM) \quad (4.9)$$

Donde

P_{0t} = Potencia transmitida acoplada en la fibra óptica [dBm]

SM = Margen seguro [dB]

A = Atenuación total en la fibra óptica [dB]

D_T = Pérdidas totales de acoplamiento debido a los conectores y a los empalmes [dB]

La potencia transmitida y el margen seguro son datos ya conocidos. Este segundo (SM) como su nombre lo indica se refiere a un margen dado que se toma en cuenta debido a la degradación que se puede presentar en algunos componentes, a las fluctuaciones de temperatura entre otras causas que se puedan presentar ocasionando mayor pérdidas en los componentes referidos a los que se nos proporcione por el fabricante. Se considera que su valor tiene que ser mayor a 4 dB y por lo general se toma un valor de 5 dB.

La atenuación en la fibra y las pérdidas totales debido a los conectores y empalmes se determinan de la siguiente manera:

$$A = \alpha * L \quad [dB] \quad (4.10)$$

Donde

α = Coeficiente de atenuación de la fibra óptica [dB / km]

L = Longitud de la fibra dada en [km]

Las pérdidas totales de acoplamiento debido a los conectores y a los empalmes

$$D_T = (N_c * A_c) + (N_e * A_e) \quad (4.11)$$

Donde

N_c = Número de conectores

A_c = Atenuación de cada conector

N_e = Número de empalmes

A_e = Atenuación de cada empalme

Con la obtención de estos valores podemos determinar si con los componentes de nuestro diseño la potencia recibida en el detector óptico es suficiente para cubrir nuestros requerimientos.

4.2.3 Requerimientos y arquitectura de las opciones propuestas

Tomando en cuenta un caso real de aplicación en redes de acceso y MAN, definimos los siguientes requerimientos. Transmitir la información con una tasa total a 10 Gb/s a una distancia total de 25 km, utilizando código NRZ y una $BER=10^{-9}$. El enlace como ya se había mencionado anteriormente en el punto 4.2 será un enlace punto a punto.

En día de hoy no es difícil transmitir información con dicha tasa. Ya existen en el mercado los sistemas y equipos correspondientes para las tasas de transmisión en un solo canal desde 10 a 50 Gb/s. El problema es que el precio del sistema crece muy rápido con el aumento de la tasa de transmisión del equipo por arriba de unos 2.5 Gb/s. Como alternativa más económica, se puede usar una de las técnicas de multicanalización con N canales, disminuyendo la tasa de un solo canal.

Entonces, analizaremos tres opciones del diseño del sistema de transmisión, tomando en cuenta la existencia de los componentes necesarios en el mercado y su precio relativo:

- 1) Sistema de multicanalización por división de espacio (SDM), utilizando N fibras con transmisión de un solo canal en cada fibra.
- 2) Sistema de multicanalización por división de longitud de onda robusta (CWDM), utilizando una sola fibra con N canales.
- 3) Transmisión con la tasa total requerida por un solo canal del sistema DWDM.

A continuación se presentan tres opciones mencionadas.

4.2.3.1 Opción empleando SDM

En este caso para cubrir la demanda de 10 Gb/s se requiere de la instalación por ejemplo de 6 fibras con un canal de 1.7 Gb/s en cada una como se ve en la figura 4.2. En esta opción por tener un solo canal en cada fibra, es lógico usar fibras monomodo convencional y la longitud de onda portadora alrededor de la longitud de onda de la dispersión cero 1310 nm (banda O).

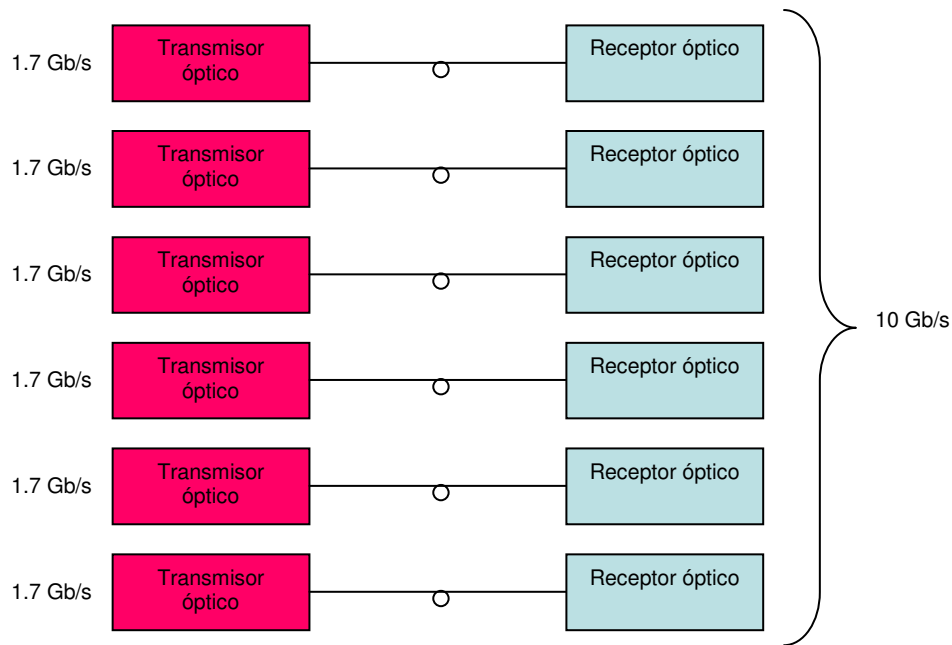


Fig. 4.2 Transmisión de 10 Gb/s utilizando el sistema SDM

4.2.3.2 Opción empleando CWDM

En esta opción se utilizarán la misma cantidad de transmisores y receptores que en el caso anterior, con longitudes de onda de las portadoras de canal en las bandas O y S, o L y C. La diferencia también radica en la utilización de una sola fibra, además de emplear un multiplexor óptico CWDM que multicanalice 6 canales ópticos provenientes de los transmisores con longitud de onda diferente y un demultiplexor óptico que separe 6 canales ópticos provenientes de la fibra. Ver la figura 4.3

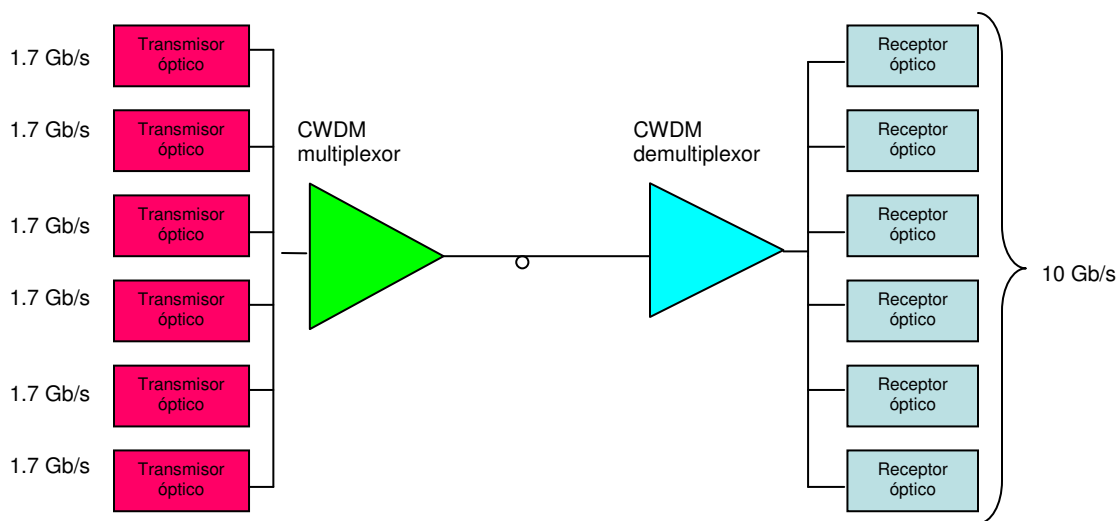


Fig. 4.3 Transmisión de 10 Gb/s utilizando el sistema CWDM

4.2.3.3 Opción empleando DWDM

En este caso para cubrir los requerimientos vamos a emplear el cálculo de un solo canal (es decir una sola longitud de onda) en la banda C alrededor de los 1550 nm de un sistema DWDM. Ver la siguiente figura (4.4).

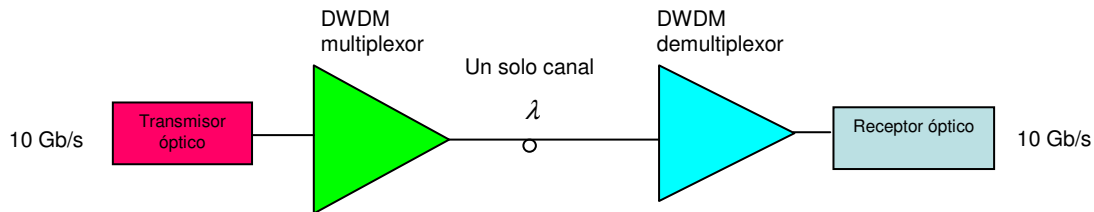


Fig. 4.4 Transmisión de 10 Gb/s utilizando un solo canal del sistema DWDM

4.2.4 Componentes y diseño de un enlace para las opciones propuestas

4.2.4.1 Diseño de un solo canal con la opción SDM

Para este caso se utiliza una fibra monomodo estándar marca Corning modelo SMF-28 (sus especificaciones están en el anexo A) regida por la norma ITU-T G.652. Trabajando con esta fibra alrededor de la ventana de los 1330 nm se va a considerar el diseño de un solo canal teniendo en cuenta los siguientes datos:

Coefficiente de dispersión cromática $D_c \leq 3.5 \text{ ps/nm*km}$ y coeficiente de atenuación $\alpha = 1 \text{ dB/km}$. (se tomo el coeficiente de atenuación mas alto)

El transmisor óptico es un módulo DFB láser de la serie FOL15DDBx-A31-Wxxxx de la marca FITELE (sus especificaciones están en el anexo B) directamente modulado cuyas características principales son:

$\Delta\lambda = 0.4 \text{ nm}$ del ancho espectral

$T_{so} = 150 \text{ ps}$ del tiempo de subida

$P_t = 7 \text{ dBm}$ de la potencia máxima de salida

El receptor óptico es un módulo A 1924 DMS de la marca LASER 2000 (sus especificaciones están en el anexo C) cuyas características principales son:

2.5 Gb/s de la tasa de transmisión

-34 dBm del umbral de detección para una BER de 10^{-9} .

Calculo de banda de paso

Ya sabemos de los datos anteriormente proporcionados del láser

$$\Delta\lambda = 0.4 \text{ nm}$$

$$T_{so} = 150 \text{ ps}$$

El detector óptico trabaja a 2.5 Gb/s para lo cual utilizando la ecuación 4.2 tenemos

$$T_{do} = \frac{0.7}{2.5 \times 10^9} = 280 \text{ ps}$$

Para la fibra óptica utilizamos las ecuaciones 4.5, 4.6 y 4.7 respectivamente

$$T_{fo} = \sqrt{\Delta t_c^2 + \Delta t_p^2}$$

$$\Delta t_c = (3.5 \text{ ps} / \text{nm} * \text{km}) * (0.4 \text{ nm}) * (25 \text{ km}) \quad [\text{ps}]$$

$$\Delta t_c = 35 \text{ ps}$$

Comúnmente el coeficiente de dispersión por modo de polarización es igual $0.1 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$ por lo que

$$\Delta t_p = 0.1 \times \sqrt{25}$$

$$\Delta t_p = 0.5 \text{ ps}$$

Como se puede observar $\Delta t_p \ll \Delta t_c$ por lo que para fines prácticos se puede despreciar el valor de la dispersión por modo de polarización entonces

$$T_{fo} \cong \Delta t_c$$

$$T_{fo} = 35 \text{ ps}$$

El tiempo de subida total de la ecuación 4.5

$$T_T = \sqrt{150^2 + 280^2 + 35^2}$$

$$T_T = 320 \text{ ps}$$

Para nuestro requerimiento de una tasa de transmisión 1.7 Gb/s e igualmente con la ecuación 4.2 tenemos que nuestro tiempo de subida requerido es

$$T_s = \frac{0.7}{1.7 \times 10^9} = 412 \text{ ps}$$

Por lo que se cumple la condición de $T_T < T_s$.

