

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Red óptica DWDM: situación actual, ventajas, mejoras y
futuro en Guatemala

Trabajo de graduación presentado por

Oscar Rodrigo Bercián Cifuentes

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala

2013

Red óptica DWDM: situación actual, ventajas, mejoras y futuro en Guatemala

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Red óptica DWDM: situación actual, ventajas, mejoras y
futuro en Guatemala

Trabajo de graduación presentado por

Oscar Rodrigo Bercián Cifuentes

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala


2013

Va.Bo.:

(f) 

Juan Pablo Carranza

Tribunal Examinador:

(f) 

MSc. Carlos Esquit

(f) 

Ing. Manuel Cotero

(f) 

Ing. José Augusto Sánchez

Fecha de aprobación: Guatemala 06 de diciembre de 2013

PREFACIO

El trabajo “Red óptica DWDM: situación actual, ventajas, mejoras y futuro en Guatemala” fue trabajado durante los meses Julio, Agosto, Septiembre y Octubre del año 2013. Consistió en rigurosa investigación en libros relacionados con el tema, también se extrajo bastante información de Internet y se tuvo la oportunidad de platicar con varios ingenieros en el campo de las telecomunicaciones.

Primero se trabajó una fase investigativa, comprendiendo lo más básico de los medios de transmisión existentes y las diferencias entre cada tipo de medio. Posteriormente se comprendió el funcionamiento, ventajas, tipos y características del medio de transmisión con más importancia en la actualidad: la fibra óptica. Es importante conocer el funcionamiento de la fibra óptica, ya que las tecnologías implementadas para transmisión de datos, se aprovechan de las ventajas que las características de la fibra nos proporciona. En esta parte se pudo observar y analizar físicamente fibras ópticas, para observar las variaciones en materiales y en conectores.

También dentro de la fase de investigación, se tuvo que entender los aspectos generales de la tecnología DWDM, la cual está siendo implementada en Guatemala. Se estudió desde lo más básico de esta tecnología, abarcando el principio de funcionamiento, las capas en las cuales funciona, los tipos de fibras que hacen que funcione y comparaciones con otras tecnologías ya existentes, no necesariamente en nuestro país.

Luego de esta parte investigativa, con el fin de cumplir el objetivo de dar a conocer la tecnología, presentar sus ventajas, problemas y futuro en nuestro país, y ya conociendo aspectos generales de la fibra óptica y DWDM, se procedió a la fase de indagación y búsqueda de información acerca de cómo estaba implementada esta tecnología en Guatemala. Esta información no podía encontrarse en ningún libro o internet, sino que fue necesario hablar con ingenieros especializados en telecomunicaciones.

El trabajo no solo se limita a la ciudad capital, si no también se logró obtener información acerca del interior del país. Se logró conocer algunas redes de fibra en las áreas rurales del país, y se trató también transporte de datos fuera de Guatemala, por ejemplo, con Honduras, México y Estados Unidos.

ÍNDICE

	Pág.
LISTA DE TABLAS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN.....	viii
 Capítulos:	
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	2
III. MEDIOS DE TRANSMISIÓN.....	3
A. Definición.....	3
B. Clasificación de los medios de transmisión.....	3
1. Según el modo de transmisión.....	3
2. Según la forma de conducir la señal a través del medio.....	4
IV. FIBRA ÓPTICA.....	11
A. Descripción física.....	11
B. Características principales.....	11
1. Longitud de onda.....	12
2. Ventanas ópticas.....	13
3. Bandas de operación.....	13
4. Ancho de banda.....	15
5. Dispersión.....	16
6. Atenuación.....	16
7. Cono de aceptación.....	18
8. Apertura numérica.....	18

C.	Principio de funcionamiento.....	18
1.	Principio de refracción.....	18
2.	Principio de reflexión.....	21
D.	Tipos de fibra óptica.....	22
1.	Modos de propagación.....	22
2.	Materiales que conforman el núcleo y el revestimiento.....	23
3.	Dimensiones del núcleo y del revestimiento.....	23
4.	Características de transmisión.....	24
E.	Tipos de conectores de fibra óptica.....	26
F.	Cables de fibra óptica.....	27
G.	Modos de transmisión.....	27
1.	Monomodo.....	28
2.	Multimodo.....	29
H.	Ventajas y desventajas del uso de fibra óptica.....	31
1.	Ventajas.....	31
2.	Desventajas.....	32
V.	TECNOLOGÍA DWDM.....	33
A.	Introducción.....	33
1.	Multiplexación.....	33
B.	Técnicas de multiplexación por división de longitud de onda.....	36
1.	CWDM.....	37
2.	DWDM.....	37
C.	Redes ópticas DWDM.....	39
1.	Funcionamiento.....	39
2.	Características.....	40
3.	Arquitectura de DWDM.....	41
4.	Topologías de redes DWDM.....	44
5.	Aplicaciones.....	47
6.	Ventajas de la tecnología DWDM.....	48
7.	Tecnologías sobre DWDM.....	48
VI.	DWDM EN GUATEMALA.....	51
A.	Antecedentes, ¿qué había antes de DWDM?.....	51
1.	PDH.....	51

2.	SDH.....	52
3.	CWDM.....	54
B.	Situación actual en Guatemala.....	55
1.	Red actual de fibra óptica.....	55
2.	Topologías de DWDM existentes en Guatemala.....	58
3.	Detalles y especificaciones técnicas de DWDM en Guatemala.....	59
C.	Principales retos y soluciones que existen en tecnología DWDM.....	62
1.	Topología y daño al medio de transmisión.....	62
2.	Principales retos en transmisión de la señal.....	63
D.	Ventajas y mejoras que ha presentado la tecnología.....	67
E.	Limitaciones que presenta Guatemala.....	68
F.	Futuro y crecimiento.....	70
VII.	CONCLUSIONES.....	74
VIII.	RECOMENDACIONES.....	76
IX.	BIBLIOGRAFÍA.....	77
X.	LISTA DE SÍMBOLOS.....	80
XI.	GLOSARIO.....	81

LISTA DE TABLAS

Tabla:		Pág.
I.	Comparación entre medios de transmisión guiados.....	6
II.	Frecuencias de operación para medios de transmisión no guiados.....	9
III.	Bandas de operación de la fibra óptica.....	15
IV.	Índices de refracción de algunos materiales.....	20
V.	Tipos de fibra según el modo de propagación.....	22
VI.	Tipo de fibra según dimensiones de núcleo y revestimiento.....	24
VII.	Requerimientos principales por parte de un operador sobre implementación de tecnología DWDM.....	61
VIII.	Parámetros típicos de un amplificador EDFA.....	66
IX.	Artículos con relación a la instalación del medio de transmisión.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura:	Pág.
1. Espectro electromagnético para las telecomunicaciones.....	5
2. Tipos de par trenzado.....	7
3. Partes del cable coaxial.....	7
4. Estructura de la fibra óptica.....	12
5. Rango de frecuencias y longitudes de onda donde opera la fibra óptica.....	13
6. Gráfica de ventanas ópticas.....	14
7. Gráfica de frecuencia contra amplitud.....	15
8. Tipos de atenuación en fibras ópticas.....	17
9. Cono de aceptación en fibras ópticas.....	18
10. Comportamiento del principio de refracción.....	19
11. Gráfica de refracción, reflexión interna total y ángulo crítico.....	21
12. Selección de fibra según atenuación generada.....	25
13. Selección de fibra para ancho de banda determinado.....	25
14. Principales conectores de fibra óptica.....	26
15. Sección transversal de cable con cubierta PKP y PEAP/PESP.....	28
16. Fibra óptica monomodo.....	29
17. Fibra óptica multimodo de índice escalonado.....	30
18. Fibra óptica multimodo de índice gradual.....	31
19. Proceso de multiplexación.....	34
20. Proceso de multiplexación FDM.....	34
21. Proceso de multiplexación TDM asíncrona.....	35

22. Técnica de multiplexación WDM.....	36
23. Longitudes de onda para tecnología CWDM especificada por ITU-T G.694.2.....	38
24. Longitudes de onda para tecnología DWDM.....	38
25. Capacidad de los sistemas TDM y TDM+DWDM.....	40
26. Componentes de una red óptica DWDM.....	41
27. La parrilla Bragg (método de demultiplexación óptica).....	43
28. Amplificadores en una red DWDM.....	43
29. Topología punto a punto de una red DWDM con OADM.....	45
30. Topología en anillo de una red DWDM.....	46
31. Red DWDM con los tres tipos de topologías.....	46
32. Enlace de datos y protocolos de red por encima de capa óptica.....	49
33. Tipos de tráfico sobre SDH.....	53
34. TDM sobre SDH.....	53
35. Distancias máximas en variadas fibras.....	55
36. Comparación de propagación de señal en fibra G652.D y en fibra G652.B.....	57
37. Características de las fibras pertenecientes a la familia G652.....	57
38. Características de las fibras pertenecientes a la familia G653 y G654.....	58
39. Conexiones submarinas que existen actualmente en Guatemala.....	59
40. Funcionamiento de un EDFA.....	66
41. Gráfica de velocidad de descarga en Guatemala (abril 2013 – marzo 2014).....	71
42. Velocidades de descarga en ciudades de Guatemala.....	71
43. Velocidades de Proveedores de Servicios de Internet en Guatemala (ISPs).....	72

RESUMEN

Los medios de transmisión forman una parte importante para las redes de comunicaciones. Su principal división se da según la forma de conducir la señal a través del medio, ya que puede ser por medios guiados y no guiados. Dentro de los medios guiados se encuentra la fibra óptica, la cual es el medio que, actualmente, presenta mayores ventajas para transmisión de información. Presenta varias características y ventajas que la hacen el medio de transmisión más importante hoy en día.

La multiplexación por división de onda (WDM) es una tecnología que brinda una optimización a la fibra existente, haciéndola más rentable con lo que respecta al transporte de datos. DWDM es la tecnología que se está introduciendo al país. Aunque el costo de esta tecnología es elevado, las ventajas que éste nos presenta, como por ejemplo el incremento de la capacidad en la red, el aprovechamiento de la red de fibra ya existente en el país, ahorro en mantenimiento y futuras expansiones, hacen que sea una tecnología que representará ahorro en los gastos y mejora los servicios ofrecidos. La tecnología DWDM tiene la capacidad de seguir creciendo en Guatemala, pese a que se presenten algunas limitaciones. En Guatemala, no se aprovecha al máximo todas las ventajas que nos da este medio de transporte de datos, pero se espera que en un futuro cercano, se pueda ir creciendo y mejorando. A medida que el país vaya necesitando mayores anchos de banda por la demanda de datos, se va a ir necesitando explotar al máximo la tecnología DWDM, que tiene una oportunidad de crecimiento gigante.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los sistemas de transferencia de datos buscan enviar la mayor cantidad posible de datos a una mayor velocidad. Se ve la necesidad de realizar cambios, desde el medio de transmisión utilizado, los equipos encargados de mandar las señales, protocolos utilizados, etc. Todo con el fin de brindar un mejor servicio de transporte de datos al menor costo. Todos estos son aspectos a considerar y tomar en cuenta para realizar una nueva red o implementar una nueva tecnología de transporte.

Con el presente trabajo se quiere dar a conocer, describir y explicar la técnica DWDM. Se presentarán sus ventajas en comparación con otras tecnologías, la arquitectura de una red de este tipo, problemas y complicaciones que presenta, equipo relacionado con esta tecnología y futuro crecimiento que se puede lograr a tener con una red de multiplexación de longitud de onda densa.

El trabajo está conformado por cuatro capítulos. En el primero se describen los distintos medios de transmisión y sus principales tipos y ramas en los que se encuentran divididos. En el segundo capítulo, se trata específicamente un medio de transmisión guiado, la fibra óptica, mencionando todas las ventajas y características de la misma. En la tercera parte se contemplan los fundamentos, características, componentes, aplicaciones, ventajas/desventajas, arquitectura, topologías y demás aspectos de la tecnología DWDM. Por último, se detalla la situación actual que se tiene en Guatemala, en el aspecto de transmisión de datos; con enfoque primordial a las mejoras que ha generado para el país, los problemas que se tienen y sus posibles soluciones, las limitaciones que se tienen para expansiones y el futuro de esta tecnología en Guatemala.

Se quiere dar a conocer la situación actual en Guatemala en el campo de las telecomunicaciones, explicando a detalle la tecnología más reciente que se tiene en Guatemala para transmisión de información, que está recién empezando. Es una tecnología que puede aprovecharse de mejor manera, pero las limitaciones que presentamos como país, no permiten este crecimiento.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

1. Dar a conocer, describir y explicar la tecnología DWDM, las mejoras/beneficios que ha generado para la transmisión de datos y mostrar cómo puede seguir creciendo en Guatemala.

B. Objetivos específicos

1. Dar a conocer la importancia que tiene la fibra óptica actualmente, así como sus ventajas y su funcionamiento.
2. Comprender la tecnología base de la transmisión por multiplexación de longitudes de onda y las principales áreas que la requieren para incrementar su capacidad.
3. Conocer los términos más importantes vinculados con tecnología DWDM y lograr describir la arquitectura de un sistema DWDM.
4. Identificar los problemas y/o complicaciones que presenta esta tecnología (DWDM) y cómo son solucionados.
5. Conocer las limitaciones que se presentan en Guatemala que no permiten la evolución de la tecnología DWDM.
6. Dar a conocer el futuro y el crecimiento que se puede seguir presentando con esta tecnología.

III. MEDIOS DE TRANSMISIÓN

A. Definición

El medio de transmisión es cualquier material (en estado sólido, líquido, gaseoso o incluso plasma) que es capaz de propagar ondas de energía. La ausencia de un medio material también puede constituir un medio de transmisión para las ondas electromagnéticas, como por ejemplo, la luz y las ondas de radio. Normalmente, las transmisiones se realizan empleando ondas electromagnéticas que se propagan a través de un canal. Debido a que las ondas electromagnéticas pueden ser transmitidas por un material o en el vacío, el canal de transmisión puede, o no, ser un medio físico.

Existe una gran cantidad de medios de transmisión de información entre dos terminales, por lo que ha sido necesaria la clasificación de estos medios. Se pueden clasificar según la forma de conducir la señal a través del medio o también según el modo de la transmisión.

B. Clasificación de los medios de transmisión

Esta clasificación puede dividirse en dos grandes grupos, que a la vez tienen subdivisiones, para clasificar y detallar de mejor manera los medios de transmisión.