Cálculo energético

Para el cálculo energético recordamos que se tiene que cumplir

$$P_{0r} \geq P_{0m}$$

De los datos anteriormente proporcionados tenemos

$$P_{0m} = -34 \text{ dBm}$$

Tomando en cuenta la potencia máxima $P_t = 7 \text{ dBm}$ y una relación cíclica de 0.5, la potencia óptica promedio transmitida es

$$P_{0t} = P_t - 3 \text{ dB} = 4 \text{ dBm}.$$

La atenuación total de la fibra A con la ecuación 4.10

$$A = (1 \text{ dB/km}) \times (25 \text{ km}) = 25 \text{ dB}$$

Considerando que las pérdidas totales de acoplamiento debido a los conectores y a los empalmes $D_T = 3 \text{ dB}$ y además considerando un margen seguro $SM = 6 \text{ dB}$.

Por lo que la potencia óptica recibida dada la ecuación 4.9

$$P_{0r} = 4 - (3 + 25 + 6)$$

$$P_{0r} = -30 \text{ dBm}$$

Con estos componentes se cumple que $P_{0r} \geq P_{0m}$ para nuestro enlace punto a punto.

4.2.4.2 Diseño de un solo canal con la opción CWDM

En este caso se empleará la misma fibra, los mismos transmisor y receptor óptico.

Con la fibra monomodo estándar y considerando un solo canal con una tasa de transmisión igual que el caso anterior 1.7 Gb/s pero ahora trabajando en las bandas L y C se tienen los siguientes datos:

Coefficiente de dispersión cromática $D_c \leq 20 \text{ ps} / \text{nm} * \text{km}$ y coeficiente de atenuación $\alpha = 0.5 \text{ dB} / \text{km}$.

Calculo de banda de paso

Se utiliza el mismo láser que en el caso anterior cuyas características son:

$$\Delta\lambda = 0.4 \text{ nm}$$

$$T_{so} = 150 \text{ ps}$$

El detector óptica es el mismo que en el caso anterior por lo que

$$T_{do} = 280 \text{ ps}$$

Haciendo el mismo procedimiento que para el caso anterior

$$T_{fo} = \sqrt{\Delta t_c^2 + \Delta t_p^2}$$

La dispersión cromática la obtenemos

$$\Delta t_c = (20 \text{ ps} / \text{nm} * \text{km}) * (0.4 \text{ nm}) * (25 \text{ km}) \quad [\text{ps}]$$

$$\Delta t_c = 200 \text{ ps}$$

Como en el caso anterior se puede despreciar la dispersión por modo de polarización:

$$T_{fo} \cong \Delta t_c$$

$$T_{fo} = 200 \text{ ps}$$

Obteniendo el tiempo de subida total

$$T_T = \sqrt{150^2 + 280^2 + 200^2}$$

$$T_T = 375 \text{ ps}$$

Sabemos que nuestro tiempo de subida requerido es

$$T_s = 412 \text{ ps}$$

Por lo que nuestros componentes del enlace también cumplen con las condiciones energéticas de nuestro requerimiento $T_T < T_s$.

Cálculo energético

Para el cálculo energético de la misma manera que el caso anterior

$$P_{0r} \geq P_{0m}$$

Tomando en cuenta la potencia máxima $P_t = 7 \text{ dBm}$ y una relación cíclica de 0.5, la potencia óptica promedio transmitida es

$$P_{0t} = P_t - 3 \text{ dB} = 4 \text{ dBm}.$$

La atenuación total de la fibra A es

$$A = (0.5 \text{ dB/km}) \times (25 \text{ km}) = 12.5 \text{ dB}$$

Considerando que la atenuación de los conectores y los empalmes es la misma 3 dB y además considerando el mismo margen seguro $SM = 6 \text{ dB}$.

Por lo que la potencia óptica recibida es

$$P_{0r} = 4 - (3 + 12.5 + 6)$$

$$P_{0r} = -17.5 \text{ dB}$$

Como $P_{0r} \geq P_{0m}$ se concluye que se están cumpliendo los requerimientos energéticos. Sin embargo, se puede observar que esta relación está cumpliendo con un margen muy grande. Lo que ofrece una posibilidad de escoger un receptor óptico menos sensible (con el umbral de detección mayor) disminuyendo en esta manera el precio total del enlace.

4.2.4.3 Diseño de un canal utilizando la opción DWDM

Para ello vamos a emplear un transmisor óptico E4560 de la marca CyOptics (sus especificaciones están en el anexo D) que trabaja a una tasa de transmisión de 10 Gb/s cuyas características son las siguientes:

$$\Delta\lambda = 0.13 \text{ nm}$$

$$T_{so} = 40 \text{ ps}$$

$$P_i = 3 \text{ dBm}$$

El receptor óptico es un módulo EM4 (sus especificaciones están en el anexo E) que trabaja a 10 Gb/s cuyas características son:

$$P_{0m} = -18 \text{ dBm} \text{ para una BER de } 10^{-9}$$

$$\text{y tiempo de subida } T_{do} = 40 \text{ ps}$$

La fibra óptica empleada es una fibra monomodo NZ-DSF cuyas características son (ver Anexo A):

Coeficiente de dispersión cromática $D_c = 4.6 \text{ ps/nm*km}$ y coeficiente de atenuación $\alpha = 0.30 \text{ dB/km}$.

Calculo de banda de paso

La tasa de transmisión es de 10 Gb/s por lo que el tiempo requerido para esta tasa de transmisión empleando la ecuación 4.4 es

$$T_s = \frac{0.7}{10 \times 10^9} = 70 \text{ ps}$$

y se tiene que cumplir $T_T < T_s$

Sabemos que del transmisor óptico

$$\Delta\lambda = 0.13 \text{ nm}$$

$$T_{so} = 40 \text{ ps}$$

Del detector óptico el tiempo de subida es $T_{do} = 40 \text{ ps}$

Para obtener el tiempo de subida de la fibra óptica se utilizarán las ecuaciones 4.5, 4.6 y 4.7 respectivamente

$$T_{fo} = \sqrt{\Delta t_c^2 + \Delta t_p^2}$$

La dispersión cromática

$$\Delta t_c = (4.6 \text{ ps/nm*km}) * (0.13 \text{ nm}) * (25 \text{ km}) \quad [\text{ps}]$$

$$\Delta t_c = 15 \text{ ps}$$

Si tomamos el coeficiente de dispersión del mismo valor que en los casos anteriores de $0.1 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$, la dispersión de modo de polarización

$$\Delta t_p = 0.1 \times \sqrt{25}$$

$$\Delta t_p = 0.5 \text{ ps}$$

Entonces, la dispersión total de fibra óptica

$$T_{fo} = \sqrt{15^2 + 0.5^2}$$

$$T_{fo} \cong 15 \text{ ps}$$

De la ecuación 4.5 el tiempo de subida total

$$T_T = \sqrt{40^2 + 15^2 + 40^2}$$

$$T_T = 58.5 \text{ ps}$$

Como $T_s = 70 \text{ ps}$, se cumple la condición de $T_T < T_s$

Cálculo energético

Para el cálculo energético recordamos

$$P_{0r} \geq P_{0m}$$

En el caso del receptor óptico de los datos anteriormente proporcionados tenemos

$$P_{0m} = -18 \text{ dBm}$$

Tomando en cuenta la potencia máxima $P_t = 3 \text{ dBm}$ y una relación cíclica de 0.5, la potencia óptica promedia transmitida es

$$P_{0t} = P_t - 3 \text{ dB} = 0 \text{ dBm}.$$

La atenuación total de la fibra A con la ecuación 4.10

$$A = (0.30 \text{ dB} / \text{km}) \times (25 \text{ km}) = 7.5 \text{ dB}$$

Considerando que la atenuación de los conectores y los empalmes es de 3 dB y además considerando un margen seguro $SM = 6 \text{ dB}$.

Por lo que la potencia óptica recibida dada la ecuación 4.9

$$P_{or} = 0 - (3 + 7.5 + 6)$$

$$P_{or} = -16.5 \text{ dB}$$

Como $P_{om} = -18 \text{ dBm}$, se cumple entonces que $P_{or} \geq P_{om}$.

Como se puede observar, empleando DWDM utilizando una sola longitud de onda se pueden cubrir los requerimientos definidos en nuestro caso.

4.2.5 Comparación entre las diversas opciones para cubrir los requerimientos

Como se puede observar, en el primer caso (SDM) se requiere de la instalación de 6 fibras en total para poder cubrir los requerimientos del incremento en la demanda del ancho de banda. Esto implica un costo en cuanto a la instalación de más fibra así como en los permisos de tendido de la misma. En el segundo caso donde se emplea la tecnología CWDM son transmitidos varios canales ópticos a través de una sola fibra óptica, sin embargo es necesaria la utilización de equipos llamados multiplexores y demultiplexores ópticos para poder combinar y separar las señales provenientes de los diferentes transmisores y receptores ópticos respectivamente. En ambos casos se empleó la misma fibra al igual que los mismos transmisores y receptores. Entonces, la diferencia entre los costos totales de los enlaces correspondientes a los primeros dos casos es la diferencia entre el costo de 5 fibras adicionales para el caso de SDM y el costo de un juego de multiplexor/demultiplexor óptico para el caso de CWDM.

En el último caso se cubrieron los requerimientos solicitados empleando la tecnología DWDM utilizando únicamente un canal de transmisión. Para esta opción el transmisor y el detector óptico así como la fibra fueron distintos a los del caso anterior. Aquí también es utilizado un juego de multiplexor/demultiplexor óptico pero no combinó mas canales debido a que con un solo canal fue suficiente. A pesar la reducción del número de canales y el equipo correspondiente en este caso hasta un solo canal, el costo total puede resultar igual o mayor por el precio mas alto de los componentes de DWDM (en particular los transmisores).

Estas tres opciones que fueron empleadas para cubrir la demanda solicitada se pueden comparar en cuanto a escalabilidad. Mientras que en SDM se instala más fibra ya no tenemos escalamiento en cuanto a ancho de banda debido a que se necesita compra e instalación de fibra a medida que la demanda vaya creciendo. En las dos restantes (CWDM y DWDM) es necesario comprar únicamente un juego de multiplexor/demultiplexor óptico correspondiente una sola vez y en la medida que la demanda sea mayor solo se requerirá la compra de transmisores y detectores ópticos (al igual que en SDM) pero con la ventaja de que ya no se instalará más fibra y que los mux/demux ópticos proveerán de escalamiento para demandas futuras.

4.3 CONCLUSIONES

CWDM y DWDM definitivamente son variantes que se emplean en nichos diferentes de mercado, ya que la primera puede multicanalizar hasta 16 canales mientras que la segunda puede lograr hasta 160 canales.

En el ejemplo de diseño mostrado para un enlace punto a punto se puede observar que para satisfacer los requerimientos las tres opciones son aceptables. Sin embargo específicamente en el caso SDM y CWDM el nicho de mercado sería el mismo, es decir, en donde la tasa de transmisión sea del orden de unas decenas de Gbit/s y la distancia de transmisión de unos cuantos kilómetros aunado a un crecimiento de demanda no tan acelerada. En este caso se podría utilizar una u otra opción pero hay que destacar que si queremos en determinado momento escalar nuestra red para satisfacer cierta demanda, en el caso de SDM se tendría que instalar una nueva fibra y para CWDM solo agregaríamos un emisor y receptor más para insertar un canal que cubra mis requerimientos, en este caso no tendríamos la necesidad de instalar más fibra a lo que se agregan los permisos de tendido y el tiempo y costo de instalación.

Para el caso DWDM el mercado al que esta dirigido es a redes de tráfico pesado, ya que puede lograr tasas de transmisión del orden de los Tbit/s y distancias de miles de kilómetros (experimentalmente). Si bien los equipos DWDM en la actualidad parecen ser costosos poco a poco este costo se va compensando con las demandas cada vez mayores de ancho de banda que se pueden ofrecer.

Cabe aclarar que en este capítulo lamentablemente no se pudo dar un ejemplo en cuanto a costos específicos de equipos y de tendidos de fibra para lograr un resultado comparativo más exacto, debido a que la información de los costos de algunos equipos no es fácilmente proporcionada por los fabricantes.

CONCLUSIONES GENERALES

La tecnología WDM (Wavelength División Multiplexing) y en particular DWDM (Dense WDM) es la opción de multiplexaje más viable que se presenta actualmente en los sistemas fibras ópticas para satisfacer las demandas de ancho de banda que han surgido en el mercado de las telecomunicaciones en el transcurso de los últimos años. Gracias a sus características particulares ha logrado incursionar en el mercado de las telecomunicaciones y se perfila como la tecnología de gran auge dentro de las comunicaciones ópticas a futuro.

WDM surgió gracias al desarrollo de equipos tales como multiplexores y demultiplexores ópticos principalmente, que son los que se encargan de combinar los diferentes canales ópticos para que sean transportados por la fibra, además amplificadores ópticos que permiten amplificar todos los canales espectrales a la vez. Otro desarrollo importante para WDM fue el surgimiento de nuevas fibras ópticas, las cuales fueron mejoradas para minimizar los efectos de dispersión y de atenuación en las diferentes ventanas ópticas de transmisión, de tal manera que se pudiera aprovechar un poco más su ancho de banda y su alcance.

Según del estudio hecho sobre la situación actual en el área de comunicaciones ópticas, el gran ancho de banda previsto de fibras ópticas puede ser realizado plenamente por medio de la versión DWDM de la tecnología WDM. Pero el uso de esta opción es limitado todavía con sistemas de distancia larga, redes globales y nacionales (WAN), que tienen un tráfico intenso y estable con grandes tasas de transmisión de datos. Sin embargo, en los casos particulares de las redes metropolitanas y locales (MAN y LAN) existen otras opciones más económicas, que permiten cubrir las demandas actuales de ancho de banda, tal es el caso por ejemplo la tecnología tradicional SDM (Multiplexaje por División de Espacio), en el que se puede aumentar la cantidad de información a transmitir instalando más fibras y cuyo ancho de banda total transmitido es la suma de los anchos de banda de todos canales transmitidos por uno solo en cada fibra.

Por medio del diseño de un enlace de punto a punto para una aplicación particular con tres opciones diferentes (SDM, CWDM y DWDM), se confirmó que la tecnología SDM es económicamente viable solamente para las distancias cortas (de unas decenas de kilómetros) y tasas de transmisión total relativamente bajas (de una decena de Gbit/s). Bajo estas circunstancias una de las versiones actuales de la tecnología WDM denominada CWDM (Coarse WDM) puede competir económicamente con la tecnología SDM, además ofreciendo la posibilidad de escalamiento sin necesidad de instalar más fibras.

DWDM como cualquier tecnología nueva que surge puede ser al principio una tecnología costosa por los equipos que utiliza, sin embargo si se considera que el crecimiento de demanda en cuanto a ancho de banda se incrementa de manera acelerada los costos se pueden ver recompensados y en un futuro hasta saldría más barato que si se instalará cada vez más fibra. Es por esto que DWDM se considera una buena alternativa para dar solución a la problemática a la que se enfrentan los sistemas de Telecomunicaciones en la actualidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Principios de teoría de las comunicaciones
Raúl Ibarra Quevedo
Miguel Serrano López
Editorial Limusa
2001
321 p.

- [2] Introducción a la telecomunicación
Pablo A. Bernabeu Soler
Jorge Igual García
Andrés Camacho García
Universidad Politécnica de Valencia
1996
275 p.

- [3] Fundamentos de Telecomunicación
Beatriz Ortega
Santiago J. Flores
Universidad Politécnica de Valencia
1999
199 p.

- [4] Principio de telecomunicaciones segunda edición
J.J. O'Reilly
Addison-Wesley Iberoamericana
1994
169 p.

- [5] Telecommunications topics: applications of functions and probabilities in electronic communications
E. Bryan Carne
Prentice Hall
1999
402 p.

- [6] Comunicación entre computadoras y tecnología de redes
Michael A. Gallo
William M. Hancock
Editorial Thomson
2002
632 p.

- [7] Teleinformática para ingenieros en sistemas de información
Segunda edición
Antonio Ricardo Castro Lechtaler
Rubén Jorge Fusario
Editorial Reverte
1999
744 p.
- [8] <http://www.spie.org/web/oer/november/nov00/wdm.html>
- [9] http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/mels/cm1500/dwdm/dwdm_fns.htm
- [10] Optical Networks: a practical perspective 2nd ed.
Rajiv Ramaswami
Kumar N. Sivarajan
2002
831 p.
- [11] <http://www.eveliux.com/articulos/sdhsonet.html>
- [12] <http://www.radioptica.com/Fibra/dwdm.asp>
- [13] Introduction to information optics
Francis T.S. Yu
Suganda Jutamulia
Shizhuo Yin
2001
734 p.
- [14] Introduction to DWDM technology
Stamatios V. Kartalopoulos
IEEE Press Editorial
2000
257 p.
- [15] DWDM: networks, devices, and technology
Stamatios V. Kartalopoulos
IEEE Press Editorial
2001
487 p.
- [16] DWDM Fundamentals, components, and applications
Jean- Pierre Laude
Artech House
2002
282 p.

- [17] www.cisco.com
- [18] http://www.cubeoptics.com/img/FCKeditor/File/cwdm_white_paper.pdf
- [19] http://www.w-onesys.com/pdf_s/Tecnologia.pdf
- [20] http://www.rbni.com/rbn_cwdm_white_paper-1_20sep02.pdf
- [21] <http://www.fiber-optics.info/articles/cwdm.htm>
- [22] <http://www2.alcatel.es/Review/docs/article/Primer%20Trimestre%20-%202002/12002p52.pdf>
- [23] Fiber-Optic Communication Systems
Third Edition
Govind P. Agrawal
Wiley Interscience
2002
531 p.
- [24] Introducción a las telecomunicaciones por fibras ópticas
Jean Pierre Nérrou
Editorial Trillas
1991
337 p.
- [25] <http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=1>
- [26] <http://www.radioptica.com/Fibra/cwdm.asp>
- [27] <http://www.corning.com/opticalfiber/>
- [28] http://www.fitel.com/index_f.htm
- [29] <http://www.laser2000.fr/produits/telecom.html>
- [30] <http://www.cyoantics.com/products/>
- [31] <http://www.em4inc.com/products.htm>
- [32] Electromagnetismo
Tercera Edición
John D. Kraus
Editorial McGRAW-HILL
1986
829 p.

[33] Fundamentos de telemática
Jorge Lázaro Laporta
Marcel Miralles Aguiñiga
Editorial Alfa Omega
2004
397p.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

Fiber Optic Communications Design Handbook
Robert J. Hoss
Prentice Hall
1990
432 p.

WDM technologies: active optical components
Achyut K. Dutta
Niloy K. Dutta
Masahiko Fujiwara
Academic
2002

<http://www-optica.inaoep.mx/investigadores/carlost/pdfs/Danielceballos.pps>

http://www.tfo.upm.es/docencia/2002_03/Pasivos.pdf

<http://www.conelectronica.com/articulos/fibra61.htm>

<http://ttt.upv.es/~framos/Fibra/tecnicas.html>

<http://ttt.upv.es/~framos/Fibra/cwdm.html>

<http://www.conelectronica.com/articulos/fibra61.htm>

<http://www-optica.inaoep.mx/investigadores/carlost/pdfs/Danielceballos.pps>

http://www.tfo.upm.es/docencia/2002_03/Pasivos.pdf

<http://www.conelectronica.com/articulos/fibra61.htm>

<http://ttt.upv.es/~framos/Fibra/tecnicas.html>

<http://ttt.upv.es/~framos/Fibra/cwdm.html>

<http://www.conelectronica.com/articulos/fibra61.htm>

[http://tools.cisco.com/cmn/jsp/index.jsp?id=42243&redir=YES&userid=\(none\)](http://tools.cisco.com/cmn/jsp/index.jsp?id=42243&redir=YES&userid=(none))

http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/mels/cm1500/dwdm/dwdm_ovr.htm

http://www.cisco.com/web/learning/le3/ccie/sp/online_resources.html

<http://www.radioptica.com/Fibra/dwdm.asp>

http://www.frsf.utn.edu.ar/catedras/sistemas/comunicaciones/herramientas/caracteristicas_fo.html

ANEXOS

HOJAS DE ESPECIFICACIONES

Anexo A SMF-28 fiber, Corning LEAF fiber [27]

Anexo B DFB láser FOL15DDBx-A31-Wxxxx series[28]

Anexo C Receiver module A 1924 DMS [29]

Anexo D Transmission module E4560 series [30]

Anexo E PIN receiver EM4 [31]

Anexo A

FIBRA MONOMODO ESTANDAR	ITU-T G.652
Longitud onda corte	1,18 a 1,27 μm
Diámetro del campo modal	9,3 (8 a 10) μm (+/- 10%)
Diámetro del revestimiento	125 μm (+/- 3 μm)
Recubrimiento de silicona (Coating)	245 μm (+/- 10 μm). Acrilato curado con UV.
Error de circularidad del revestimiento	2%
Error de concentricidad del campo modal	1 μm
Atenuación para 1300 nm	de 0,4 a 1 dB/km
Atenuación para 1550 nm	de 0,25 a 0,5 dB/km
Dispersión cromática 1285-1330 nm	3,5 ps/km.nm
Dispersión cromática 1270-1340 nm	6 ps/km.nm
Dispersión cromática en 1550 nm	20 ps/km.nm

FIBRA MONOMODO <i>NON ZERO DISPERSION SHIFT</i>	ITU-T G.655
Diámetro del campo modal	8,4 μm (+/- 0,6 μm). Diámetro núcleo 6 μm .
Diámetro del revestimiento	125 μm (+/- 1 μm)
Longitud de onda de corte	1260 nm
Atenuación	Desde 0,22 a 0,30 dB/Km en 1550 nm
Dispersión cromática	4,6 ps/km.nm en 1550 nm
Zona de dispersión no-nula	Desde 1540 a 1560 nm

Corning® SMF-28™ Optical Fiber

Product Information



PI1036

Issued: April 2002

Supersedes: December 2001

ISO 9001 Registered

Corning® Single-Mode Optical Fiber

The Standard For Performance

Corning® SMF-28™ single-mode optical fiber has set the standard for value and performance for telephony, cable television, submarine, and utility network applications. Widely used in the transmission of voice, data, and/or video services, SMF-28 fiber is manufactured to the most demanding specifications in the industry. SMF-28 fiber meets or exceeds ITU-T Recommendation G.652, TIA/EIA-492 CAAA, IEC Publication 60793-2 and GR-20-CORE requirements.

Taking advantage of today's high-capacity, low-cost transmission components developed for the 1310 nm window, SMF-28 fiber features low dispersion and is optimized for use in the 1310 nm wavelength region. SMF-28 fiber also can be used effectively with TDM and WDM systems operating in the 1550 nm wavelength region.

Features And Benefits

- Versatility in 1310 nm and 1550 nm applications
- Enhanced optical properties that optimize transmission performance
- Outstanding geometrical properties for low splice loss and high splice yield
- OVD manufacturing reliability and product consistency
- Optimized for use in loose tube, ribbon, and other common cable design

The Sales Leader

Corning SMF-28 fiber is the world's best selling fiber. In 2001, SMF-28 fiber was deployed in over 45 countries around the world. All types of network providers count on this fiber to support network expansion into the 21st Century.