1. Según el modo de transmisión

a. De acuerdo a dirección de los intercambios

1) **Conexión simple.** Es el tipo de conexión donde los datos fluyen en una sola dirección, es decir, desde el transmisor hacia el receptor. Como ejemplo puede darse la transmisión de información desde el "mouse" (ratón) hacia el computador, el cual es en una sola dirección, ya que el computador no necesita enviarle información al *mouse*.

2) **Conexión semidúplex.** También llamada conexión alternativa y se refiere a aquella donde los datos fluyen en una u otra dirección, pero nunca simultáneamente. Con este tipo de conexión cada extremo puede transmitir después del otro. Este tipo de conexión hace posible tener una comunicación bidireccional. Un ejemplo de esta conexión, son los "walkie-talkies" los cuales son transmisores-receptores portátiles, donde no se puede enviar información, si se encuentra recibiendo.

3) **Conexión dúplex total.** Es una conexión en la que los datos fluyen en ambas direcciones. De esta manera es posible transmitir y recibir al mismo tiempo. La mayoría de los sistemas de redes de comunicaciones modernos funcionan en modo dúplex. Un ejemplo son las conversaciones por teléfono, ya que es posible enviar datos y recibirlos, simultáneamente.

b. De acuerdo a unidades de información traducidas simultáneamente a través de canales de comunicación

1) **Conexión paralela.** Estas conexiones consisten en transmisiones simultáneas a través de diferentes canales (puede ser un alambre, cable, o cualquier medio físico).

2) **Conexión en serie.** En una conexión en serie, las unidades de transmisión se envían de una en una, a través del canal de transmisión. Actualmente, la mayoría de procesadores procesan los datos en paralelo, por lo que es necesario que el transmisor transforme los datos paralelos entrantes en datos seriales y el receptor debe hacer lo opuesto.

c. De acuerdo a la sincronización entre transmisor y receptor

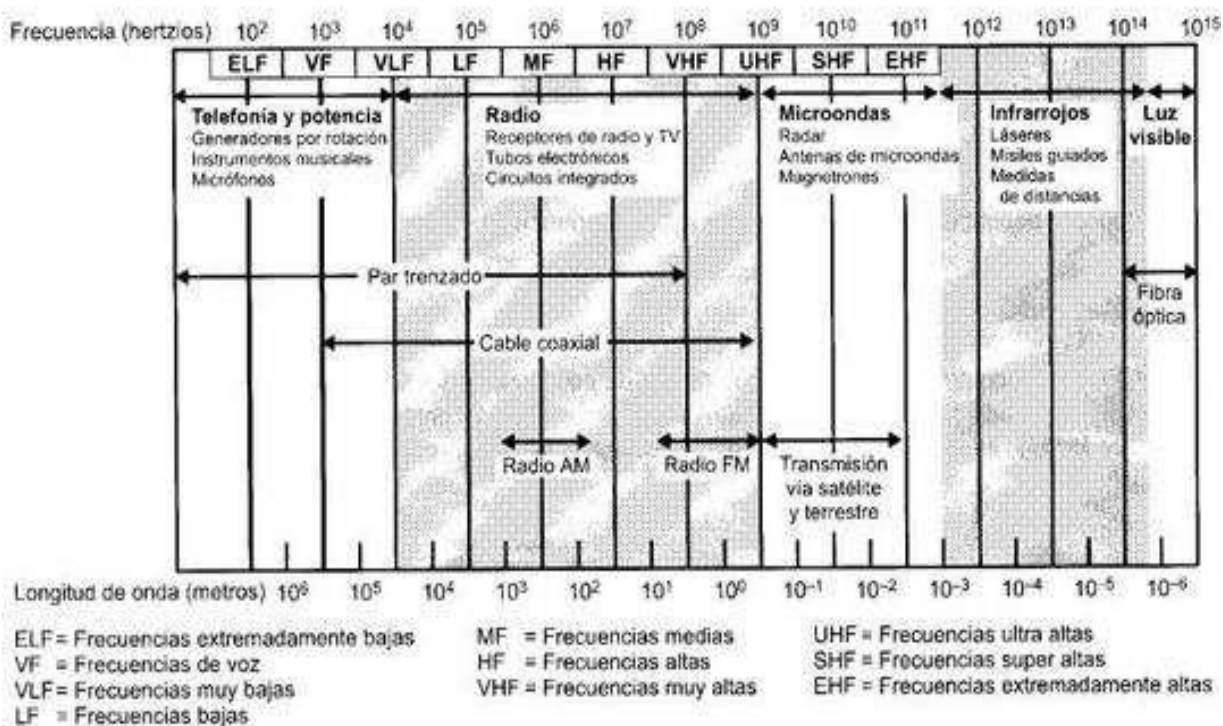
1) **Conexión asincrónica.** Este tipo de conexión consiste en el envío de caracteres en intervalos de tiempo irregulares, como puede ser el ejemplo de la información brindada por un teclado. Este problema se resuelve adjuntando información que indica el inicio de la transmisión del carácter (bit de inicio) y finaliza enviando información de finalización de transmisión (bit de finalización).

2) **Conexión sincrónica.** Este tipo de conexión consiste en que el transmisor y el receptor están sincronizados con el mismo reloj. La velocidad a la que el transmisor envía, es la misma a la que el receptor recibe, incluso cuando no hay transmisión de bits. De esta forma ambos se encuentran sincronizados.

2. **Según la forma de conducir la señal a través del medio.** Por esta característica, los medios de transmisión pueden clasificarse en dos grandes grupos: guiados y no guiados. En ambos casos, la comunicación se lleva a cabo con ondas electromagnéticas. Cuando se diseñan sistemas de transmisión es deseable que se tengan largas distancias y altas velocidades de transmisión. Es por eso la importancia de elección de un medio de transmisión, ya que existen una serie de factores relacionados con el medio y la señal que pueden afectar la velocidad y la distancia, como por ejemplo: interferencias, atenuaciones, cantidad de receptores, ancho de banda, entre otros.

Los factores determinantes para determinar las características y la calidad de transmisión, son la naturaleza del medio y la de la señal que se transmite. En los medios guiados, el medio es el que determina las limitaciones de transmisión, por ejemplo, la velocidad de transmisión de datos. En los medios no guiados, resulta más determinante el espectro de frecuencia de la señal producida por la antena. La frecuencia y el espectro electromagnético varían según el medio de transmisión, como puede observarse en la Figura 1, con algunos ejemplos de medios guiados y no guiados.

Figura 1: Espectro electromagnético para las telecomunicaciones



Fuente: <http://modul.galeon.com/aficiones1360146.html>

a. Medios de transmisión guiados. Este tipo de medio es el que está constituido por un cable, el cual es encargado de la conducción de las señales desde un emisor a un receptor o viceversa. Existen varias características para estos medios, como la velocidad máxima de transmisión, tipo de conductor utilizado, la inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, facilidad o dificultad de instalación y capacidad de soportar diferentes tecnologías a nivel de alcance. Estas características varían, mejoran o empeoran según el medio que utilicemos, entre los más comunes se encuentran: el par trenzado, el cable coaxial y la fibra óptica. En la Tabla I pueden observarse algunas diferencias entre los tres medios guiados más utilizados.

Tabla I: Comparación entre medios de transmisión guiados

Características	Coaxial delgado (10 base 2)	Coaxial grueso (10 base 5)	Par trenzado (10 base T)	Fibra óptica
Precio del cable	Mayor que el par trenzado	Mayor que el coaxial delgado	El más barato	El más caro
Longitud máxima (aproximadamente)	185 metros	500 metros	100 metros	2 Kilómetros
Velocidad de transmisión	100 Mbps	10 Mbps	10 Mbps 4-100 Mbps	Más de 100 Mbps
Flexibilidad	Muy flexible	Menos flexible	El más flexible	No flexible
Facilidad de instalación	Fácil	Fácil	Muy fácil	Difícil
Sensibilidad a interferencias	Buena protección	Buena protección	Sensible	Nada sensible
Características adicionales	Elementos de soporte más baratos que par trenzado.	Elementos de soporte más baratos que el par trenzado.	El mismo que el cable telefónico; a menudo ya instalado	Admite voz, datos y video.
Usos principales	Instalaciones medias y grandes con alta seguridad.		UTP pequeñas instalaciones. STP Token Ring de cualquier tamaño.	Cualquier tamaño de instalación que necesite altas velocidades y alta seguridad.

Fuente: Tecnologías y redes de transmisión de datos. Pág. 87

1) El par trenzado. Consiste en un par de hilos de cobre conductores cruzados entre sí, con entorchados de esta manera para reducir el ruido de diafonía. Mientras se incrementa el número de cruces por unidad de longitud, se presenta un mejor comportamiento ante el problema mencionado. Este tipo de medio es el más utilizado debido a su bajo costo (sobre todo en telefonía) pero su inconveniente principal es su baja velocidad de transmisión y su poco alcance. Representan un medio muy susceptible a ruido, pero por eso surge la necesidad de trenzar el cable con distintos pasos de torsión y se recubre con una malla extrema para disminuir este problema. Existen dos tipos de par trenzado, los cuales pueden apreciarse gráficamente en la Figura 2:

- Protegido: Shielded Twisted Pair (STP)
- No protegido: Unshielded Twisted Pair (UTP)

Figura 2: Tipos de par trenzado



Fuente: Medios de transmisión. Página Web.

2) El cable coaxial. El cable coaxial se compone de un hilo conductor, llamado núcleo, y una malla externa, estos separados por un dieléctrico o aislante (puede observarse en la Figura 3). Este medio de transmisión es el más versátil y por eso bastante utilizado. Es utilizado para transmitir señales analógicas y digitales. Pese a ser más caro que el par trenzado, el cable coaxial tiene una respuesta en frecuencia superior, por lo que permite mayores frecuencias y velocidades de transmisión. También resulta ser menos susceptible que el par trenzado tango a interferencias como a diafonía.

Figura 3: Partes del cable coaxial



Fuente: Medios de transmisión. Página Web.

Algunos de los inconvenientes que presenta son: la atenuación, ruido térmico, ruido de intermodulación. Además es necesario amplificar cada pocos kilómetros para señales analógicas y para señales digitales es necesario un repetidor por kilómetro, aproximadamente. Las aplicaciones más importantes son:

- Distribución de cable de televisión
- Telefonía a larga distancia
- Redes de área local

3) La fibra óptica. Es un medio de transmisión principalmente empleado en las redes de datos y es, básicamente, un hilo muy fino de material transparente (vidrio o materiales plásticos), por el que se envían señales ópticas con distintas longitudes de onda. Este medio de transmisión tiene forma cilíndrica y está formado por tres secciones: núcleo, revestimiento y cubierta.

Las fibras se utilizan ampliamente en telecomunicaciones, ya que permiten enviar gran cantidad de datos a grandes distancias y velocidades similares a las de radio o cable. Una característica a resaltar es su inmunidad a las interferencias electromagnéticas. Más adelante se explica más detalladamente las ventajas, aplicaciones, características y todo lo relacionado a fibra óptica.

b. Medios de transmisión no guiados. En este tipo de medios de transmisión se logra la transmisión y recepción por las antenas. Se radia energía electromagnética por medio de una antena y luego se recibe esta energía con otra antena. Existen dos tipos de transmisiones no guiadas:

- Direccional: emisión de energía electromagnética concentrándola en un haz, por lo que es necesaria una alineación
- Omnidireccional: la radiación se hace a todas partes, de manera dispersa.

Según el rango de frecuencias de trabajo presentado en la Tabla II, las transmisiones no guiadas pueden ser: de radio, microondas y luz.

1) Radio. Estas ondas se caracterizan principalmente por ser fáciles, relativamente, de generar y pueden viajar distancias muy largas (dependiendo de varios aspectos, como potencia de emisión, condiciones atmosféricas, relieve de terreno, entre otras) penetrando paredes sin problema, logrando así comunicaciones en interiores y exteriores. Son un tipo de ondas omnidireccionales y trabaja en bandas de frecuencia LF, MF, HF y VHF como se detalló en la Tabla II.

Sus propiedades dependen de la frecuencia a la que se opera: a baja frecuencia se cruzan los obstáculos y a altas frecuencias tienen a viajar en línea recta y rebotan en los obstáculos.

Además tiene varias formas de propagarse según la frecuencia: superficial, troposférica, ionosférica, en línea de visión y espacial.

Tabla II: Frecuencias de operación para medios de transmisión no guiados

Banda de Frecuencia	Nombre	Modulación	Razón de datos	Aplicaciones
30-300 KHz	LF (low frequency)	ASK, FSK y MSK	0.1 – 100 bps	Navegación
300-3000 kHz	MF (Medium frequency)	ASK, FSK y MSK	10 – 1000 bps	Radio AM comercial
3-30 MHz	HF (High frequency)	ASK, FSK y MSK	10 – 3000 bps	Radio de onda corta
30-300 MHz	VHF (Very high frequency)	FSK y PSK	Hasta 100 kbps	Televisión VHF, Radio FM
300-3000 Mhz	UHF (ultra high frequency)	PSK	Hasta 10 Mbps	Televisión UHF, Microondas terrestres
3-30 GHz	SHF (Super high frequency)	PSK	Hasta 100 Mbps	Microondas terrestres y por satélite
30-300 GHz	EHF (extremely high frequency)	PSK	Hasta 750 Mbps	Enlaces cercanos con punto a punto experimentales

2) Microondas. Las microondas utilizan el espacio aéreo como medio físico de transmisión. Se caracterizan por transmitir en forma digital a través de ondas de radio de muy corta longitud. Son las ondas electromagnéticas definidas en un rango de frecuencias entre 300 MHz y 300 GHz (longitudes de onda entre 1 m a 1 mm), sin embargo el estándar de la IEEE 100 (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, por sus siglas en inglés) sitúa el rango de frecuencias entre 1 GHz y 300 GHz (longitudes de onda entre 30 cm y 1 mm). Este tipo de transmisión puede ser dividida en dos ramas:

- Microondas terrestres: Se utilizan antenas parabólicas, las cuales deben estar alineadas o tener visión directa entre ellas. Las pérdidas de datos por atenuación e interferencias y la sensibilidad a las condiciones atmosféricas, son problemas que presenta.
- Microondas satelitales: El satélite amplifica las señales recibidas en la dirección adecuada. Una de las características importantes es que el rango de frecuencias para la recepción del satélite debe ser diferente al rango al que este emite, para que no exista interferencias. Debido al recorrido que debe hacer la señal desde emisor a receptor y viceversa, debe tenerse en cuenta el control de errores y el flujo de la señal.