Protection And Versatility

SMF-28 fiber is protected for long-term performance and reliability by the CPC® coating system. Corning's enhanced, dual acrylate CPC coatings provide excellent fiber protection and are easy to work with. CPC coatings are designed to be mechanically stripped and have an outside diameter of 245 µm. They are optimized for use in many single- and multi-fiber cable designs including loose tube, ribbon, slotted core, and tight buffer cables.

Patented Quality Process

SMF-28 fiber is manufactured using the Outside Vapor Deposition (OVD) process, which produces a totally synthetic ultra-pure fiber. As a result, Corning SMF-28 fiber has consistent geometric properties, high strength, and low attenuation. Corning SMF-28 fiber can be counted on to deliver excellent performance and high reliability, reel after reel. Measurement methods comply with ITU recommendations G.650, IEC 60793-1, and Bellcore GR-20-CORE.

Optical Specifications

Attenuation

Wavelength (nm)	Attenuation* (dB/km)	
	Premium	Standard
1310	≤0.34	≤0.35
1550	≤0.20	≤0.22

*Alternate attenuation values available upon request

Point Discontinuity

No point discontinuity greater than 0.10 dB at either 1310 nm or 1550 nm.

Attenuation at the Water Peak

The attenuation at 1383 ± 3 nm shall not exceed 2.1 dB/km.

Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1285 - 1330	1310	0.05
1525 - 1575	1550	0.05

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α.

Attenuation with Bending

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550	≤0.50
50	100	1310	≤0.05
50	100	1550	≤0.10
60	100	1550	≤0.05

*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

Cable Cutoff Wavelength (λ_{cct})

$$\lambda_{cct} \leq 1260 \text{ nm}$$

Mode-Field Diameter

$$9.2 \pm 0.4 \text{ } \mu\text{m at 1310 nm}$$

$$10.4 \pm 0.8 \text{ } \mu\text{m at 1550 nm}$$

Dispersion

Zero Dispersion Wavelength (λ₀):

$$1302 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1322 \text{ nm}$$

Zero Dispersion Slope (S₀):

$$\leq 0.092 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$$

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) \approx \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}),$$

for 1200 nm ≤ λ ≤ 1600 nm

λ = Operating Wavelength

Polarization Mode Dispersion

Fiber Polarization Mode Dispersion (PMD)

Value (ps/√km)	
PMD Link Value	≤ 0.1*
Maximum Individual Fiber	≤ 0.2

* Complies with IEC 60794-3:2001, section 5.5, Method 1, September 2001.

The PMD link value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as the link quadrature average). This value is used to determine a statistical upper limit for system PMD performance.

Individual PMD values may change when cabled. Corning's fiber specification supports network design requirements for a 0.5 ps/√km maximum PMD.

Environmental Specifications

Environmental Test Condition	Induced Attenuation 1310 nm/1550 nm (dB/km)
Temperature Dependence -60°C to +85°C*	≤0.05
Temperature-Humidity Cycling -10°C to +85°C*, up to 98% RH	≤0.05
Water Immersion, 23±2°C*	≤0.05
Heat Aging, 85±2°C*	≤0.05

*Reference temperature = +23°C

Operating Temperature Range

-60°C to +85°C

Dimensional Specifications

Length (km/reel): fiber lengths available up to 50.4*

* Longer spliced lengths available at a premium.

Glass Geometry

Fiber Curl: ≥ 4.0 m radius of curvature

Cladding Diameter: 125.0 ± 0.7 μm

Core-Clad Concentricity: ≤ 0.5 μm

Cladding Non-Circularity: ≤ 1.0%

Defined as: $\left[1 - \frac{\text{Min. Cladding Diameter}}{\text{Max. Cladding Diameter}} \right] \times 100$

Coating Geometry

Coating Diameter: 245 ± 5 μm

Coating-Cladding Concentricity: <12 μm

Mechanical Specifications

Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile proof stress ≥ 100 kpsi (0.7 GN/m²)*.

* Higher proof test levels available at a premium.

Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Core Diameter: 8.2 μm

Numerical Aperture: 0.14

NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.

Zero Dispersion Wavelength (λ_0): 1313 nm

Zero Dispersion Slope (S_0): 0.086 ps/(nm²•km)

Refractive Index Difference: 0.36%

Effective Group Index of Refraction, (N_{eff} @ nominal MFD):

1.4677 at 1310 nm

1.4682 at 1550 nm

Fatigue Resistance Parameter (n_d): 20

Coating Strip Force:

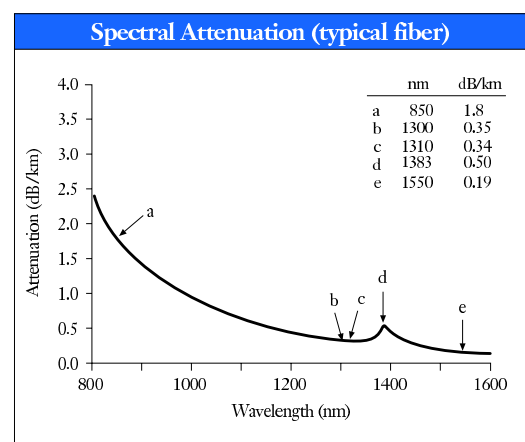
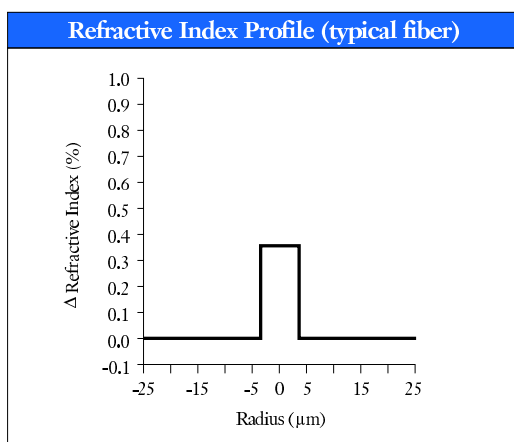
Dry: 0.6 lbs. (3N)

Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)

Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns pulse width):

1310 nm: -77 dB

1550 nm: -82 dB



Ordering Information

To order Corning® SMF-28™ fiber, contact your sales representative, or call the Optical Fiber Customer Service Department at **607-248-2000** or **+44-1244-287-437** in Europe. Please specify the following parameters when ordering.

Fiber Type: Corning® SMF-28™ Fiber

Fiber Attenuation: dB/km

Fiber Quantity: km

Other: (Requested ship date, etc.)

Corning Incorporated
www.corning.com/opticalfiber

One Riverfront Plaza
Corning, NY 14831
U.S.A.

Phone: 800-525-2524 (U.S. and Canada)
607-786-8125 (International)

Fax: 800-539-3632 (U.S. and Canada)
607-786-8344 (International)

Email: cofic@corning.com

Europe

Phone: 00 800 6620 6621 (U.K.*, Ireland, Italy, France, Germany, The Netherlands, Spain and Sweden)

+1 607 786 8125 (All other countries)

Fax: +1 607 786 8344

Asia Pacific

Australia
Phone: 1-800-148-690
Fax: 1-800-148-568

Indonesia
Phone: 001-803-015-721-1261
Fax: 001-803-015-721-1262

Malaysia
Phone: 1-800-80-3156
Fax: 1-800-80-3155

Philippines
Phone: 1-800-1-116-0338
Fax: 1-800-1-116-0339

Singapore
Phone: 800-1300-955
Fax: 800-1300-956

Thailand
Phone: 001-800-1-3-721-1263
Fax: 001-800-1-3-721-1264

Latin America

Brazil
Phone: 000817-762-4732
Fax: 000817-762-4996

Mexico
Phone: 001-800-235-1719
Fax: 001-800-339-1472

Venezuela
Phone: 800-1-4418
Fax: 800-1-4419

Greater China

Beijing
Phone: (86) 10-6505-5066
Fax: (86) 10-6505-5077

Hong Kong
Phone: (852) 2807-2723
Fax: (852) 2807-2152

Shanghai
Phone: (86) 21-3222-4668
Fax: (86) 21-6288-1575

Taiwan
Phone: (886) 2-2716-0338
Fax: (886) 2-2716-0339

E-mail: GCCofic@corning.com

Corning is a registered trademark. SMF-28 and CPC are trademarks of Corning Incorporated, Corning, N.Y.

Any warranty of any nature relating to any Corning optical fiber is only contained in the written agreement between Corning Incorporated and the direct purchaser of such fiber.

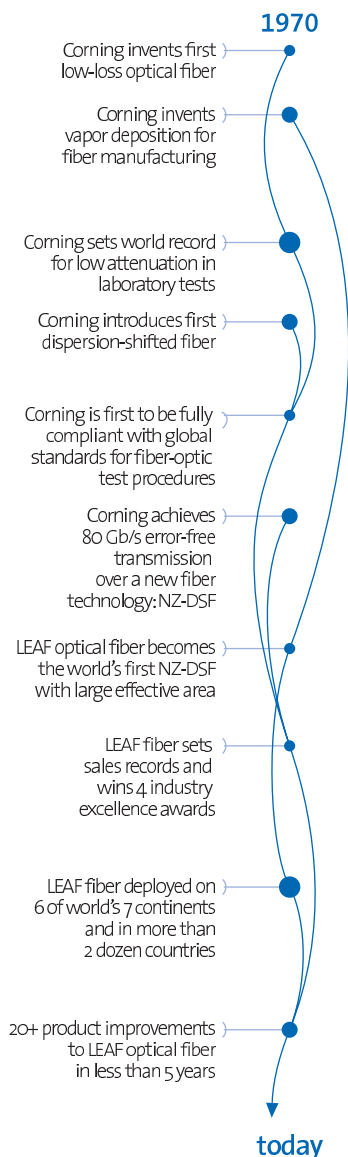
©2002, Corning Incorporated

Corning® LEAF® Optical Fiber

Product Information



Optical Fiber



The Standard for Long-Haul Networks

In the race to satisfy the global demand for telecommunications bandwidth, the need for technically advanced, high-capacity networks is paramount. Since 1998, the world has relied on Corning® LEAF® optical fiber to transmit information at higher bit rates and over longer distances than ever before. Corning LEAF optical fiber is:

- * The world's first large effective area, non-zero dispersion-shifted fiber (NZ-DSF)
- * Optimized for long-haul and high-data-rate metro networks
- * The world's most widely deployed NZ-DSF fiber
- * The industry leader in polarization mode dispersion (PMD) specifications, enabling evolution from today's 10 Gb/s networks to the 40 Gb/s systems of the future
- * In compliance with the industry's most stringent requirements, including:
 - ITU-T G.655 (all tables)
 - IEC Specifications 60793-2-50 Type B4
 - TIA/EIA 492-EA00
 - Telcordia's GR-20

Telecommunications networks require high capacity and broad system flexibility in order to compete today and to meet the challenges of tomorrow. The technological strength of Corning LEAF optical fiber provides an advanced foundation for today's sophisticated networks and those of the future.

Fiber for Today and Tomorrow

With more NZ-DSF fiber in the ground than any other fiber manufacturer in the world, Corning and Corning LEAF fiber set the standard for long-haul networks. Corning places a strong emphasis on system performance and is committed to delivering products that enable superior networks now and in the future. This commitment has led system manufacturers to develop design rules optimized specifically for LEAF fiber. Exceptional transmission capability, moderate dispersion, outstanding geometry, large A_{eff} and unique fiber characteristics give LEAF fiber the advanced functionality and quality required to enable 10Gb/s, Raman and 40Gb/s networks. LEAF fiber's characteristics also enable extended transmission reach in analog CATV networks.

Over the years, Corning has adapted its fiber product offerings in conjunction with evolving market needs and industry trends. In addition to being the lowest cost-per-bit solution in digital networks, LEAF fiber now provides this same advantage to analog networks. This capability is enabled by LEAF fiber characteristics that allow for a higher stimulated Brillouin scattering (SBS) threshold than standard single-mode fiber and other ITU-T G.655 fibers with smaller effective area. The SBS threshold is commonly approached in applications such as analog video transmission. In these applications, LEAF fiber's elevated SBS threshold enables higher relative optical powers. Along with the higher SBS, LEAF fiber's low chromatic dispersion in the C-band mitigates analog signal intermodulation distortions and eases the requirements on emerging digital baseband applications. This combination allows LEAF fiber to support longer distances, improved signal quality and higher signal distribution densities.

The Next Generation

Corning continually pursues innovative methods for integrating LEAF optical fiber's revolutionary technology into next-generation solutions. Enriched by unmatched network performance that advances transmission systems to the next level, LEAF fiber prevails as the world's most sophisticated NZ-DSF. Furthermore, LEAF fiber's consistent uniformity, excellent splicing and longer uncompensated reach capabilities are backed by the quality, service and support our customers expect.

Built upon Corning's reputation for reliability and groundbreaking innovation, LEAF fiber delivers the proven performance today and a bright future in emerging networks.

Corning® Optical Fiber – The Measure of Trust

Corning's Service Advantage

Corning Optical Fiber delivers the world's most comprehensive package of innovative products and services, including:

- * Worldwide sales support and door-to-door customer service
- * Full range of fibers and special order capabilities
- * Specialized support from technical experts
- * Extensive fiber delivery capabilities with proven success rates
- * Real-time, Web-based customer information
- * Dedicated account support for our long-term supply customers
- * Fiber support services and technical information for end-customers

At Corning Optical Fiber, we strive to provide the best possible customer service and technical support – before, during and after the sale. As a customer, you'll benefit from our established and extensive support infrastructure that's ready to meet your specific needs.

Corning's Product Advantage

Our enhanced, dual acrylate CPC® coatings provide excellent protection. Designed to be mechanically stripped, with an outside diameter of 245 μm , they are optimized for many single- and multi-fiber cable designs, including loose tube, ribbon, slotted core and tight buffer cables.

Corning is committed to product excellence and meeting the evolving needs of our customers. As updates to fiber characteristics or performance specifications become available, they will be posted on the Corning Optical Fiber website at www.corning.com/opticalfiber

Optical Specifications

Fiber Attenuation

<i>Maximum Attenuation</i>	
Wavelength (nm)	Maximum Value (dB/km)
1383 ± 3	≤1.0
1550	≤0.22
1625	≤0.24

<i>Attenuation vs. Wavelength</i>		
Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1525 – 1575	1550	0.02
1625	1550	0.03

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α.

<i>Attenuation with Bending</i>			
Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550 & 1625	≤0.50
60	100	1550 & 1625	≤0.05

*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

<i>Point Discontinuity</i>	
Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1550	≤0.05

Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD (μm)
1550	9.6 ± 0.4

Dispersion

Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm•km)]
1530 – 1565	2.0 – 6.0
1565 – 1625	4.5 – 11.2

Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/√km)
PMD Link Design Value	≤0.04*
Maximum Individual Fiber	≤0.1

*Complies with IEC 60794-3: 2001, Section 5.5, Method 1, (m = 20, Q = 0.01%).

The PMD link design value is a term is used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD_Q). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled. Corning's fiber specification supports emerging network design requirements for high-data-rate systems operating at 10 Gb/s rates and higher.

Dimensional Specifications

Glass Geometry

Fiber Curl	≥ 4.0 m radius of curvature
Cladding Diameter	125.0 ± 0.7 μm
Core-Clad Concentricity	≤ 0.5 μm
Cladding Non-Circularity	≤ 1.0%

Coating Geometry

Coating Diameter	245 ± 5 μm
Coating-Cladding Concentricity	<12 μm

Environmental Specifications

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation 1550 nm & 1625 nm (dB/km)
Temperature Dependence	-60°C to +85°C*	≤0.05
Temperature Humidity Cycling	-10°C to +85°C* up to 98% RH	≤0.05
Water Immersion	23° ± 2°C	≤0.05
Heat Aging	85° ± 2°C*	≤0.05

*Reference temperature = +23°C

Operating Temperature Range: -60°C to +85°C

How to Order

Contact your sales representative,
or call the Optical Fiber Customer
Service Department:
Ph: 607-248-2000 (U.S. and Canada)
+44-1244-287-437 (Europe)
Email: opticalfibers@corning.com
Please specify the fiber type, attenuation
and quantity when ordering.

Mechanical Specifications

Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile stress ≥ 100 kpsi (0.7 GPa)*.

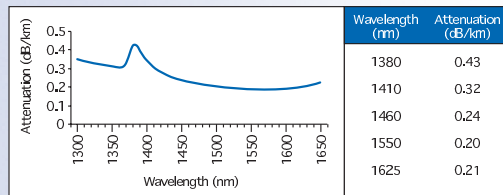
*Higher proof test levels available.

Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Numerical Aperture	0.14 <i>NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1550 nm.</i>
Effective Area (A_{eff})	1550 nm: 72 μm^2
Effective Group Index of Refraction (N_{eff})	1550 nm: 1.468 1625 nm: 1.469
Fatigue Resistance Parameter (N_d)	20
Coating Strip Force	Dry: 0.6 lbs. (3N) Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)
Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns Pulse Width)	1550 nm: -81 dB 1625 nm: -82 dB
Chromatic Dispersion	1550 nm at 4 ps/(nm•km) 1625 nm at 10 ps/(nm•km)

Spectral Attenuation (Typical Fiber)



Formulas

Dispersion

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) = \left(\frac{D(1565 \text{ nm}) - D(1530 \text{ nm})}{35} \right) (\lambda - 1565) + D(1565 \text{ nm})$$

λ = Operating Wavelength up to 1565

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) = \left(\frac{D(1625 \text{ nm}) - D(1565 \text{ nm})}{60} \right) (\lambda - 1625) + D(1625 \text{ nm})$$

λ = Operating Wavelength from 1565 – 1625

Cladding Non-Circularity

$$\text{Cladding Non-Circularity} = \left[1 - \frac{\text{Min. Cladding Diameter}}{\text{Max. Cladding Diameter}} \right] \times 100$$

Corning Incorporated www.corning.com/opticalfiber

One Riverfront Plaza
Corning, NY 14831
U.S.A.

Ph: 800-525-2524 (U.S. and Canada)
607-786-8125 (International)

Fx: 800-539-3632 (U.S. and Canada)
607-786-8344 (International)

Email: cofic@corning.com

Europe

Ph: 00 800 6620 6621 (U.K., Ireland, Italy,
France, Germany, The Netherlands,
Spain and Sweden)
+1 607 786 8125 (All other countries)

Fx: +1 607 786 8344

Asia Pacific

Australia
Ph: 1-800-148-690
Fx: 1-800-148-568

Indonesia
Ph: 001-803-015-721-1261
Fx: 001-803-015-721-1262

Malaysia
Ph: 1-800-80-3156
Fx: 1-800-80-3155

Philippines
Ph: 1-800-1-116-0338
Fx: 1-800-1-116-0339

Singapore
Ph: 800-1300-955
Fx: 800-1300-956

Thailand
Ph: 001-800-1-3-721-1263
Fx: 001-800-1-3-721-1264

Latin America

Brazil
Ph: 000817-762-4732
Fx: 000817-762-4996

Mexico
Ph: 001-800-235-1719
Fx: 001-800-339-1472

Venezuela
Ph: 800-1-4418
Fx: 800-1-4419

Greater China

Email: GCCofic@corning.com

Beijing
Ph: (86) 10-6505-5066
Fx: (86) 10-6505-5077

Hong Kong
Ph: (852) 2807-2723
Fx: (852) 2807-2152

Shanghai
Ph: (86) 21-3222-4668
Fx: (86) 21-6288-1575

Taiwan
Ph: (886) 2-2716-0338
Fx: (886) 2-2716-0339

Corning, LEAF and CPC are registered trademarks of
Corning Incorporated, Corning, N.Y.

Any warranty of any nature relating to any Corning
optical fiber is only contained in the written agreement
between Corning Incorporated and the direct purchaser
of such fiber.

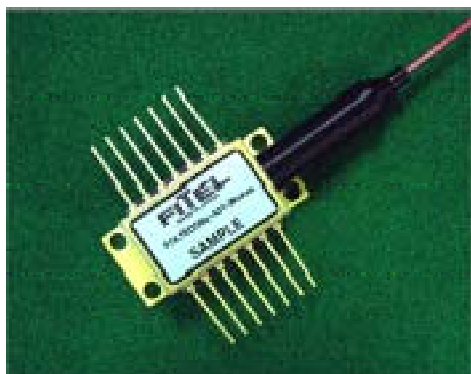
©2003, Corning Incorporated

Data Sheet

FOL15DDBx-A31-Wxxxx /CWDM Wireless Communications
Directly Modulated DFB Laser Module
Date February 16, 2005 ODC-4S003B



CWDM 2.5Gbit/s Directly Modulated DFB Laser Module



Applications

- OC-48/STM-16 CWDM Transmission Systems
- High Power OLT in GE-PON Systems

Features

- Industry standard OC-48 pin compatibility
- High fiber-coupled power, up to 20mW

Descriptions

FOL15DDBx-A31-Wxxxx series of DFB laser module is designed for CWDM applications with 2.5Gbit/s direct modulation. 1490nm DFB laser module is promising for high power OLT in GE-PON systems. The module is housed in an industry standard 14-pin hermetically sealed butterfly package, which contains optical isolator, thermoelectric cooler, power monitor photodiode. Wavelength selection is available according to CWDM wavelengths.

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Sym	Min	Max	Unit	Conditions
Storage Temperature	Tstg	-40	85	°C	-
Operating Case Temperature	Tc	-5	70	°C	-
LD Reverse Voltage	V _{RLD}	-	2	V	-
LD Forward Current	I _{FLD}	-	200	mA	-
PD Reverse Voltage	V _{rPD}	-	20	V	-
PD Forward Current	I _{fPD}	-	5	mA	-
TEC Current	I _{tec}	-	1.6	A	-
TEC Voltage	V _{tec}	-	2.6	V	-

Data Sheet

FOL15DDBx-A31-Wxxxx /CWDM Wireless Communications
Directly Modulated DFB Laser Module

Date February 16, 2005 ODC-4S003B

Optical Characteristics (TLD=Tset, Tc=25°C, unless otherwise specified)

Parameter	Sym	Min	Typ	Max	Unit	Conditions
Optical Output Power	Pf	5	-	20	mW	CW, If=Iop
LD Forward Current	If	-	-	150	mA	CW, BOL
LD Forward Voltage	Vf	-	-	2.0	V	CW
Threshold Current	I _{th}	-	10	20	mA	BOL
Submount Temperature	Tset	20	-	35	°C	If=Iop, CW
Slope Efficiency	η	0.14	0.20	0.35	W/A	CW, If=Iop
Input Impedance	Zin	-	25	-	Ω	
Wavelength	λ	1460		1620	nm	If=Iop, CW, See ordering information
Spectral Width (-20dB fullwidth)	Δλ	-	-	0.4	nm	<Pf>* ² , 2.5Gb/s NRZ
Optical Isolation	ISO	25	-	-	dB	
Dispersion Penalty	DP	-	-	2	dB	<Pf>, 2.5Gb/s NRZ, 1800ps/nm(100km)
Cut off Frequency (-1.5dB Optical)	fc	2	-	-	GHz	Rated Power
Rise and Fall Time (10-90%)	tr, tf	-	-	150	ps	<Pf>, 2.5Gb/s NRZ
Optical Isolation	ISO	25	-	-	dB	
Relative Intensity Noise	RIN	-	-	-155	dB/Hz	CW, If=Iop, f=2000MHz
Monitor Current	Im	0.03	-	2	mA	CW, If=Iop, V _{TPD} =5V
Monitor Dark Current	Id	-	-	100	nA	V _{TPD} =5V
Tracking Error	TE	-0.5	-	0.5	dB	Im=constant, Tc = -20 to 70°C
TEC Current	Itec	-	-	1.2	A	Tc=70°C, CW, If=Iop
TEC Voltage	Vtec	-	-	2.4	V	Tc=70°C, CW, If=Iop
Thermistor B constant	B	-	3900	-	K	
Thermistor Resistance	R	9.5	-	10.5	kΩ	Tset=25°C