3) Luz (infrarrojos y láser). El uso de luz infrarroja puede ser muy parecido a la transmisión digital con microondas. Es necesario, para la emisión y recepción, que los dispositivos tengan visión directa, ya que estas ondas se propagan en línea recta. Mediante este tipo de transmisión, se quiere dar la posibilidad de realizar una comunicación punto a punto utilizando un enlace óptico al aire libre como medio de transmisión, con una longitud determinada.

Por otra parte, las transmisiones de láser de infrarrojo, tiene las mismas técnicas empleadas por la fibra óptica para la transmisión de una señal, solamente varía el medio, que en este caso es el aire libre. Típicamente, son utilizados en donde la instalación de cable no es factible, ya que el láser tiene un alcance hasta de 10 millas. Resulta una excelente opción para transmisión en distancias cortas, ya que se presentan problemas cuando la señal puede ser obstaculizada.

IV. FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica, como ya se explicó previamente, es un medio de transmisión empleado en las redes de datos, construido por un núcleo de vidrio o plástico, que sirve como conductor de la onda luminosa y está cubierta con un revestimiento de vidrio o plástico que mantiene la luz en el interior, estos dos elementos son cilíndricos, coaxiales, dieléctricos y con diferentes índices de refracción, siendo menor el del revestimiento, para que la transmisión ocurra en el núcleo, por medio del fenómeno de reflexión interna, es decir, que cuando un rayo de luz (datos) entran por un extremo del cable, estos no se disipan hacia el exterior sino que mediante el proceso de reflexiones sucesivas dentro del núcleo se propagan hasta el otro extremo de la fibra. Según Herrera (2003:86):

«Existen tres razones básicas para emplear fibra óptica:

- Si las grandes distancias son un factor considerable en la implantación de una red local.
- Si se necesita alta capacidad y un gran ancho de banda.
- Si el ambiente de trabajo es demasiado hostil en cuanto a ruido e interferencia.»

A. Descripción física

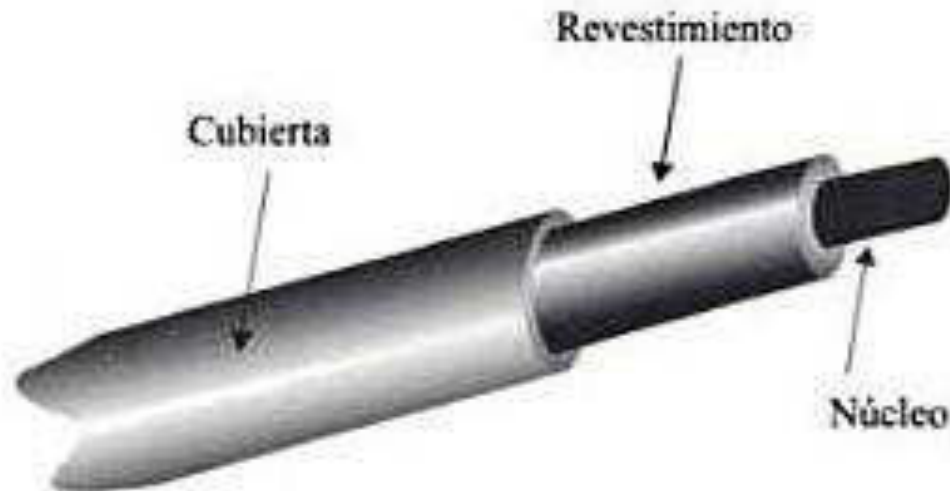
La fibra óptica consiste básicamente de tres partes. La primera es el núcleo central, el cual tiene alto índice de refracción de la luz. El núcleo está envuelto por un revestimiento, también a base de vidrio, pero con un índice de refracción más bajo y su función es proteger al núcleo de contaminación pero, más importante, al tener una refracción menor provoca el fenómeno de reflexión interna, por lo que hace posible la transmisión de información, ya que el rayo de luz que entró por un extremo (la información codificada) llega al otro extremo por medio de reflexiones sucesivas dentro del núcleo. Por último, se encuentran la capa o capas (ya que pueden ser varias) con diferentes funciones cada una, como por ejemplo, el amortiguamiento, protección aislante, protección contra humedad, etc. Las partes básicas de la fibra óptica pueden observarse en la Figura 4, nótese que solo se generalizó la capa o capas finales en una, llamada cubierta.

B. Características principales

Dentro de las características que presenta la fibra óptica se encuentra que es: delgada, ligera, fuerte y flexible. Todo esto respecto a sus características estructurales y mecánicas. Estos

detalles hacen que la fibra sea un medio de transmisión mucho más sencillo y rápido de instalar, respecto al cable coaxial por ejemplo.

Figura 4: Estructura de la fibra óptica



Fuente: Tecnologías y redes de transmisión de datos. Pág. 85.

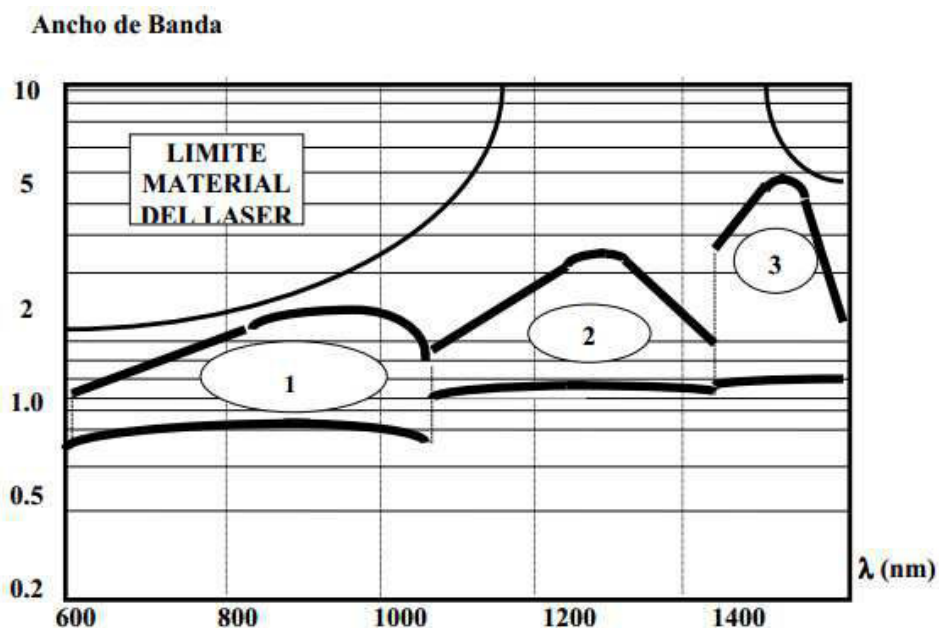
Por otra parte las fibras ópticas son capaces de suministrar un ancho de banda extremadamente grande y funciona adecuadamente para distancias relativamente grandes entre repetidores, debido a la pequeña pérdida de la señal transmitida. No se ve afectada por voltajes y corrientes en líneas de potencias, ni tampoco por interferencias electromagnéticas. Otra característica de mucha importancia es que no son conductoras, por lo que no propagan descargas eléctricas hacia equipos conectados. A continuación se detallan algunas de las características más importantes de las fibras ópticas.

1. **Longitud de onda.** La región de trabajo de la fibra óptica se encuentra dentro del rango de luz visible al ojo humano (400 nm a 700 nm) y también longitudes de onda cercanas a la zona infrarroja y ultravioleta, que presentan características y propiedades similares a la región visible. Las longitudes de onda utilizadas en comunicaciones se reducen de 700 nm a 1600 nm, como puede observarse en la Figura 5.

El ojo humano puede apreciar un rango relativamente pequeño dentro del espectro de las fibras ópticas, que se encuentra entre los colores violeta y rojo. Por eso, los medios que se emplean para transmitir información por el interior de las fibras ópticas utilizan luces que se encuentran dentro de este espectro.

superior se define para que el rango no esté dentro de la ascendente del pico de absorción de agua.

Figura 6: Gráfica de ventanas ópticas



Fuente: Estudio de las redes ópticas de acceso DWDM y factibilidad de ser implementadas en la zona central del Ecuador.

- Banda E (Extendida): la banda se encuentra definida entre 1360 y 1460 nm. La longitud de onda superior se estableció debido a que el efecto de absorción es imperceptible arriba de los 1460 nm.
- Banda S (Short): banda comprendida entre 1460 nm y 1530 nm. El desempeño de la fibra óptica para cierto rango de temperaturas es adecuado para 1625 nm, por eso fue escogido como límite superior.
- Banda C (Convencional): banda comprendida entre 1530 nm y 1565 nm. Esta banda resulta ser la banda dominante para redes de telecomunicaciones con mayores distancias, como podrá describirse de mejor manera, más adelante (tecnología DWDM).
- Banda L (Long): definida para longitudes de onda dentro de 1565 nm y 1625 nm. El rendimiento del cable de fibra óptica para un rango de temperaturas en especial, es adecuado para 1625 nm, para longitudes de onda superiores a la banda C.
- Banda U (Ultralong): banda definida desde 1625 nm hasta 1675 nm. Esta zona es una región atractiva para futuras longitudes de onda, pese a su elevada atenuación.

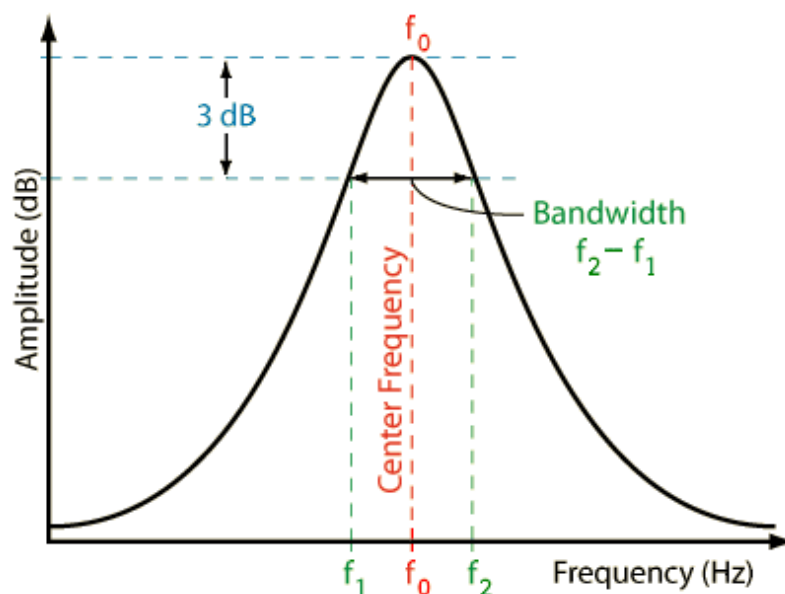
Tabla III: Bandas de operación de la fibra óptica

Banda	Descripción	Rango (nm)
Banda-O	Original	1260 a 1360
Banda-E	Extendida	1360 a 1460
Banda-S	Longitud de onda corta	1460 a 1530
Banda-C	Convencional	1530 a 1565
Banda-L	Longitud de onda larga	1565 a 1625
Banda-U	Longitud de onda ultra-larga	1625 a 1675

Fuente: ITU-T Serie G, Suplemento 39: Transmission systems and media, digital systems and networks.

4. **Ancho de banda.** El ancho de banda es un concepto que es definido como el rango de frecuencias donde se concentra la mayor parte de la potencia de la señal. A las frecuencias que están dentro de este rango se les llama frecuencias efectivas. Como puede observarse en la Figura 7, el ancho de banda es la diferencia entre las frecuencias en las que su atenuación (al pasar por el filtro) se mantiene igual o inferior a 3 dB, comparada con la frecuencia central de pico (f_0 en la Figura 7).

Figura 7: Gráfica de frecuencia contra amplitud



Fuente: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-bandwidth.htm>

Si se considera el hecho de que para poder transmitir información es necesaria una banda pequeña de frecuencias (incluso es posible con KHz) entonces, mientras más grande sea el ancho de banda en un medio de transmisión, es posible tener una mayor cantidad de bandas que puede contener la región luminosa del espectro de frecuencias sin que se interfieran entre sí. Esto nos permite velocidades de transmisión mayores, en el orden de GHz o superiores. El ancho de banda de transmisión en las fibras monomodo puede ser de hasta 100 GHz y en las fibras multimodo puede llegar a ser hasta de 2 GHz.

5. Dispersión. Los pulsos de luz se dispersan a lo largo de su viaje por la fibra. Sus principales causas son la propagación multimodal y por el ancho espectral de las fuentes de luz. Se manifiesta como un ensanchamiento del pulso en el tiempo, haciéndose mayor con la longitud. Como consecuencia, se ve limitada la tasa de datos, por ejemplo, a altas tasas los pulsos se traslapan unos con otros y hacen que el receptor no los logre distinguir. Existen varios tipos de dispersión:

- Modal: causada por la propagación en fibras multimodo, debido a las diferentes trayectorias que toman los rayos de luz, por lo que llegan al destino en diferentes tiempos, causando ensanchamiento del pulso.
- Cromática: su principal causa es el ancho espectral de la fuente. Una fuente de luz emite luces de diferentes longitudes de onda, que son las que viajan por la onda, y por eso llegan al destino en diferentes tiempos.
- Por guía-onda: Es despreciable, y se debe al ancho de banda de la señal y la configuración de la guía.
- Por modo de polarización: debido a cualquier imperfección en el núcleo, como una curvatura, que provoca que 2 modos de polarización viajen a diferentes velocidades y lleguen en distintos tiempos, causando ensanchamiento del pulso.