*¹ BOL : Beginning of Life *² <Pf> : Average Power *³ O_{pRL} : Optical Return Loss

Optical Fiber Pigtail Specifications

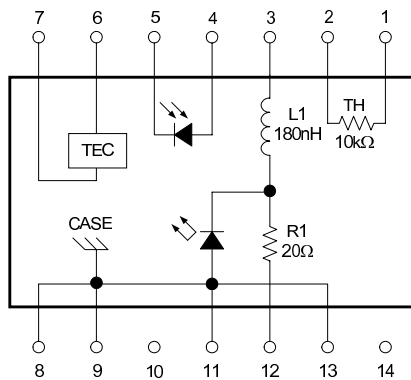
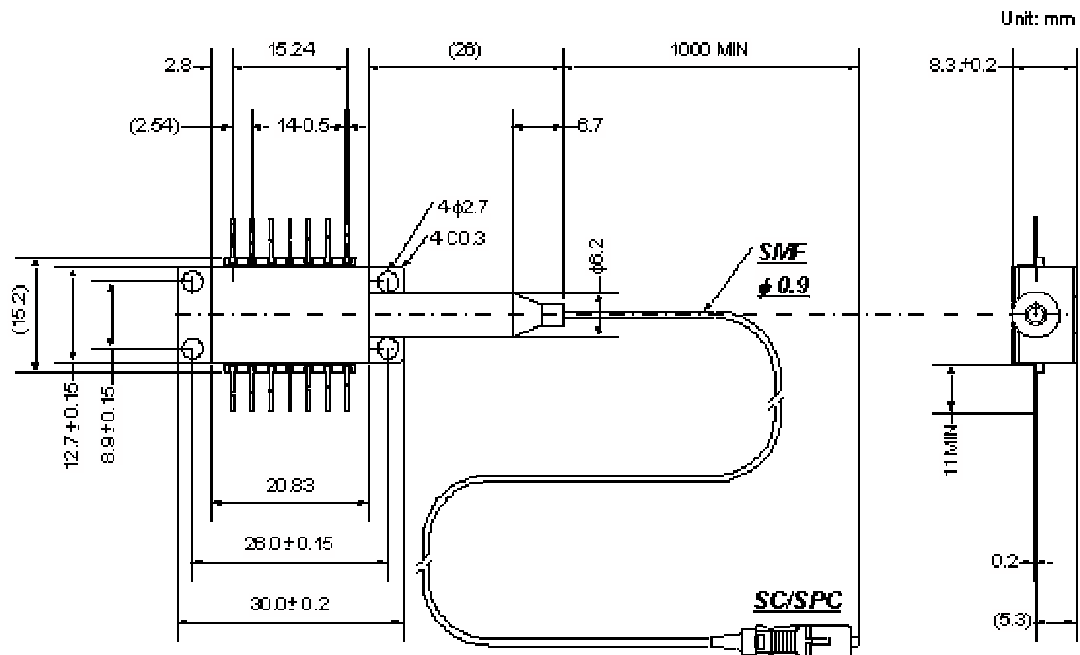
Parameter	Specification	Unit
Fiber Type	Corning SMF-28 or equivalent Flame Retardant Hytrel Coating 0.9mmφ	-
Nominal Fiber Length	Min. 1,000 (Boot edge (fiber side) to connector edge)	mm
Connector Type	SC/SPC Connector	-

Data Sheet

FOL15DDBx-A31-Wxxxx /CWDM Wireless Communications
Directly Modulated DFB Laser Module

Date February 16, 2005 ODC-4S003B

Dimensions and Pin Assignments



PIN No.	Object	PIN No.	Object
1	Thermistor	8	Case Ground
2	Thermistor	9	Case Ground
3	LD Cathode(-)	10	No Connect
4	Monitor Anode(-)	11	Laser Anode(+), Case Ground
5	Monitor Cathode(+)	12	Laser RF
6	TEC(+)	13	Laser Anode(+), Case Ground
7	TEC(-)	14	No Connect

Data Sheet

FOL15DDBx-A31-Wxxxx /CWDM Wireless Communications
Directly Modulated DFB Laser Module

Date February 16, 2005 ODC-4S003B

Ordering Information

FOL15DDB□ – A31 – W□□□□ – E

Output power
5: 5mW
A: 10mW
B: 20mW

Wavelength
1470: 1470nm
1490: 1490nm
1510: 1510nm
1530: 1530nm
1550: 1550nm
1570: 1570nm
1590: 1590nm
1610: 1610nm

Wavelength tolerance: $\leq \pm 6\text{nm}$.
 $\leq \pm 3\text{nm}$ is also available.

Safety Information

This product complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.11, Class 3b laser product. Invisible laser radiation is emitted from the end of the fiber or connector. Avoid direct exposure to the beam.



Furukawa Electric Co, Ltd., Furukawa America, Inc, and Furukawa Electric Europe, Ltd. reserve the right to change data contained in this document in the interest of continued product improvement. The publication of this information does not imply freedom from patent or any other rights of The Furukawa Electric Company, Ltd. or its affiliated companies.
All Rights Reserved, Copyright © THE FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD

FITEL

Headquarters
6-1 Marunouchi 2-chome
Chiyoda-ku Tokyo
100-8322 Japan
T: 81-3-3286-3253
F: 81-3-3286-3978
www.furukawa.co.jp

Furukawa Electric Europe, Ltd
3rd FL Newcombe House
43-45 Notting Hill Gate
London, W11 3FE
UK
T: 44-20-7221-6000
F: 44-20-7313-5310
www.furukawa-fitel.co.uk
sales@furukawa-fitel.co.uk

Furukawa America, Inc.
Perryville Corporate Park
Perryville III
Clinton, NJ 08809
USA
T: 908-713-3525
F: 908-713-3515
www.furukawaamerica.com
oesales@furukawaamerica.com

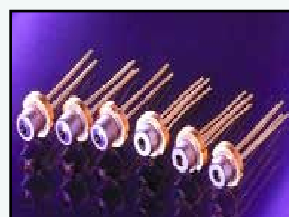


Digital Lasers

Optical Chips2



Laser and Photodiode Cans3



Fibre Modules4

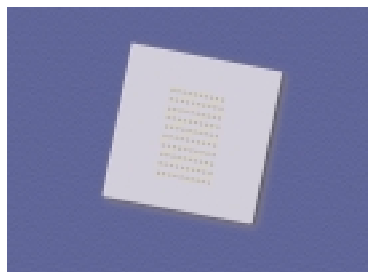
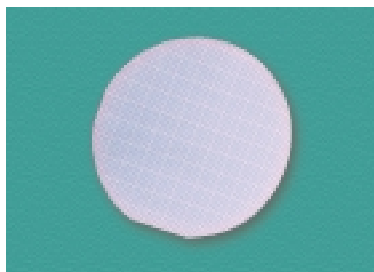


Butterfly & Highspeed Modules6





Optical Chip



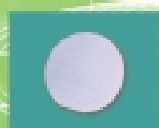
PD chip

Part Number	Active Diameter (μm)	Package Feature	Applications
R-11-055-C	55	Bare chip	OC-48 Receiver
R-11-075-C	75	Bare chip	OC-3, OC-12, Gigabit Receiver
R-11-300-C	300	Bare chip	LD Power Monitoring

10G chip

Part Number	Product	Data Rate	Package Feature	Applications
C-13-010-C	FP Laser	10Gbps	Bare chip	10G Ethernet, OC-192
C-13-DFB10-C	DFB Laser	10Gbps	Bare chip	10G Ethernet, OC-192
R-11-020-C	Photodiode	10Gbps	Bare chip	10G Ethernet, OC-192

- Complete vertical integration of manufacturing technology with state of the art facility.
- Automated volume production.
- Comply with Telcordia GR-468-CORE.
- Competitive pricing and short lead time.
- Custom design.



Wafer



Chip



TO



Module



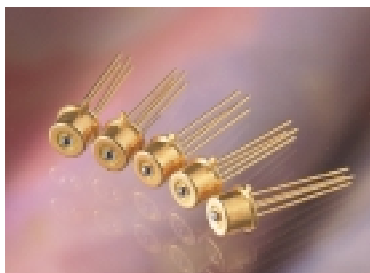
OSA



Transceiver



Diodes in TO CAN



FP LD

Part Number	Wavelength (nm)	Power (mW)	Data Rate	Package Feature	Applications
C-13-001-E-A/B	1310	5	1.25Gbps	TO-18	SONET/SDH, Fiber channel, Ethernet , Gigabit Ethernet
C-13-002-E-AD/BD	1310	5	2.5Gbps	TO-18	OC-48/STM-16
C-15-001-E-A/B	1550	5	1.25Gbps	TO-18	SONET/SDH, Fiber channel, Ethernet , Gigabit Ethernet
C-15-002-E-AD/BD	1550	5	2.5Gbps	TO-18	OC-48/STM-16
C-151-001-E-A/B	1510	5	1.25Gbps	TO-18	SONET/SDH, Fiber channel, Ethernet , Gigabit Ethernet
C-151-002-E-AD/BD	1510	5	2.5Gbps	TO-18	OC-48/STM-16

DFB LD

Part Number	Wavelength (nm)	Power (mW)	Data Rate	Package Feature	Applications
C-13-DFB-E-AD/BD-NT	1310	5	1.25Gbps	TO-18	SONET/SDH, Fiber channel, Ethernet , Gigabit Ethernet
C-13-DFB2.5-E-AD/BD-NT	1310	5	2.5Gbps	TO-18	OC-48/STM-16
C-15-DFB-E-AD/BD-NT	1550	5	1.25Gbps	TO-18	SONET/SDH, Fiber channel, Ethernet , Gigabit Ethernet
C-15-DFB2.5-E-AD/BD-NT	1550	5	2.5Gbps	TO-18	OC-48/STM-16
C-151-DFB-E-AD/BD-NT	1510	5	1.25Gbps	TO-18	SONET/SDH, Fiber channel, Ethernet , Gigabit Ethernet
C-151-DFB2.5-E-AD/BD-NT	1510	5	2.5Gbps	TO-18	OC-48/STM-16

LED

Part Number	Wavelength (nm)	Data Rate	Package Feature	Applications
L-13-155-G-B	1310	155Mbps	TO-46	OC-3, STM-1, FDDI, Fast Ethernet, MM TRx

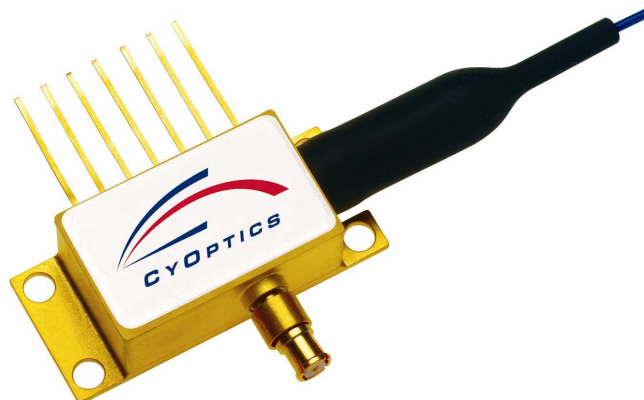
PD

Part Number	Typ. Responsivity (A/W)	Active Diameter (μm)	Package Feature	Applications
R-11-055-G-B	0.85	55	TO-46	OC-48 Receiver
R-11-075-G-B	0.85	75	TO-46	OC-3, OC-12, Gigabit Receiver
R-11-300-G-B	0.85	300	TO-46	LD Power Monitoring

PIN-TIA

Part Number	Vcc.	Data Rate	Package Feature	Applications
T-11-155-G3-B	3.3V	155Mbps	TO-46	OC-3/STM-1
T-11-155-G-AGC	5V	155Mbps	TO-46	OC-3/STM-1
T-11-622-G/3-B	3.3V ~ 5V	622Mbps	TO-46	OC-12/STM-4
T-11-1250-G/3-B	3.3V ~ 5V	1.25Gbps	TO-46	Gigabit Ethernet
T-11-2500-G3-B-C	3.3V	2.5Gbps	TO-46	OC-48 /STM-16
T-11-2500-G-B-C	5V	2.5Gbps	TO-46	OC-48 /STM-16

E4560-Type 10 Gb/s High-Power EML Modules up to 40 km (800ps/nm) Transmission



Description

The E4560-series EML is designed for 10 Gb/s DWDM or TDM transmission applications. The EML integrates a CW laser with an electroabsorptive modulator in the same semiconductor chip and are an extension of CyOptics' existing E2500-series of devices. These devices can replace external modulators that are often bulkier, more expensive, and require more drive electronics than the EML. The E4560 series use a small-profile *GPO*[™] (SMP) connector to handle the RF signal. The package also contains a thermoelectric cooler, thermistor, rear-facet monitor photodiode, and an optical isolator.

The nominal input impedance of the E4560 version is 50 Ω . The package is qualified to the *Telcordia Technologies*[™] TA-TSY-000468 standard.

E4560 is available in a range of ITU-T C-band wavelengths for use in DWDM systems operating at 10 Gb/s per channel. Also, E4560-series is offered as a single-channel device operating within a wavelength range of 1530 nm—1563 nm

The devices exhibit excellent wavelength stability, supporting operation at 100 GHz channel spacing over 20 years (assuming an end-of-life aging condition of $<\pm 100$ pm). Typically, no external wavelength stabilization is required in systems of this type, using the CyOptics E4560 EMLs. The package also offers excellent stability of wavelength vs. case temperature, with a maximum coefficient of ± 0.5 pm/ $^{\circ}$ C.

Features

- ▮ Integrated electroabsorptive modulator
- ▮ 1.5 μ m wavelength
- ▮ High Output Power
- ▮ Specified for 9.95 Gb/s operation
- ▮ For use up to 40 km (800ps/nm)
- ▮ Low modulation voltage
- ▮ Temperature stabilized
- ▮ Wavelength selectable to ITU-T standards
- ▮ Ultrastable wavelength aging for DWDM

Applications

- ▮ SONET/SDH applications
- ▮ Ultrahigh capacity WDM system application
- ▮ High-speed data communication
- ▮ Digitized video

Module Characteristics

Table 1. Module Characteristics

Parameter	Description
Package Type	7-pin package with GPO™-type connector RF input.
Fiber	Standard single-mode fiber.
Optical Connector	Various connectors available on request. See Table 6
RF Input (SMP-type connector)	Impedance 50 Ω (Exterior of RF connector is connected to case)
Bit Rate	up to 12.5 Gb/s.

Pin Information

Table 2. Pin Descriptions

Pin Number	Pin Name	Description
1	THERM	Thermistor
2	THERM	Thermistor
3	LASER+	Laser anode*
4	BACK DET–	Monitor anode (–)
5	BACK DET+	Monitor cathode (+)
6	TEC+	Thermoelectric cooler (+)
7	TEC–	Thermoelectric cooler (–)

* Laser cathode and modulator ground are connected to case.

Target Specifications

Absolute Maximum Ratings

Stresses in excess of the absolute maximum ratings can cause permanent damage to the device. These are absolute stress ratings only. Functional operation of the device is not implied at these or any other conditions in excess of those given in the operational sections of the data sheet. Exposure to absolute maximum ratings for extended periods can adversely affect device reliability.

Table 3. Absolute Maximum Ratings

Parameter	Conditions	Min	Max	Unit
Laser Diode Reverse Voltage	CW	—	2	V
Laser Diode Forward Current	CW	—	150	mA
Optical Output Power	CW	—	20	mW
Modulator Reverse Voltage	—	—	5	V
Modulator Forward Voltage	—	—	1	V
Monitor Diode Reverse Voltage	—	—	10	V
Monitor Diode Forward Voltage	—	—	1	V
Storage Temperature	—	—	–40 to +85	°C
Operating Temperature	—	—	–10 to +75	°C
Thermistor Temperature**	—	—	100	°C
Thermoelectric Cooler in Heating Mode**	—	—	0.5	A

** To prevent package over temperature conditions.

Target Specifications(continued)

Characteristics

Minimum and maximum values specified over operating case temperature range. Typical values are measured at room temperature (25°C) unless otherwise noted.

Table 4. Optical and Electrical Specifications
(Chip operating temp. = 20 °C to 35 °C, except where noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Max	Unit
Threshold Current (BOL)	I _{TH}	—	5	35	mA
Forward Voltage	V _F	I _F = I _{OP} @ T _{OP}	—	2.2	V
Operating Current	I _{OP}	—	50	100	mA
Threshold Power	P _{TH}	I _F = I _{TH} , V _M * = 0V	—	80	μW
Fiber Output Power (Average) , BOL	P _{AVG}	Note 1	0.5	+3.0	dBm
Fiber Output Power (Average) , EOL	P _{AVG}		0	2.5	dBm
Peak Wavelength (Wavelength can be specified to the ITU wavelength channels. See Table 5.)	λ _{PK}	Note 1	1528	1564	nm
Side-mode Suppression Ratio	SMSR	V _M = 0 ,I _F = I _{OP} , T _{OP}	35	—	dB
Peak to Peak Modulator Voltage	V _{PP}		1.5	2.5	V
On-State Modulator Voltage	V _{ON}		-1.0	0	V
Dispersion Penalty, BER = 10 ⁻¹² D = 800 ps/nm	DP	Notes 1,2	—	2.0	dB
Modulator					
RF Extinction Ratio	ER _{RF}	Notes 1,4	10	—	dB
RF Return Loss (0 GHz to 8 GHz)	S ₁₁	V _M = -0.8V, I _F = I _{OP}	10	—	dB
RF Return Loss (8 GHz to 10 GHz)	S ₁₁	V _M = -0.8V, I _F = I _{OP}	8.5	—	dB
-3 dB Bandwidth	BW	V _M = -0.8V,I _F = I _{OP}	11	—	GHz
Rise/Fall Time (20%—80%)	t _R /t _F	Note 4	—	40	ps
Monitor Diode					
Monitor Current	I _{BD}	V _{BD} = 5V, I _F = I _{OP}	40	1100	μA
Dark Current	I _D	V _{BD} = 5 V	—	0.1	μA
Capacitance	C	V _{BD} = 5V, F = 1 MHz	—	25	pF
Thermistor					
Resistance	R _{THERM}	T = 25 °C	9.5	10.5	kΩ
Thermistor Current	I _{TC}	—	10	100	μA
Thermistor B Constant	B	—	3700	4100	—
Thermoelectric Cooler (TEC)					
TEC Cooling Current**	I _{TEC}	Note 3	—	1.3	A
TEC Voltage	V _{TEC}		—	2.6	V
TEC Power	P _{TEC}		—	3.4	W
TEC Cooling Capacity	ΔT		—	55	C
Optical Isolation					
Optical Isolation	—		30	—	dB

Target Specifications (continued)

Table 4. Optical and Electrical Specifications (continued)
(Chip operating temp. = 20 °C to 35 °C, except where noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Max	Unit
Package					
Wavelength vs. Case Temp.	$d\lambda/dT$	$T_{CASE} = -10\text{ }^{\circ}\text{C to }+75\text{ }^{\circ}\text{C}$	-0.5	0.5	pm/°C
Output Power Stability		$T_C = -10^{\circ}\text{C}/25^{\circ}\text{C}/75^{\circ}\text{C}$		1.0	dB

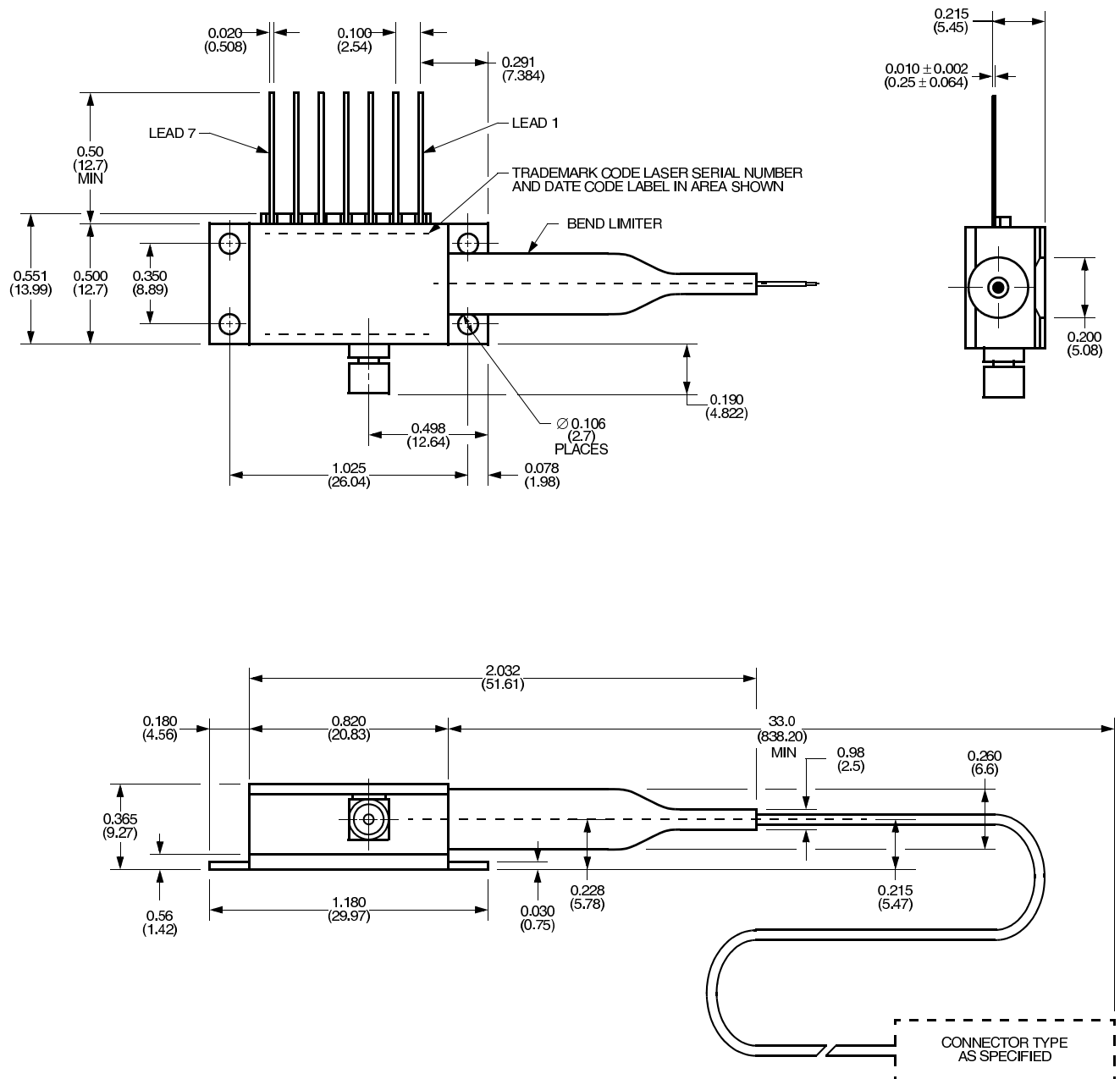
* V_M = Modulator Voltage (DC)

**Maximum TEC current for Heating is less than 0.5A

1. Modulated for 40 km (800ps/nm) operation. Modulated operational values are defined to be $I = I_{OP}$, $T = T_{OP}$, at all specified operating conditions, 9.95 Gb/s modulation, $2^{31} - 1$ PRBS (operating parameters: I_{OP} , T_{OP} , V_{ON} for 40 km will be provided). Laser diode temperature can be set in a 20 °C to 35 °C range to take advantage of wavelength tuning, provided that it will meet all other specs at this preset temperature.
2. Over 800ps/nm (80 km).
3. $T_{CASE} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{OP}(\text{LASERCHIP}) = 20^{\circ}\text{C to }35\text{ }^{\circ}\text{C}$.
4. Without filter, O/E bandwidth > 20GHz.