6. Atenuación. Es la pérdida de energía que sufre el pulso de luz cuando viaja de un extremo al otro dentro de la fibra. Es el factor más importante en la limitación del rendimiento en los sistemas de comunicación por fibra. Se puede clasificar en dos grandes tipos:

a. **Intrínseca.** Su principal causa son las impurezas de vidrio o estructuras heterogéneas que se forman durante la fabricación de la fibra óptica. Los dos tipos de atenuación intrínseca más frecuentes son:

- Difusión: producida cuando rayo de luz choca contra una impureza o estructura heterogénea y se dispersa en varias direcciones. Se conoce como difusión de Rayleigh o

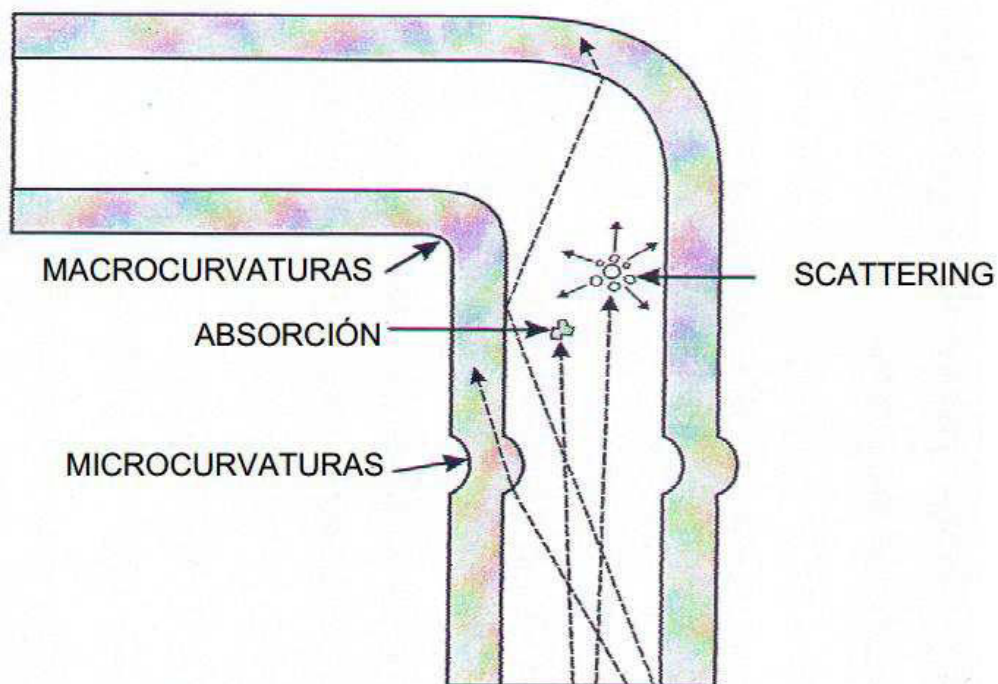
Scattering; es el principal causante de la atenuación en una fibra (cerca del 95% de casos). Puede observarse gráficamente Figura 8.

- Absorción: se produce cuando el rayo de luz es absorbido por el vidrio o impurezas del mismo, que por sus propiedades químicas lo transforma en calor. Puede observarse gráficamente en la Figura 8.

b. Extrínseca. Una curva o pequeña desviación en la fibra puede afectar el ángulo crítico en esa área en específico. Como consecuencia, puede que la luz que viaja por el núcleo se refracte y de esta forma pierde potencia y podríamos perder la señal transmitida. Pueden ocurrir dos tipos de curvas que provoquen atenuación:

- Macrocurvatura: se da cuando un cable está demasiado doblado. Para prevención de este problema, para cada fibra existe un radio de curvatura mínimo. Puede observarse gráficamente en la Figura 8.
- Microcurvatura: son pequeñas fisuras en el núcleo de la fibra y pueden ser causadas por temperaturas o estiramiento forzado de la fibra. Ejemplo gráfico en la Figura 8.

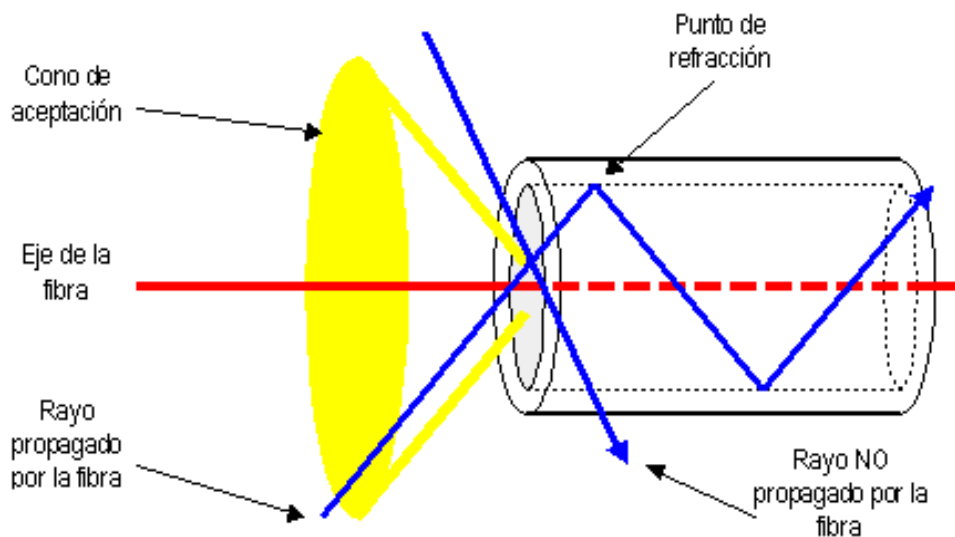
Figura 8: Tipos de atenuación en fibras ópticas



Fuente: Curso de fibra óptica. Página Web.

7. **Cono de aceptación.** Es un cono donde se garantiza que los rayos de luz pueden entrar a la fibra óptica. Si un rayo de luz no cumple con el ángulo del cono de aceptación puede no ser transportado por la fibra óptica. Como puede apreciarse en la Figura 9, cualquier luz que entre desde el exterior del cono de aceptación, se refracta hacia el revestimiento y no se propaga. El cono está ligado a los materiales y tipo de fibra óptica.

Figura 9: Cono de aceptación en fibras ópticas



Fuente: <http://kathy.galeon.com/pag5.html>

8. **Apertura numérica.** La apertura numérica indica la cantidad de luz aceptada por la fibra óptica. Al hacer más grande este valor, mayor es la cantidad de luz recogida por la fibra de la fuente de luz emisora. Matemáticamente es el seno del ángulo de aceptación (ángulo del cono de aceptación desde la normal de la superficie de la fibra).

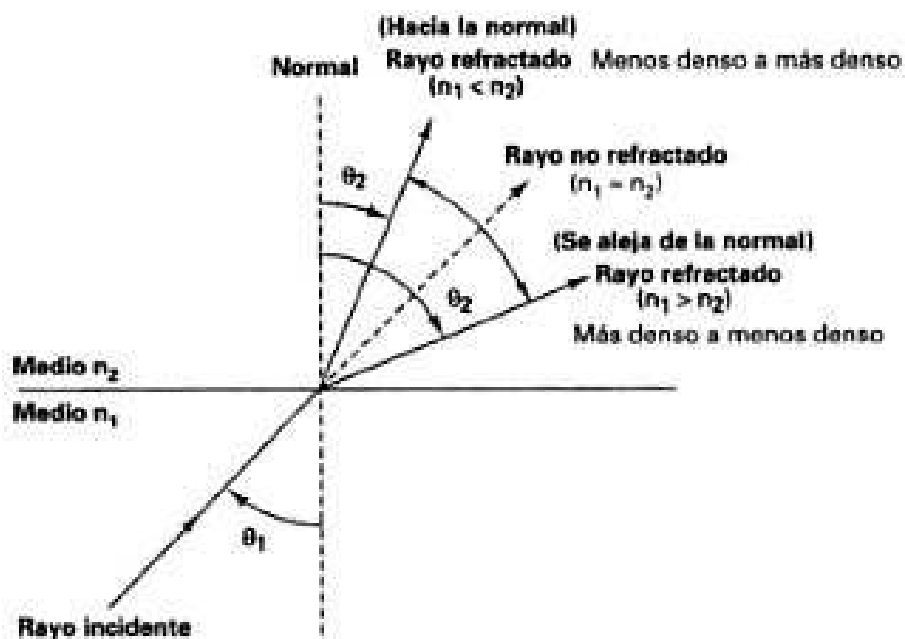
C. Principio de funcionamiento

Las fibras ópticas se componen de un cilindro de material dieléctrico llamado núcleo y se encuentra rodeado por un revestimiento, también dieléctrico, con un índice de refracción ligeramente inferior al del núcleo. Con esto, se puede explicar la propagación de una señal a lo largo de la fibra, que básicamente se basa en las propiedades de refracción y reflexión de la luz.

1. **Principio de refracción.** Es el cambio de dirección que presenta un rayo de luz cuando hay un cambio de interfaz con densidades distintas. En la transmisión por fibra óptica se presenta en la interfaz entre aire (emisor) y vidrio (núcleo de fibra). Si un rayo luminoso incide con un ángulo desde una sustancia menos densa (aire en caso de la transmisión por fibra óptica)

a otra más densa (vidrio del núcleo), su dirección de propagación se quiebra y su trayectoria continúa en la segunda sustancia con el ángulo de refracción, diferente al ángulo de incidencia. Este principio puede apreciarse de mejor manera en la Figura 10, donde se varía la densidad de ambos medios para ver el comportamiento del ángulo de refracción.

Figura 10: Comportamiento del principio de refracción



Fuente: Sistemas de comunicaciones electrónicas. Pág. 432.

a. Índice de refracción. Se le conoce así a la relación de la velocidad de propagación de un rayo de luz en el espacio libre, entre la velocidad de propagación del rayo en determinado material. Su ecuación (1) es la siguiente:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

En la que:
 c = velocidad de la luz en espacio libre (300,000,000 m/s)
 v = velocidad de la luz en determinado material (m/s)

Este índice también presenta una variación para distintas frecuencias, pero en la mayoría de las aplicaciones es insignificante. Los índices de refracción de varios materiales comunes aparecen en la Tabla IV.

Tabla IV: índices de refracción de algunos materiales

Medio	Índice de refracción*
Vacío	1.0
Aire	1.0003 (≈ 1.0)
Agua	1.33
Alcohol etílico	1.36
Cuarzo fundido	1.46
Fibra de vidrio	1.5–1.9
Diamante	2.0–2.42
Silicio	3.4
Arseniuro de galio	3.6

Al aumentar la densidad disminuye la velocidad de propagación y aumenta el índice de refracción (ya que el índice de refracción es inversamente proporcional a la velocidad y directamente proporcional a la densidad)

* Basado en una longitud de onda emitida por una llama de sodio (5890 Å)

Fuente: Sistemas de comunicaciones electrónicas. Pág. 431.

b. Ley de Snell. Con esta ley se puede explicar la forma en que un rayo de luz se refracta al encontrar la interfaz de dos materiales transmisores con índices de refracción distintos. Está establecida por la ecuación (2).

(2)

En la que:

- n_1 = índice de refracción de material 1 (adimensional)
- n_2 = índice de refracción de material 2 (adimensional)
- θ_1 = ángulo de incidencia (grados)
- θ_2 = ángulo de refracción (grados)

Con esta ley, como se aprecia en la Figura 10, se puede observar que el rayo incidente puede refractarse hacia la normal, o alejándose de ella, y esto depende de los valores de índices de refracción. Además, conociendo los índices de refracción de los materiales utilizados y el ángulo de incidencia, puede averiguarse el ángulo de refracción, el cual es el ángulo con el que la señal viaja dentro del núcleo de la fibra.

c. Ángulo crítico. Es el ángulo de incidencia mínimo con el cual un rayo de luz tiene un ángulo de refracción de 90° o mayor, y de esta forma poder llegar al receptor al otro lado de la fibra. Esta definición únicamente aplica cuando la luz pasa de un medio más denso a uno menos denso. Al tener un ángulo de refracción mayor o igual a 90° , la luz puede penetrar al material menos denso y producir reflexión total y con un ángulo de reflexión igual al de incidencia. Una visualización gráfica se puede observar en la Figura 11. Haciendo que θ_2 sea 90° en la ecuación (2), se obtiene (3), siendo la ecuación para encontrar el ángulo crítico:

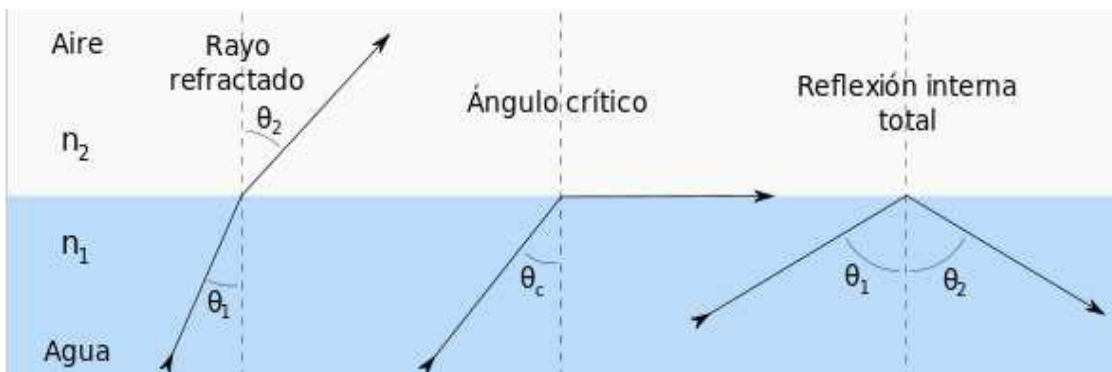
(3)

En la que: n_1 = índice de refracción de material 1 (adimensional)
 n_2 = índice de refracción de material 2 (adimensional)
 θ_1 = ángulo de incidencia (grados)
 θ_c = ángulo crítico

2. Principio de reflexión. Si un rayo de luz que se propaga a través de un medio con cierta densidad incide sobre la superficie de un segundo medio con distinta densidad, parte de la luz es reflejada y parte de la luz entra como rayo refractado. La cantidad de luz reflejada depende de la relación entre los índices de refracción de ambos medios.

Este principio afirma que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Si la superficie del segundo medio es lisa, funcionaría como un espejo y produciría una imagen reflejada. En el otro caso, si la superficie del medio es rugosa, las normales a distintos puntos de la superficie se encontrarían en direcciones aleatorias, por lo que la señal se reflejaría, pero aleatoriamente, causando dispersión.

Figura 11: Gráfica de refracción, reflexión interna total y ángulo crítico



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Reflexi%C3%B3n_interna_total

a. Reflexión interna total. Es el fenómeno que se produce cuando un rayo de luz que se encuentra en un medio con cierto índice de refracción, se refracta con otro medio con menor índice de refracción, de tal modo que no es capaz de atravesar la superficie entre ambos medios, por lo que se refleja completamente. Este fenómeno solo ocurre para ángulos de incidencia superiores al ángulo crítico.

Como ya se describió, la reflexión interna total, solo ocurre cuando una señal viaja de un medio con alto índice refractivo a otro medio con menor índice refractivo. Este es el principio que

se utiliza para que la luz viaje a través de la fibra óptica sin pérdidas de energía, ya que el núcleo presenta mayor índice de refracción que el revestimiento. Puede observarse el comportamiento de este principio en la Figura 11.

D. Tipos de fibra óptica

Las fibras ópticas (sólo la fibra óptica en sí, núcleo-revestimiento-cubierta) pueden ser clasificadas según diferentes criterios:

1. **Modos de propagación.** Las fibras ópticas se pueden clasificar según la forma de los rayos de luz emitidos dentro del núcleo. Básicamente existen dos clases principales de propagación: monomodo y multimodo, que serán explicadas más adelante. Sin embargo, es importante resaltar que el tipo de fibra también varía según la transmisión que se realiza y los tipos de fibras en que se divide según el modo de propagación pueden observarse en la tabla V.

Tabla V: Tipos de fibra según el modo de propagación

Tipo de propagación	Tipo de fibra	Ventajas	Desventajas
Monomodo	Monomodo	<p>Dispersión mínima, por lo que un pulso que entra de un lado puede reproducirse muy exacto del lado del receptor.</p> <p>Mayor ancho de banda y mayor velocidad de transmisión de información.</p>	<p>Fuente de luz y dispositivos de empalme más costosos.</p> <p>Núcleo muy pequeño, dificulta el acoplamiento de la luz.</p> <p>Apertura numérica pequeña, relativamente.</p>
Multimodo	Multimodo de índice escalón	<p>Bajos costos y de fabricación sencilla.</p> <p>Facilidad de acoplamiento de la fuente de emisión de luz. La apertura numérica es relativamente grande.</p>	<p>Alta dispersión. Se obtienen diferencias de tiempo de propagación.</p> <p>Bajo ancho de banda y baja velocidad de transmisión.</p>
	Multimodo de índice gradual	<p>Esta fibra se considera una fibra intermedia comparada con los dos tipos anteriores.</p> <p>Fácil acoplamiento de luz, aunque son mejores las de índice escalón.</p> <p>Baja dispersión. Menor que la fibra multimodo de índice escalón, pero mayor que la de monomodo.</p>	

2. **Materiales que conforman el núcleo y el revestimiento.** Existen tres tipos de fibra óptica según su fabricación, ya sea de vidrio, plástico o una combinación de estas:

- Núcleo de plástico y forro de plástico
- Núcleo de vidrio y forro de plástico (se le llama frecuentemente PCS, sílice revestido con plástico por sus siglas en inglés)
- Núcleo de vidrio y forro de vidrio (se le llama frecuentemente SCS, sílice revestido con sílice por sus siglas en inglés)

Las fibras de plástico tienen la ventaja de ser flexibles y, en efecto, más robustas que el vidrio. También resultan fáciles de instalar y pueden resistir esfuerzos, son menos costosas y pesan 60% menos que el vidrio. La gran desventaja es que no propagan la luz con tanta eficiencia como el vidrio, dando como resultado, el funcionamiento solo para tramos cortos.

Las fibras con núcleos de vidrio tienen bajas atenuaciones características, es decir, que propagan eficazmente la luz. Las llamadas PCS se ven afectadas menormente por la radiación y por ende, tienen mucho más atractivo en aplicaciones militares. Por otra parte las SCS tienen mejores características de propagación, pero son los menos robustos y son más susceptibles a aumentos de atenuación expuestas a radiación que las PCS.

3. **Dimensiones del núcleo y del revestimiento.** Las dimensiones/medidas del núcleo y del revestimiento están estrechamente relacionadas con el tipo de propagación de la luz en el núcleo de la fibra. Es decir, el núcleo para un tipo de fibra multimodo no es el mismo que para una fibra monomodo. Las fibras ópticas utilizadas en telecomunicaciones pueden dividirse en cinco grupos principales de fabricación, presentados en la tabla VI.

- Clase I, núcleo 8 a 10 μm y revestimiento de 125 μm : Es una fibra monomodo y es capaz de propagar la mayor tasa de datos y es la fibra con la atenuación más baja. Utilizada para transmisión de alta velocidad o para largas distancias.
- Clase II, núcleo 50 μm y revestimiento de 125 μm : fue la primera fibra en venderse en grandes cantidades para telecomunicaciones. Tiene pequeña apertura numérica y pequeño núcleo relativamente, por lo que la potencia de la fuente acoplada a la fibra es la menor de todas las fibras multimodo.
- Clase III, núcleo 62.5 μm y revestimiento de 125 μm : es la más popular para transmisión multimodo. Su mayor apertura numérica y su mayor diámetro de núcleo hacen que el acoplamiento de luz sea ligeramente mayor que la fibra de clase II.

- Clase IV, núcleo de 85 μm y revestimiento de 125 μm : fibra de medidas europeas. Buena capacidad para acoplar luz y por utilizar el diámetro estándar de revestimiento se puede utilizar conectores y empalmes estándar para esta fibra.
- Clase V, núcleo de 100 μm y revestimiento de 140 μm : fibra multimodo de mayor diámetro y, por ende, la más fácil de conectar. Es de compleja fabricación, por lo que incrementa su costo y la hace la menos común.

Tabla VI: Tipo de fibra según dimensiones de núcleo y revestimiento

Clase	Núcleo (μm)	Revestimiento (μm)	Recubrimiento (μm)	Tubo o protección (μm)
I	8 a 10	125	250 a 500	900 a 2000
II	50	125	250 a 500	900 a 2000
III	62.5	125	250 a 500	900 a 2000
IV	85	125	250 a 500	900 a 2000
V	100	140	250 a 500	900 a 2000

Fuente: Procesos de fabricación de fibras ópticas. Pág. 24.

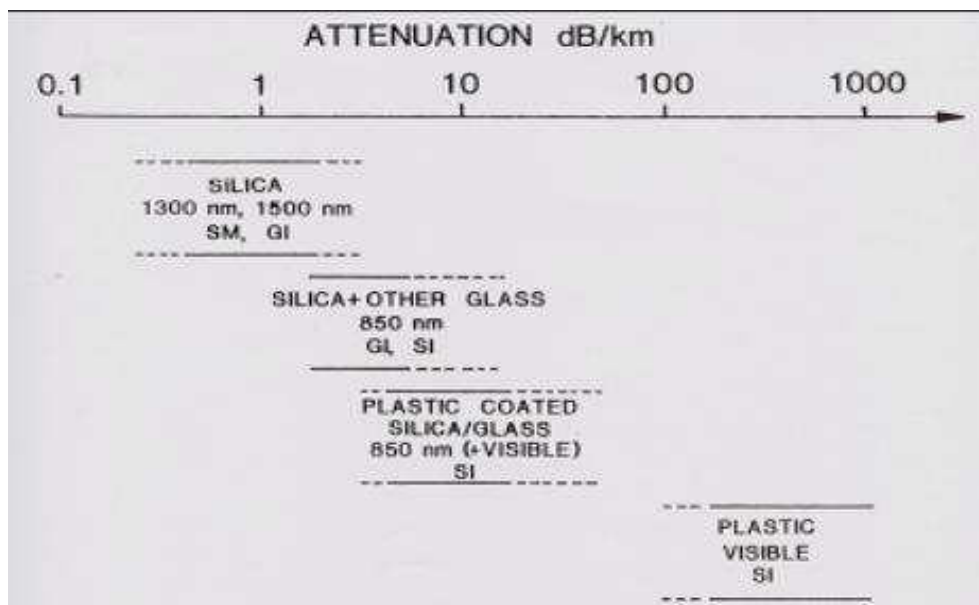
4. **Características de transmisión.** Más que un tipo de fibras, estas resultan ser algunas consideraciones a tomar en cuenta para la elección de fibra, ya que el comportamiento de fibra varía según distintos factores, como los siguientes:

- Longitud de onda utilizada para transportar información
- La atenuación (dB/Km)
- El ancho de banda (MHz)
- Apertura numérica
- La dispersión

Para seleccionar el tipo de fibra a utilizar (material, longitud de onda a usar para la transmisión y el modo de propagación) según la atenuación que genera, puede utilizarse la Figura 12. Y de igual manera, para la selección de fibra para un ancho de banda determinado,

puede utilizarse la Figura 13. Importante es resaltar que con la disminución de la atenuación, aumenta el precio de las fibras.

Figura 12: Selección de fibra según atenuación generada



Fuente: Procesos de fabricación de fibras ópticas. Pág. 27.

Figura 13: Selección de fibra para ancho de banda determinado



Fuente: Procesos de fabricación de fibras ópticas. Pág. 27.








Donde SM es la fibra monomodo, GI es la fibra multimodo de índice gradual y SI es la fibra multimodo de índice escalón.

E. Tipos de conectores de fibra óptica

Los conectores sirven para conectar un cable de fibra óptica a un equipo específico. Así que los extremos de la fibra varían según la función que realizarán. Los conectores más comunes (que pueden observarse en la Figura 14) son:

- FC, siendo su principal uso las telecomunicaciones y transmisión de datos.
- LC y MT-Array, que son utilizados para transmisiones de alta densidad de datos.
- FDDI, usado en redes de fibra óptica.
- SC y SC-dúplex, usado para la transmisión de datos, es un conector bastante utilizado.
- ST o BFOC, utilizado en redes de edificios y sistemas de seguridad.

Figura 14: Principales conectores de fibra óptica

Connector	Insertion Loss	Repeatability	Fiber Type	Applications
 FC	0.50-1.00 dB	0.20 dB	SM, MM	Datacom, Telecommunications
 FDDI	0.20-0.70 dB	0.20 dB	SM, MM	Fiber Optic Network
 LC	0.15 dB (SM) 0.10 dB (MM)	0.2 dB	SM, MM	High Density Interconnection
 MT Array	0.30-1.00 dB	0.25 dB	SM, MM	High Density Interconnection
 SC	0.20-0.45 dB	0.10 dB	SM, MM	Datacom
 SC Duplex	0.20-0.45 dB	0.10 dB	SM, MM	Datacom
 ST	Typ. 0.40 dB (SM) Typ. 0.50 dB (MM)	Typ. 0.40 dB (SM) Typ. 0.20 dB (MM)	SM, MM	Inter-/Intra-Building, Security, Navy

Fuente: Multiplexación por división de onda (WDM). Pág. 11.

F. Cables de fibra óptica

Los cables de fibra óptica están formados por una o más fibras ópticas protegidos por una estructura compacta. Las partes básicas (existen más partes que dependen del cable) de la estructura de un cable son las siguientes:

- Elemento central de refuerzo: es la parte encargada de protegerla contra factores externos como aplastamientos, abrasión, etc, sin reducir sus características de transmisión. En el caso de cable aéreo, esta parte lleva un cable de acero que soporta el peso del cable de fibra entre postes.
- Fibras ópticas: el número de fibras ópticas es variado. En el caso de fibras monomodo puede tener una, dos, cuatro u ocho fibras. En el caso de fibras multimodo, si se tienen tubos para albergar estas fibras, puede tener 16, 32, 64 y 128 fibras. Estos tubos albergadores de fibras pueden estar en una o dos capas concéntricas alrededor del elemento central y el conjunto está lleno de petrolato. Puede observarse mejor en la Figura 15. Además cada fibra tiene una protección primaria, usualmente silicona o acrilato coloreada para identificar las fibras y una protección secundaria, que la puede preservar de la humedad que normalmente será silicona líquida.
- Cubierta: sirven para proteger los núcleos y puede ser de los siguientes tipos (entre otros que existen):
 - o PEAP: polietileno, estanco, aluminio y polietileno
 - o PKP: Polietileno, fibra de aramida y polietileno.
 - o PESP: Polietileno, estanco, acero y polietileno.

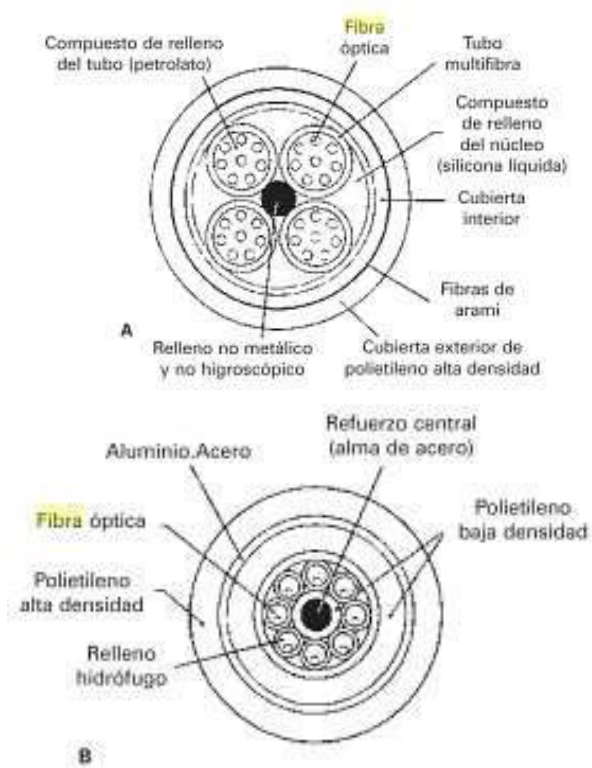
G. Modos de transmisión

Para poder transmitir una señal a través de una fibra óptica, se necesitan tres elementos básicos: una fuente de luz, la fibra como medio de transmisión y el receptor, encargado de detectar la luz. La señal dentro de la fibra puede propagarse por medio de reflexión y refracción. La forma que se propaga depende del modo de propagación y del perfil de índice de la fibra.

Un modo puede definirse como cada impulso de luz que se transmite a lo largo de la fibra, es decir, el camino. Por lo tanto si sólo existe una trayectoria por donde pueda pasar la luz del cable, la transmisión es llamada unimodal o monomodo. Ahora, si existen más trayectorias, se le conoce como modo múltiple o multimodal.

Por otra parte, como ya se mencionó, la transmisión en fibra óptica también depende del perfil de índice de la fibra. Este se puede definir como una representación gráfica del índice de refracción en una sección transversal de la fibra. Existen dos tipos de perfiles de índice: escalonados y graduados. Una fibra de índice escalonado se caracteriza por tener un índice de refracción uniforme en el núcleo central, rodeado de revestimiento externo también con índice de refracción uniforme, pero menor que el del núcleo central. Esto provoca un cambio abrupto en el índice de refracción entre núcleo y revestimiento. En una fibra de índice de perfil graduado, la fibra no tiene revestimiento, lo cual provoca que el índice de refracción del núcleo no sea uniforme; genera que el máximo índice de refracción se de en el centro y vaya disminuyendo cuando se acerca a la orilla externa.

Figura 15: A) Sección transversal de cable con cubierta PKP. B) Sección transversal de cable con cubierta PEAP o PESP.



Fuente: Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios. Pág. 99.