Outline Diagram

Dimensions are in inches and (millimeters).



Laser Safety Information

Class IIIb Laser Product

FDA/CDRH Class IIIb laser product. All versions are Class IIIb laser products per CDRH, 21 CFR 1040 Laser Safety requirements. All versions are classified Class 3R laser products consistent with *IEC*[®] 60825-1: 1993. This device family has been classified with the FDA under accession number 8720010. Measurements were made to classify the product per *IEC*60825-1: 1993.

This product complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.11.

8.8 μm /125 μm single-mode fiber pigtail and connector

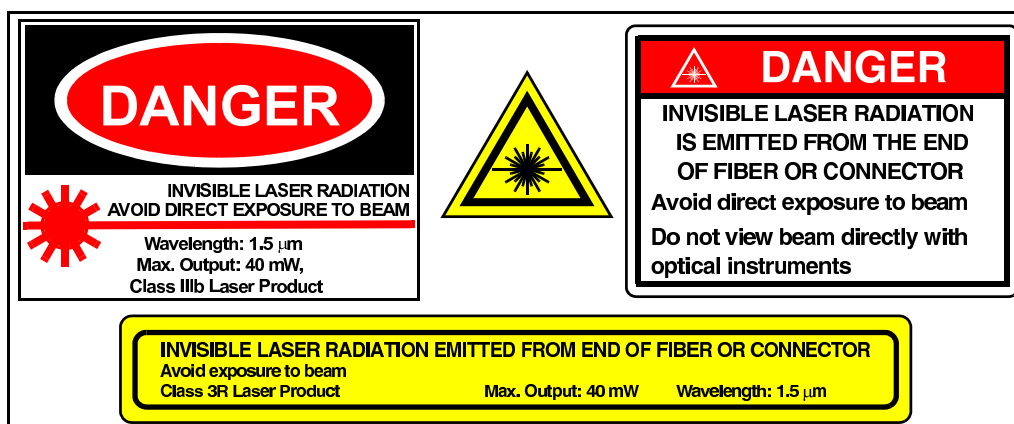
Wavelength = 1528 nm—1563 nm

Maximum power = 40 mW

Because of size constraints, laser safety labeling (including an FDA Class IIIb label) is not affixed to the module but attached to the outside of the shipping carton.

Product is not shipped with power supply.

Caution: Use of controls, adjustments, and procedures other than those specified herein may result in hazardous laser radiation exposure.



Electrostatic Discharge

CAUTION: This device is susceptible to damage as a result of electrostatic discharge. Take proper precautions during both handling and testing. Follow guidelines such as JEDEC Publication No. 108-A (Dec. 1988).

CyOptics employs a human-body model (HBM) for ESD-susceptibility testing and protection-design evaluation. ESD voltage thresholds are dependent on the critical parameters used to define the model. A standard HBM (resistance = 1.5 k Ω , capacitance = 100 pF) is widely used and can be used for comparison purposes.

Ordering Information

Table 5. Ordering Information:

ITU-T Wave-length (nm)	Frequency	Code ¹
1530.33	195.9	E4560H59
1531.12	195.8	E4560H58
1531.90	195.7	E4560H57
1532.68	195.6	E4560H56
1533.47	195.5	E4560H55
1534.25	195.4	E4560H54
1535.04	195.3	E4560H53
1535.82	195.2	E4560H52
1536.61	195.1	E4560H51
1537.40	195.0	E4560H50
1538.19	194.9	E4560H49
1538.98	194.8	E4560H48
1539.77	194.7	E4560H47
1540.56	194.6	E4560H46
1541.35	194.5	E4560H45
1542.14	194.4	E4560H44
1542.94	194.3	E4560H43
1543.73	194.2	E4560H42
1544.53	194.1	E4560H41
1545.32	194.0	E4560H40
1546.12	193.9	E4560H39
1546.92	193.8	E4560H38
1547.72	193.7	E4560H37
1548.51	193.6	E4560H36
1549.32	193.5	E4560H35
1550.12	193.4	E4560H34
1550.92	193.3	E4560H33
1551.72	193.2	E4560H32
1552.52	193.1	E4560H31
1553.33	193.0	E4560H30
1554.13	192.9	E4560H29
1554.94	192.8	E4560H28
1555.75	192.7	E4560H27
1556.56	192.6	E4560H26
1557.36	192.5	E4560H25
1558.17	192.4	E4560H24
1558.98	192.3	E4560H23
1559.79	192.2	E4560H22
1560.61	192.1	E4560H21
1561.42	192.0	E4560H20
1562.23	191.9	E4560H19
1528 - 1564	—	E4560H

1. ST is the default connector. Other connectors are available on request (see Table 6).

Ordering Information (continued)

Table 6. Ordering Information: (Connector Type)

Device Code ¹	Connector Type ²
E4560Dxx	SC
E4560Hxx	ST
E4560Sxx	LC
E4560Gxx	FC

1. The xx notation in the device code refers to the ITU channel designation (for details see Table 5).

2. Other connectors available on request

GPO is a trademark of Gilbert Engineering.
Telcordia Technologies is a trademark of Telcordia Technologies, Inc.
IEC is a registered trademark of The International Electrotechnical Commission.

For additional information, contact your CyOptics Account Manager or the following:

INTERNET: <http://www.cyoptics.com>
Telephone: 484-397-3800
Fax: 484-397-3592
Email: <mailto:sales@cyoptics.com>
Info Email: <mailto:sales@cyoptics.com>

The information enclosed (including but not limited to technical specifications, recommendations, and application notes) relating to the products herein is believed to be reliable and accurate and is subject to change without notice. No risk and liability is assumed for use of the products and its applications. CyOptics, Inc. reserves the right to change without notice design, specification, form, fit or function relating to the products herein.

Copyright © 2005 CyOptics, Inc.
All Rights Reserved

January 2006
DS06-020 (Replaces DS05-020)



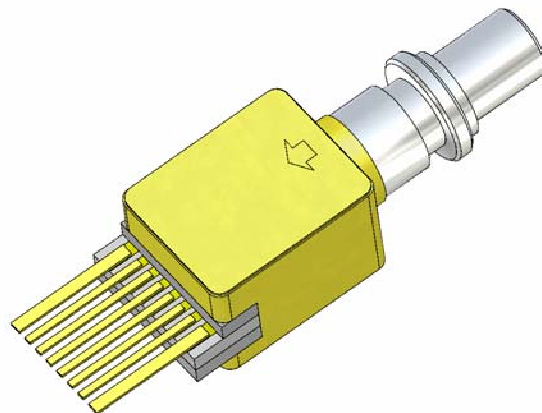
Description

The EM4 small form factor pluggable PIN ROSA consists of InGaAs high speed PIN photodiode integrated with high gain transimpedance amplifier. The ROSA has a differential output for better sensitivity performance and includes an internal biasing circuit.

A LC receptacle is laser welded to the ROSA allowing the package to be hot pluggable to the transceiver board. Option for fiber pigtail is also available.

Application

- OC-192/STM-64 SONET/SDH Metro or Long Reach
- XFP, X2, XENPAK, and XPAK Transceiver
- IR-2/LR-2 300-pin Transponder (TDM or WDM)
- SFF 300-pin Transponder (TDM or WDM)



Absolute Max Ratings

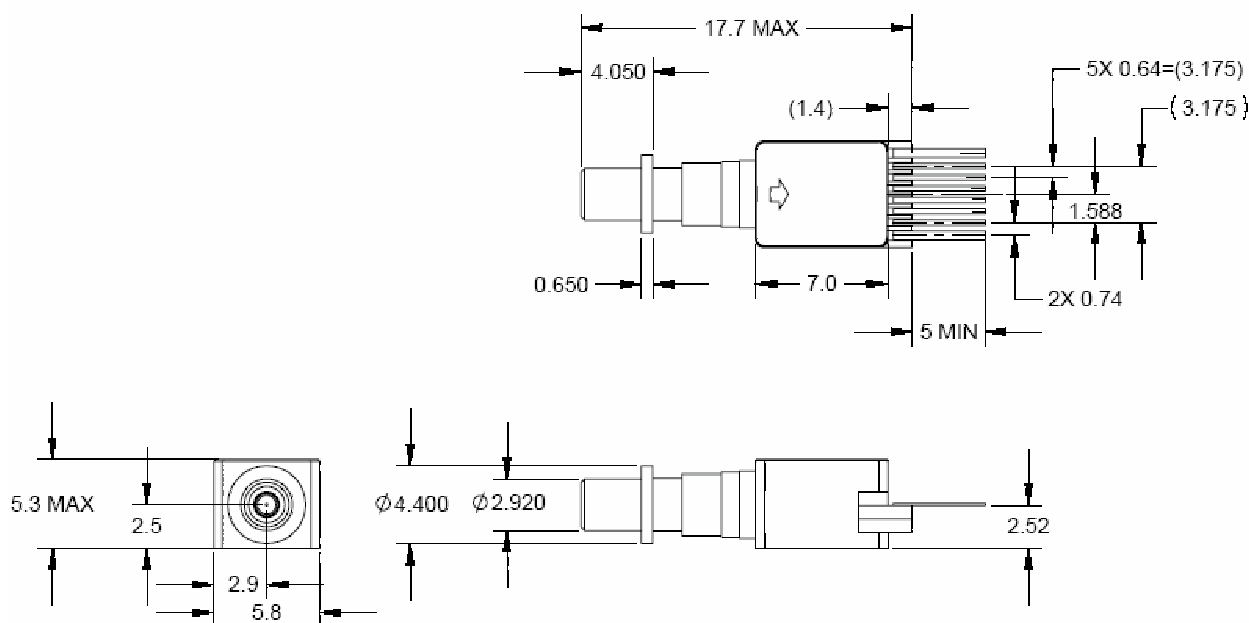
Parameter	Symbol	Min	Max	Unit
Storage Case Temperature	T_{ST}	-40	85	°C
Power Supply Current	I_{cc}	-	100	mA
Power Supply Voltage	V_{cc}	-	5	V
Output Current	I_{out+}, I_{out-}	-	35	mA
Optical Input Power	P_{max}	-	+13	dBm
Lead Soldering Time		-	10	sec
Lead Soldering Temperature		-	250	°C

Electrical and Optical Specifications

Unless otherwise stated, specifications are beginning of life (BOL), $T_{case}=25^{\circ}C$, $T_{chip}=25^{\circ}C$, $V_{cc}=+5.0V$

Parameter	Sym	Conditions	Min	Typ.	Max	Unit
Operating Case Temperature	T_{case}		0		80	°C
Supply Current					65	mA
Transimpedance Gain	Z_F			600		Ω
Low Frequency Cut-off				70		kHz
Output Impedance	Z_{out}			50		Ω
Rise/Fall Time	τ_R/τ_F	20-80%			40	ps
Bandwidth	S_{21}			9		GHz
Responsivity	R			0.8		A/W
Sensitivity				-18		dBm
Overload					+2	dBm
Electrical Reflection	S_{22}				-10	dB
Signal Monitor Bandwidth			10	70		kHz
Signal Monitor Gain				1200		V/A
Optical Return Loss	ORL		27			dB

Package Dimensions (mm)



Pin-Out

PIN #	Function
1	N/C
2	GND
3	Data bar
4	Data
5	GND
6	Monitor – signal strength
7	GND
8	N/C



Ordering Information

S	F	F	-	P	I	N	-	1	0	-	L	C
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Device Code	Description	Connector
SFF-PIN-10-LC	10Gb/s PIN ROSA with integrated TIA	LC

The information published in this datasheet is believed to be accurate and reliable. EM4, Inc. reserves the right to change without notice including but not limited to the design, specification, form, fit or function relating to the product herein. Copyright 2004 EM4, Inc. All rights reserved.