1. **Monomodo.** Solo existe la fibra monomodo de índice escalonado. Esta tiene un núcleo suficientemente pequeño para que solo exista una trayectoria que pueda seguir la luz para propagarse a lo largo del cable. El revestimiento utilizado más simple es el aire (cuyo índice de refracción es 1). Sin embargo, una clase más práctica es la que tiene revestimiento distinto al

aire. Esto hace que los cables sean más resistentes, pero también aumenta el ángulo crítico. Un ángulo crítico, al aumentarse hace que el ángulo de aceptación sea pequeño.

Con cualquier revestimiento, la fibra monomodo propaga la luz por medio de reflexión. Todos los rayos luminosos se propagan directamente por el núcleo y, como consecuencia, todos los rayos de luz siguen la misma trayectoria, o muy parecida, a lo largo del cable. Se da el caso de transmisión monomodo cuando el diámetro del núcleo es similar a la longitud de onda de luz que se transmite, porque sólo un rayo puede viajar a través de ella.

Existen varias ventajas que tienen las fibras monomodo de índice escalonado, como por ejemplo: existe dispersión mínima debido a la duración de los rayos en recorrer el cable, por ser tiempos tan parecidos, un pulso de luz en la entrada puede reproducirse con mucha exactitud en el receptor. También son posibles mayores anchos de banda y capacidades de transmisión por la gran exactitud de reproducción de los pulsos transmitidos en el extremo de recepción.

Dentro las desventajas se pueden mencionar el costo y la dificultad de fabricación, así como la dificultad de acoplar la luz hacia adentro y hacia afuera de la fibra por su núcleo reducido. También como consecuencia del núcleo, es necesario que la fuente de luz sea concentrada.

Figura 16: Fibra óptica monomodo (núcleo entre 5 y 10 μm , revestimiento de 125 μm).



Fuente: Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios. Pág. 98.

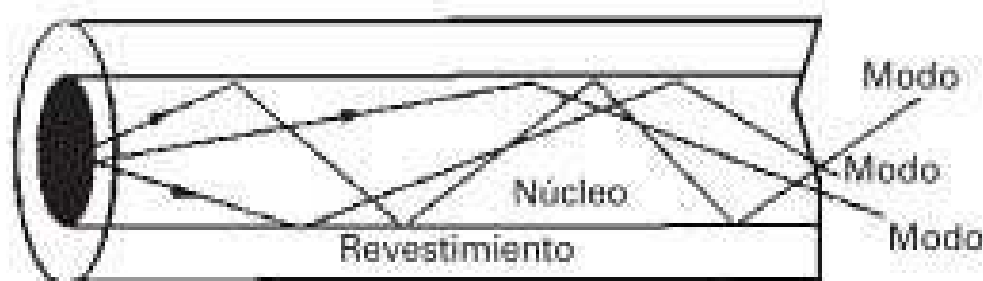
2. **Multimodo.** Para que la luz se transmita de esta manera, es necesario que el diámetro de la fibra óptica sea mayor a la longitud de onda del rayo de luz que se está transmitiendo. De esta manera la señal puede entrar a la fibra con diferentes ángulos, y se refracta innumerables veces, por todo el camino, hasta el otro extremo. Son utilizadas para enlaces de corta distancia y donde no se requiera excesiva velocidad ni capacidad. Se pueden dividir en dos tipos: multimodo de índice escalonado y multimodo de índice gradual.

a. **Multimodo de índice escalonado.** Es parecida al monomodo, pero con núcleo mucho mayor. Por la abertura grande es posible la entrada de más luz al cable. Así, los rayos luminosos forman un ángulo mayor que el crítico por lo que se va reflejando a lo largo de la fibra, hasta el receptor. Los rayos luminosos que llegan con un ángulo menor que el crítico y que

entran al revestimiento, se pierden. Debido a que los rayos de luz no siguen la misma trayectoria, los tiempos para recorrer la fibra son diferentes.

Dentro de las ventajas que tiene este tipo de transmisión, se encuentra el costo relativamente bajo (comparado con las monomodo) y su fabricación simple. Además se puede acoplar fácilmente la luz, hacia adentro y hacia afuera. Por otra parte, dentro de las desventajas que presenta, se encuentra la distorsión, causada por los distintos tiempos de propagación. También el ancho de banda y la capacidad de transferencia se ve disminuida, en comparación con la transmisión monomodo.

Figura 17: Fibra óptica multimodo de índice escalonado (núcleo de 50 a 62.5 μm y revestimiento de 125 μm)

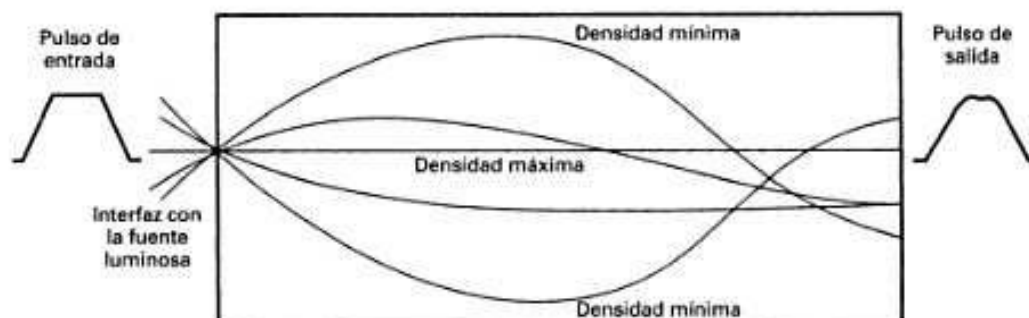


Fuente: Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios. Pág. 98.

b. Multimodo de índice gradual. Estas fibras tienen un índice de refracción que no es uniforme en el núcleo; el máximo se da en el centro y va disminuyendo conforme nos acercamos a la orilla. También se propaga por medio de la refracción. La luz que entra a la fibra (con variados ángulos) se propaga a lo largo de la fibra. Debido a la variación de ángulos de entrada, los rayos que viajan en la parte más externa de la fibra, recorren mayor distancia que los que van en el centro, como puede observarse en la Figura 18. Asimismo, los rayos que van más alejados del centro se propagan con mayor velocidad, ya que el índice de refracción es menor y este es inversamente proporcional a la velocidad. De esta manera, los rayos que se propagan cerca del centro y los que se propagan alejados del centro, se tardan aproximadamente los mismos tiempos en recorrer la longitud de la fibra.

Este tipo de fibras puede definirse como un tipo de fibra intermedio entre la monomodo y multimodo de índice escalonado. Por ejemplo, la distorsión debida a trayectorias múltiples de propagación es mayor que en las fibras monomodo pero menores que en las fibras multimodo de índice escalonado. Y así sucede de igual manera con otros aspectos, como el acoplamiento de la luz que entra y sale, su costo y su proceso de fabricación.

Figura 18: Fibra óptica multimodo de índice gradual.



Fuente: Sistemas de comunicaciones electrónicas. Pág. 435.

H. Ventajas y desventajas del uso de fibra óptica

Las comunicaciones a través de cables de fibra óptica tienen ventajas abrumadoras contra las comunicaciones que utilizan cable metálico o coaxial, pero de igual manera, tiene algunas desventajas, que varían según el lugar de instalación o el país donde se está realizando la implementación (por cuestiones económicas, accesos, etc).

1. Ventajas

- Mayor capacidad de información: los sistemas de comunicaciones con fibras ópticas tienen mayor capacidad de información que los cables metálicos, debido a los anchos de banda, logrando ser mayores con las frecuencias ópticas.
- Inmune a la diafonía: las fibras no se ven afectadas por diafonía entre cables vecinos, debido a la inducción magnética. Las fibras no son cables metálicos, por lo que se evita la inducción magnética (principal causa de la diafonía).
- Inmune a las condiciones ambientales: son resistentes a la variación de condiciones ambientales, funcionando correctamente, por ejemplo, en altas temperaturas. También son menos afectados por líquidos y gases corrosivos.
- Inmune a la interferencia por estática: la fibra óptica funciona correctamente frente a la interferencia electromagnética provocada por rayos, motores, luces fluorescentes y cualquier sistema que genere ruido eléctrico. Como ya se mencionó, la fibra no conduce electricidad, por lo que estos factores no la afectan.
- Las fibras ópticas presentan atenuación muy baja, por lo que los repetidores se encuentran separados por grandes distancias.

- Seguridad para instalaciones y mantenimientos: las fibras no son conductoras, por lo que no presentan corrientes ni voltajes, factores que pueden afectar a la persona o al lugar donde se realiza la instalación/mantenimiento.
- El tamaño y flexibilidad proporcionan gran versatilidad en la construcción de redes con fibra óptica. También son más ligeras, por lo que incrementa su facilidad de trabajo.
- Difícil de interceptar, ya que no existe ningún fenómeno no inductivo de la luz en el material que sirve de soporte de la señal telefónica, lo cual hace imposible intervenir el sistema sin ser detectado.
- Expansión: los sistemas de fibra óptica están bien diseñados para expansiones fácilmente, el cable de fibra óptica puede ser el mismo y se puede incrementar la velocidad de transmisión.

2. Desventajas

- El costo para la conexión de fibra óptica es elevado, ya que no se cobra el tiempo de utilización, sino por cantidad de información transferida.
- El costo de instalación es elevado, al igual que el equipo necesario para implementar fibra óptica en una red.
- Las fibras ópticas tienen una resistencia bastante menor a la tensión que los cables coaxiales. Se puede mejorar recubriendo la fibra con Kevlar y una protección de PVC.
- Herramientas, equipo y personal especializado: las fibras ópticas requieren herramientas especiales para realizar reparaciones y empalmes. También es necesario equipos especiales de prueba para hacer medidas, debido a estas singularidades, el personal que realiza estas actividades debe ser capacitado.

V. TECNOLOGÍA DWDM

A. Introducción

Las ciudades, hoy en día, están conectadas por una combinación de conexiones guiadas y no guiadas, por ejemplo, con microondas, cables coaxiales, fibras ópticas, satélites, entre otros. Sin embargo, por la alta demanda de ancho de banda por las telecomunicaciones avanzadas y la alta demanda de intercambio de datos, es necesaria una evolución flexible y económica en las redes. Según Meza (2009:2):

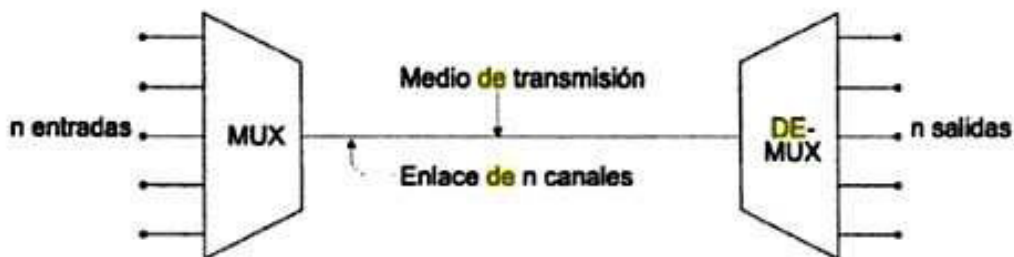
«La demanda de capacidad de transporte en el entorno metropolitano es cada vez mayor, debido a la introducción de servicios y aplicaciones con gran consumo de ancho de banda (internet de banda ancha, vídeo bajo demanda, redes de almacenamiento, etc.). Esta necesidad de ancho de banda en la red metropolitana suscitó hace unos años un gran interés en los sistemas DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), pues además la transparencia inherente a esta tecnología se adapta muy bien a este entorno, caracterizado por la necesidad de integrar una gran diversidad de clientes, servicios y protocolos.»

1. **Multiplexación.** La multiplexación es una técnica que permite que varias conexiones o múltiples flujos de información compartan un único medio de transmisión. La principal ventaja de esta técnica es que optimiza la utilización del medio de transmisión, que generalmente, es de alto costo.

En la Figura 19, se describe la función de multiplexación. Se tienen varias entradas en el transmisor conectadas a un multiplexor (MUX), el cual combina los datos para poder transmitirlos por un solo canal de transmisión. Luego, del lado del receptor, se tiene un demultiplexor (DEMUX) encargado de la función de recibir y separar los datos en varias salidas correspondientes. Existen varios tipos de multiplexación: por división de espacio, división de fase, división de tiempo, división de frecuencia y de longitud de onda. Los principales y más utilizados resultan ser los últimos tres mencionados.

a. **Técnicas de multiplexación.** El multiplexado por división de tiempo (TDM, de time-division multiplexing), por división de frecuencia (FDM, de frequency-division multiplexing) y el más reciente, por división de longitud de onda (WDM, de wavelength-division multiplexing), son los métodos más predominantes actualmente para multiplexar señales.

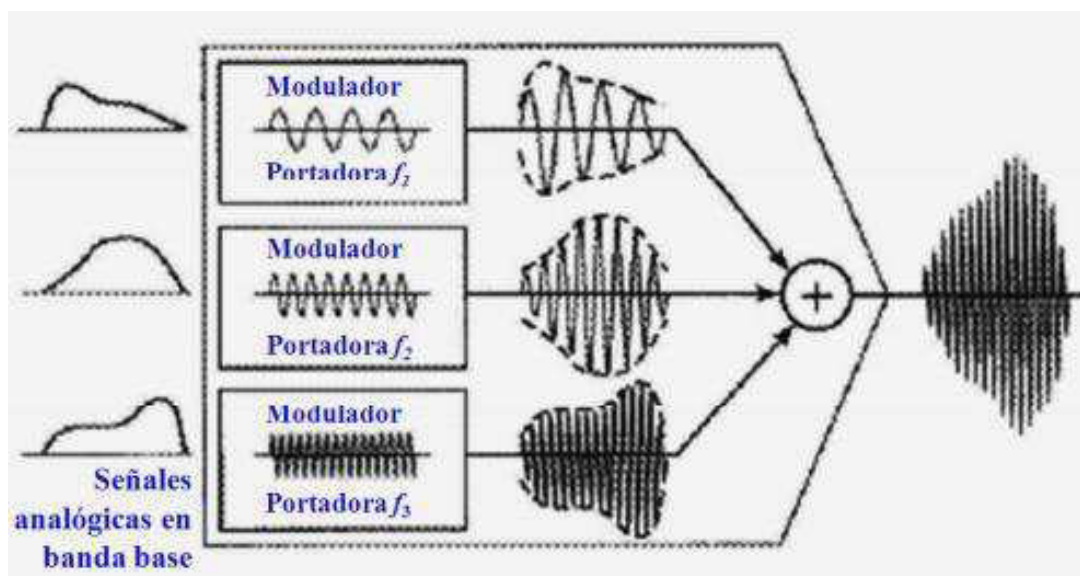
Figura 19: Proceso de multiplexación



Fuente: Análisis de los procesos básicos de un sistema de comunicaciones. Pág. 22.

1) Multiplexación por división de frecuencias. Esta es una técnica de multiplexación analógica que consiste en transmitir varias señales por un mismo medio, asignando una banda de frecuencias diferente para cada señal. Esta técnica permite transmitir simultáneamente si cada una de ellas se modula con señales portadoras de frecuencias distintas, como puede apreciarse en la Figura 20. También se requiere que las portadoras estén separadas entre sí, evitando interferencias. Estas señales con diferentes portadoras, se combinan formando una señal compuesta, que es la transmitida por el medio o canal de transmisión. Importante, también, es que se puede utilizar esta multiplexación cuando el ancho de banda útil del medio de transmisión supera el ancho de banda requerido por las señales a transmitir.

Figura 20: Proceso de multiplexación en FDM

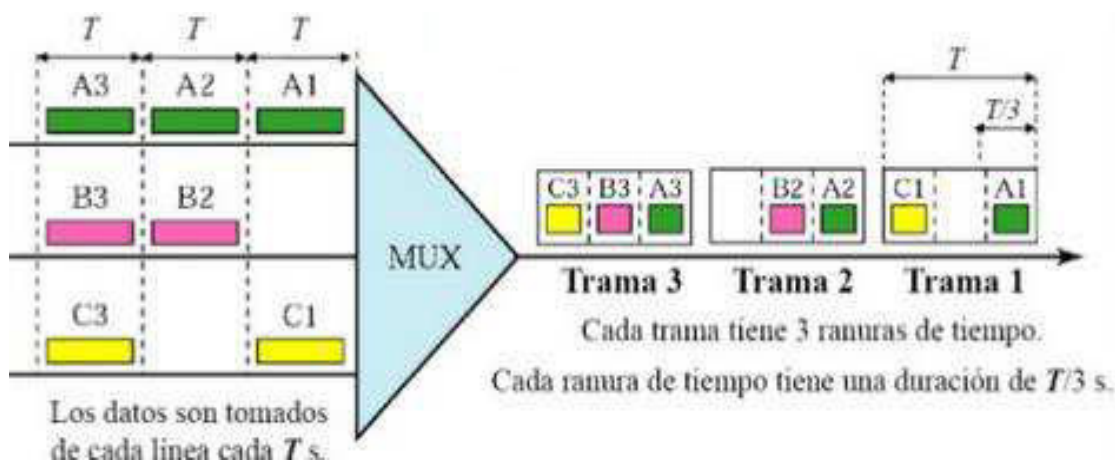


Fuente: http://www.coimbraweb.com/documentos/analogico/3.5_mux_fdm.pdf

2) Multiplexación por división de tiempo. Es la técnica de multiplexación digital que consiste en transmitir datos digitales provenientes de distintos emisores, por un mismo medio o canal de transmisión. Básicamente, se divide el enlace de datos en porciones de tiempo, y existe un control el cual indica cuando se transmite cada porción de tiempo. Este tipo de multiplexación se puede aplicar cuando la velocidad de transmisión máxima que soporta el medio físico es superior a la velocidad de transmisión de la suma de todas las señales digitales que se desean transmitir. Existen dos tipos básicos de multiplexación por división de tiempos: TDM síncrona y TDM asíncrona.

- Síncrona: la principal característica de esta tecnología es que el multiplexor siempre asigna la misma ranura de tiempo a cada dispositivo de manera exacta, tanto si el dispositivo tuviera o no, datos que transmitir. Cada vez que toca la porción de tiempo, el dispositivo tiene la oportunidad de enviar sus datos. Si el dispositivo no puede transmitir por alguna razón, o no tiene datos para enviar, la porción de tiempo permanecerá vacía. El ejemplo de la Figura 21, describe perfectamente este tipo de multiplexación, enviando cada porción de tiempo correspondiente, con presencia o ausencia de información.
- Asíncrona: Al contrario de la síncrona, esta técnica sólo envía la ranura de tiempo que lleva datos de información, por esta razón, esta técnica resulta más eficiente, ya que no malgasta la capacidad de la línea de transmisión con ranuras de tiempo sin información.

Figura 21: Proceso de multiplexación TDM síncrona.



Fuente: <http://www.slideshare.net/edisoncoimbra/44-multiplexacion-tdm-7031366>

3) Multiplexación por división de longitud de onda. Es una técnica de multiplexación analógica que consiste en transmitir varias señales luminosas sobre un mismo enlace de fibra óptica. Como la longitud de onda y la frecuencia se relacionan de forma estrecha,

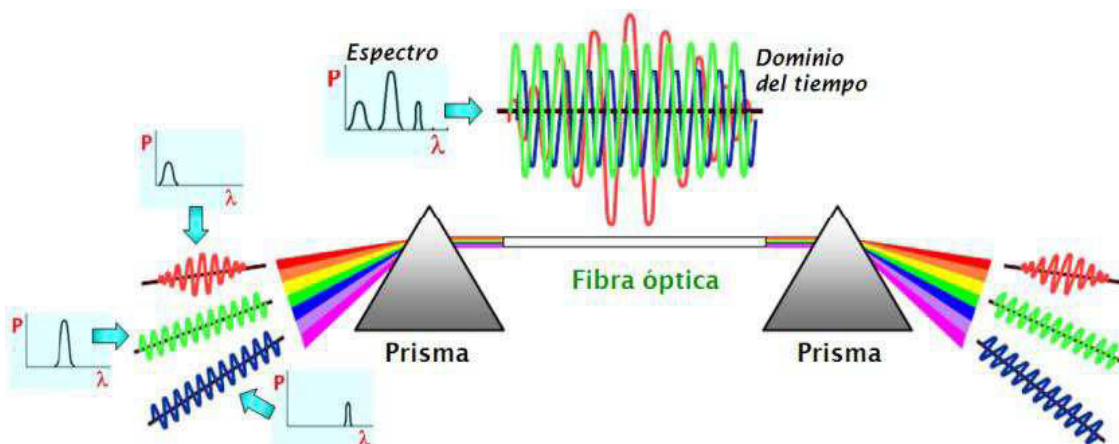
esta técnica se parece a la multiplexación por división de frecuencia. Ambas combinan señales con frecuencias distintas, pero en WDM las frecuencias de las señales son muy altas comparadas con las que se utilizan en FDM. Otra diferencia importante es que WDM tiene una portadora óptica (descrita típicamente por su longitud de onda) mientras que FDM generalmente se emplea para referirse a una portadora de radiofrecuencia.

El WDM acopla la luz de dos o más longitudes de onda discretas para que entren y salgan de una fibra óptica. Cada longitud de onda puede llevar grandes cantidades de información, analógica y digital, y hasta puede transmitir información ya multiplexada por división de tiempo o frecuencia. Los primeros sistemas WDM aparecieron en torno a 1985 y combinaban tan sólo dos señales. Los sistemas modernos pueden soportar hasta 160 señales y expandir un sistema de fibra de 10 Gbps hasta una capacidad total de 25.6 Tbps sobre un solo par de fibra.

B. Técnicas de multiplexación por división de longitud de onda

La idea de la técnica WDM es muy simple: combinar varias ondas de luz dentro de una única luz en el multiplexor y hacer el proceso inverso en el demultiplexor, es decir, convertir una única luz en varias ondas de luz. Este proceso puede simplificarse en la función de un prisma como se ve en la Figura 22.

Figura 22: Técnica de multiplexación WDM



Fuente: http://www.coimbraweb.com/documentos/opticas/8.8_wdm.pdf

Por la física básica de un prisma, puede establecerse que pueden ingresar a él distintas señales, variando su ángulo de incidencia y la frecuencia. De esta manera el prisma funciona como un multiplexor, ya que combina los distintos haces de luz de entrada, que contienen una banda estrecha de frecuencia, en un único haz de salida con banda de frecuencia más ancha. Según Huidobro (2006:365):

«Los sistemas de comunicación que utilizan como medio de transmisión una fibra óptica se basan en inyectar en un extremo de la misma, la señal a transmitir (previamente la señal eléctrica procedente del emisor se ha convertido en óptica mediante un LED o Láser) que llega al extremo receptor, atenuada y, probablemente, con alguna distorsión debido a la dispersión cromática propia de la fibra, donde se recibe en un foto detector, es decodificada y convertida en eléctrica para su lectura por el receptor.»

La madurez de la tecnología WDM ha permitido conseguir sistemas adaptados específicamente al entorno metropolitano con anchos de banda más altos y con costos relativamente bajos. Dentro de la familia de tecnologías WDM, se encuentran: Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM) y Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM), siendo las principales y más utilizadas.

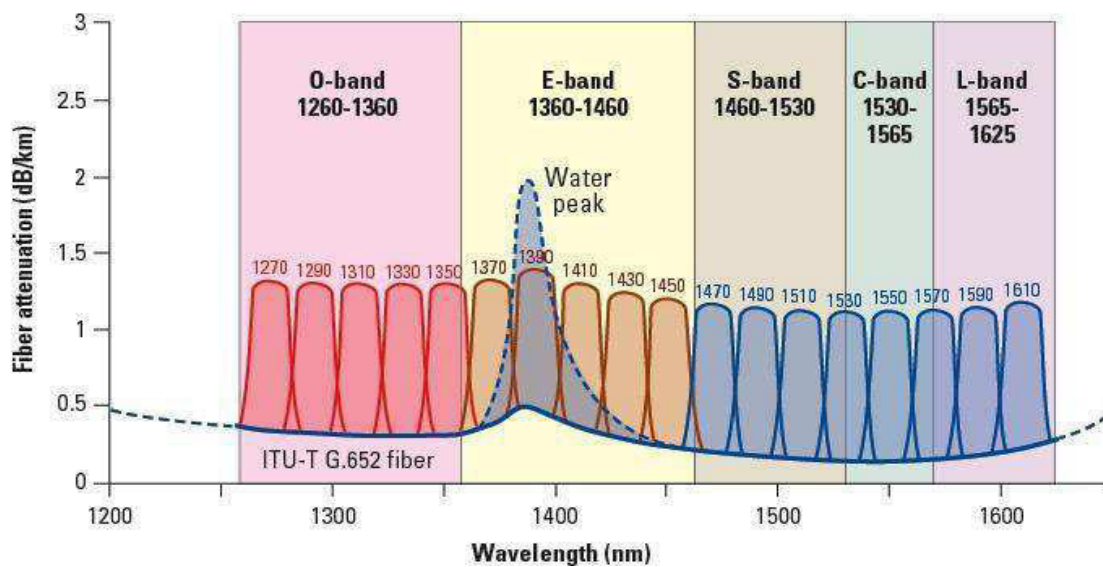
1. **CWDM.** Significa Multiplexación por división en longitudes de onda ligeras, por sus siglas en inglés. Es un tipo de multiplexación por longitud de onda que tuvo sus inicios en los años 80 para transportar señales de video en conductores de fibra multimodo.

La ITU-T (International Telecommunication Union – Telecommunication sector) es la encargada de estandarizar parámetros en las redes de telecomunicaciones. Para el caso de los sistemas CWDM, por la norma ITU-T G.694.2, la separación entre longitudes de onda debe ser de 20 nm (o 2500 GHz), en el rango de 1270 a 1610 nm. Por esta razón, solo puede transportarse hasta 18 longitudes de onda en una fibra óptica monomodo (ver Figura 23). Estos espaciamientos amplios, relativamente, permite a la tecnología CWDM utilizar láseres (o dispositivos de transmisión) con un mayor ancho de banda espectral, es decir, que la onda central no tiene que ser exacta ni tan sofisticada, pues una variación no es tan crítica como en la tecnología DWDM, donde los espaciamientos son menores.

CWDM presenta otras ventajas, como la facilidad en cuanto a diseño de red, implementación y operación. Esta tecnología trabaja con pocos parámetros que necesiten la optimización por parte del usuario, en comparación con DWDM que requiere compleja precisión en los cálculos de balance de potencias por canal. Las aplicaciones de sistemas CWDM apuntan a aquellas donde la distancia de fibra es menor a 50 Km, y no requiere amplificación óptica. La principal limitación que presenta esta tecnología, entre otras, es la menor capacidad soportada. Por lo que si se desea una expansión, un mayor ancho de banda o velocidad de transmisión, es necesario utilizar la tecnología DWDM.

2. **DWDM.** Significa multiplexación por división de longitudes de onda densas, por sus siglas en inglés. Resulta el modo más eficiente de transporte por fibra óptica de señales digitales, logrando un gran ancho de banda (hasta 2.5 Gbps, 10 Gbps, 40 Gbps, 100Gbps e incluso hasta 400Gbps).

Figura 23: Longitudes de onda para tecnología CWDM especificada por ITU-T G.694.2

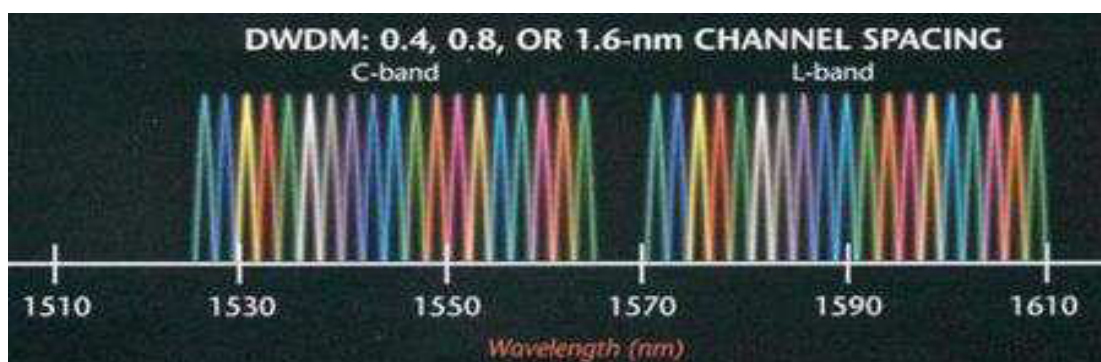


En DWDM se consigue mayor número de canales ópticos reduciendo la dispersión cromática de cada canal ya sea usando un láser de mayor calidad, fibras de baja dispersión o usando módulos DCM (Dispersion Compensation Modules). De esta forma es posible combinar más canales reduciendo el espacio entre ellos. Se puede llegar a conseguir 40, 80 o 160 canales ópticos separados entre sí por 100 GHz, 50 GHz o 25 GHz, respectivamente. Puede apreciarse en la Figura 24.

Es importante mencionar también algunas ventajas que tienen los sistemas DWDM:

- El campo de aplicación de DWDM es para redes de larga distancia de banda ultra-ancha, así como redes metropolitanas o interurbanas de alta velocidad.
- Debido a su alto y progresivo crecimiento, el costo de los equipos ha ido bajando.
- Es una tecnología que permite seguir expandiéndose. Se tenían 40 canales (espaciado de 100 GHz) y 80 canales (espaciado de 50 GHz), y ya se implementan sistemas capaces de llevar 128 canales.

Figura 24: Longitudes de onda para tecnología DWDM



C. Redes ópticas DWDM

A principios de los 1980s, se logró incrementar la tasa de bits (bit-rate) utilizando la tecnología de multiplexación por división de tiempo (TDM). Con TDM la capacidad de una simple fibra óptica se pudo incrementar, al dividir el tiempo en intervalos más pequeños. Sin embargo, en estos sistemas, en el canal de transmisión únicamente puede transportarse una sola señal. Poco a poco, TDM fue demostrando que estaba limitada y que necesitaban otra tecnología para incrementar la transmisión de datos.

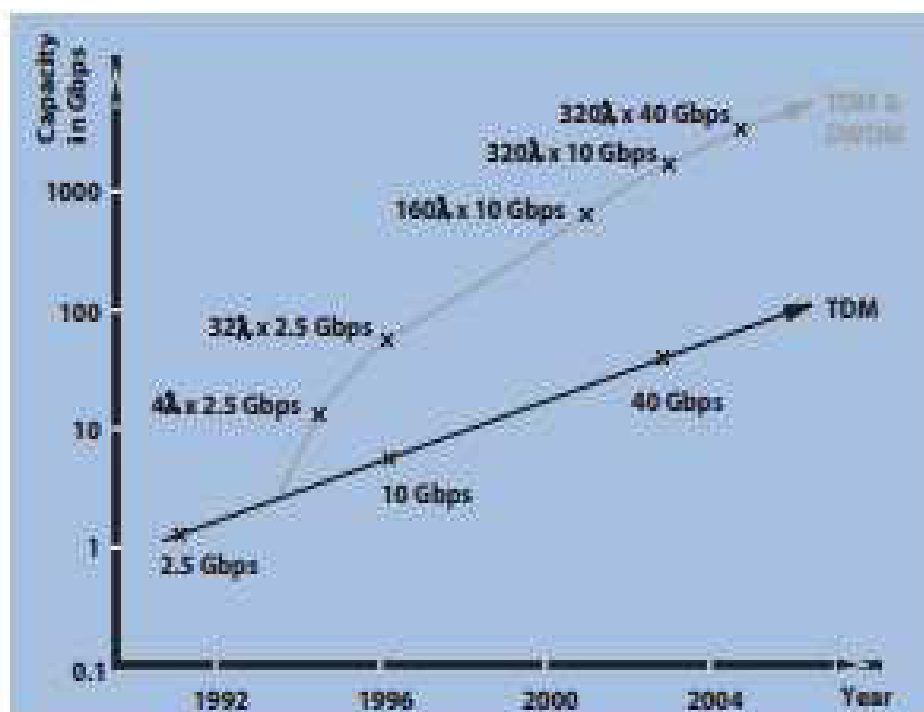
La multiplexación por división de onda (WDM) podía transmitir múltiples señales simultáneamente variando la longitud de onda, que resultó siendo una alternativa más fiable, para futuras y constantes expansiones. La primera red utilizando tecnología WDM se dio a finales de 1982, señales multiplexadas de dos láseres de diferentes longitudes de onda (tecnología ahora referida a CWDM). La desventaja de esta técnica fue que la señal multiplexada debía ser separada cada vez antes de ser regenerada eléctricamente. Hoy en día CWDM (con espaciamiento entre señales de 20 nm), se está usando para transmisiones de cortas longitudes donde no se requiera regeneración. Puede transmitir 18 canales entre 1270 y 1610 nm, haciéndola una solución costo-efectiva.

Con el pasar de los años, para incrementar el número de servicios (ancho de banda), notaron que el espaciamiento entre canales podía ser más próximo (por ejemplo un espaciamiento de 0.8 nm). A esta tecnología con canales más cercanos, se le llamó DWDM. Esta tecnología logró incrementar la capacidad de transporte a través de la utilización de fibras y equipos terminales que existían.

Siempre existió el debate de cuál es la mejor tecnología entre WDM y TDM para expansiones de las existentes redes de fibra, por lo que se aprovecharon ambas tecnologías y se combinaron, para brindar la flexibilidad y capacidad para futuros requerimientos. En la Figura 25, se aprecia una gráfica donde se muestra el aumento de la capacidad al utilizar estas tecnologías combinadas con el pasar de los años.

1. **Funcionamiento.** El funcionamiento de la tecnología DWDM básicamente consiste en la forma de transmisión descrito en WDM, combinando varias ondas de luz dentro de una única luz en multiplexor. En DWDM solo se establece que la separación entre los canales de transmisión puede ser de 200, 100, 50 o 25 GHz, por lo que pueden existir 128 canales diferentes para la transmisión de datos, permitiendo así transmitir a distancias de miles de kilómetros con las amplificaciones y regeneraciones necesarias.

Figura 25: Capacidad de los sistemas TDM y TDM+DWDM



Fuente: Dense Wavelength Division Multiplexing. Pág. 11.

El medio de transmisión utilizado en DWDM es la fibra óptica y específicamente, de tipo monomodo. Este tipo de fibra, soporta mayores anchos de banda que el resto de medios de transmisión de señales existentes, además de presentar otras ventajas: baja atenuación, fácil instalación, posibilidad de integración, alta seguridad de la señal, inmunidad a interferencias electromagnéticas, entre otras. El tipo de fibra óptica óptima para trabajar con esta tecnología es la NZDF (Non Zero Dispersion Shifted Fibre), pero con canales de 2.5 Gbps, la fibra SMF (Standard Single Mode Fibre) se adapta perfectamente, es más económica y la más utilizada.

2. **Características.** La principal característica de la tecnología DWDM es el alto ancho de banda que ofrece. Los sistemas DWDM para largas distancias disponibles en la actualidad soportan hasta 1.6 Tbps (160 longitudes de onda a 10 Gbps). Otra característica importante es su transparencia, es decir, en cada una de sus longitudes de onda se pueden diferenciar distintas tasas de bit y protocolos de las capas superiores, o incluso señales previamente multiplexadas en el tiempo. Con esto se quiere resaltar la facilidad de acoplamiento que tienen algunas tecnologías a DWDM. Por otro lado, aunque los sistemas DWDM son relativamente caros debido a la necesidad de componentes ópticos avanzados, equipamiento y fibras, presenta una reducción de costos en sus inversiones y en su mantenimiento.

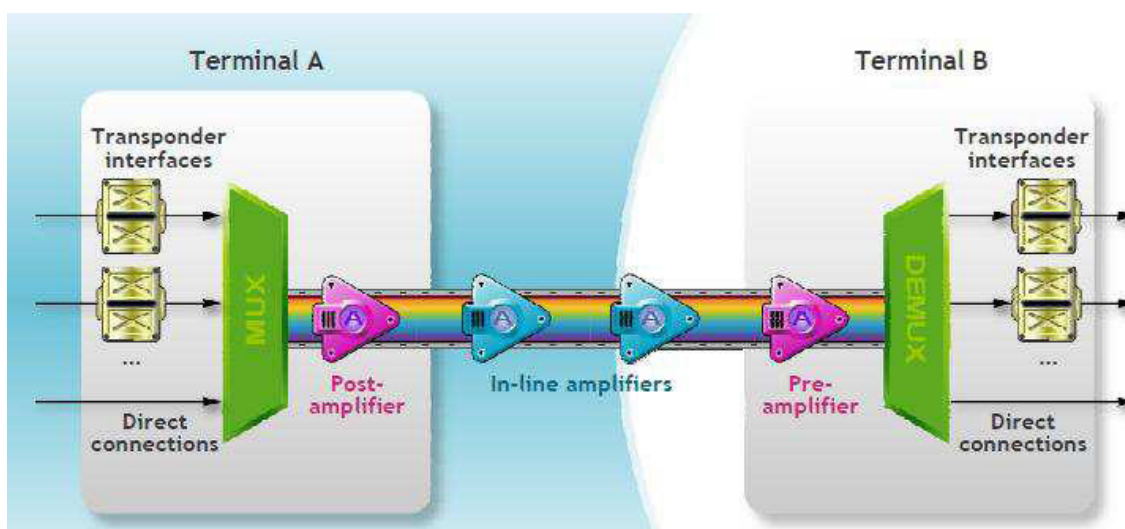
El campo de aplicación de DWDM se encuentra en redes de larga distancia, así como en redes metropolitanas de muy alta velocidad. Su costo es alto, pero con el crecimiento de la implantación de esta tecnología, ha ido disminuyendo progresivamente.

3. **Arquitectura de DWDM.** El modelo OSI (Open system Interconnection) es un marco de referencia para la definición de arquitecturas en la interconexión de los sistemas de comunicaciones. Aplicando este modelo a las redes DWDM, se puede definir que la arquitectura de esta tecnología trabaja a nivel de la capa física, es decir, que permite el intercambio de las unidades básicas de información sobre canales de transmisión.

Una red óptica usando la técnica de multiplexación DWDM consiste de cinco principales componentes: transmisor, multiplexor/demultiplexor, amplificadores, fibra óptica y el receptor. Estos se representan en la Figura 26.

a. **Transmisor.** La principal función del transmisor es cambiar los bits de la señal eléctrica a pulsos ópticos. El transponder (encargado de la transmisión) genera una señal con la información a transmitir con una longitud de onda predefinida, según estándar de la ITU-T.

Figura 26: Componentes de una red óptica DWDM



Fuente: Transmission Networks – WDM Technology – Fundamentals. Pág. 26.

Un transmisor de canal único típicamente consiste de un láser de alta potencia seguido de un modulador. La modulación directa del láser es común hasta 2.5Gbps. Para tasas de transmisión más altas, se necesita un modulador externo. En redes con espaciado denso entre canales, se necesita que la temperatura del transponder sea estabilizada y esto se puede lograr utilizando enfriadores termo-eléctricos.

b. **Multiplexor y demultiplexor.** La principal función de estos componentes es combinar, para multiplexores, y separar, para demultiplexores, longitudes de onda discretas en cada transmisor o receptor. Como los sistemas DWDM envían señales de diferentes fuentes por una fibra óptica, debe existir un componente encargado de combinar estas distintas señales, esta función es realizada por el multiplexor. Del lado del receptor, es necesario que exista un componente que separe la señal óptica y así poder ser discretamente detectadas. Los demultiplexores realizan esta función, separando el único haz recibido en varias longitudes de onda y acoplándolas a fibras individuales. En sistemas bidireccionales, un componente puede hacer ambos procedimientos.

Los multiplexores y demultiplexores pueden tener diseños activos o pasivos. Los diseños pasivos están basados en prismas, rejillas de difracción o filtros, mientras que diseños activos combinan dispositivos pasivos con filtros sintonizables. Los principales retos de estos dispositivos es minimizar el cross-talk (medida de qué tan bien separados están los canales) y maximizar la separación de canales (poder distinguir cada longitud de onda).

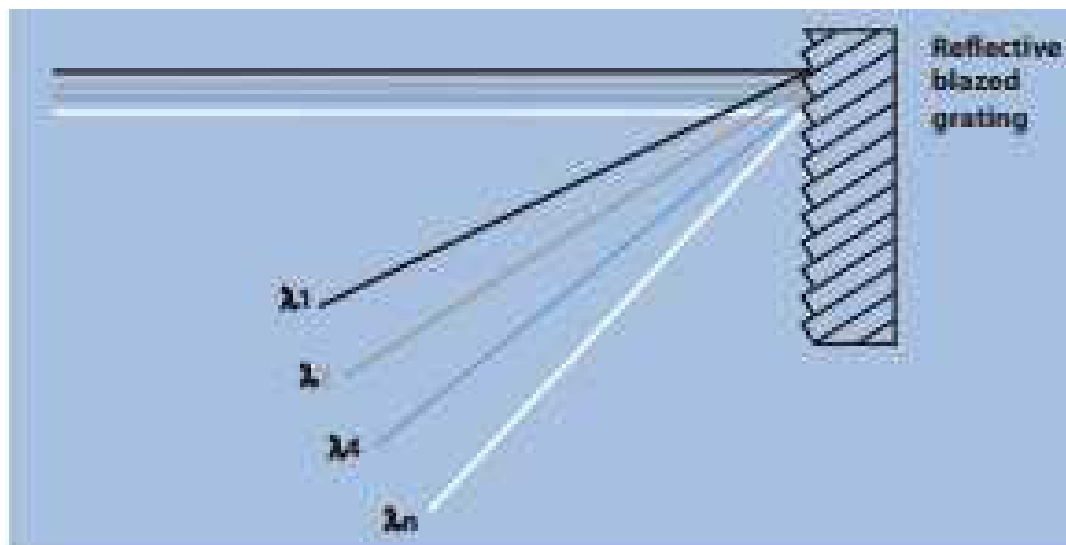
1) **Multiplexor.** Los multiplexores son utilizados en las redes DWDM para combinar las señales a diferentes longitudes de onda en un mismo haz que será transportado por una fibra única. Cada longitud de onda lleva su propia información y representa un canal.

Los multiplexores operan mediante el aumento de la capacidad de transmisión de una fibra variando técnicas y tecnologías de fuentes de emisión de luz. La multiplexación es comúnmente utilizada en redes de telefonía, transmisión de video, radiodifusión digital y radiodifusión analógica. El uso de un multiplexor óptico también permite que los datos sean enviados a mayores distancias, de forma más seguras y sin interferencias electromagnéticas y de radio frecuencia.

2) **Demultiplexor.** Los demultiplexores separan canales multiplexados antes de entrar a sus receptores correspondientes. Trabajan de manera similar con los multiplexores, pero de forma inversa.

Es común preamplificar las señales ópticas antes de ser separadas en los filtros ópticos del demultiplexor. El desempeño de un multiplexor o demultiplexor está relacionado con la capacidad de filtrar cada señal entrante. La parrilla Bragg es la técnica más popular actualmente utilizada para demultiplexar señales en sistemas de DWDM, puede observarse su funcionamiento en la Figura 27.

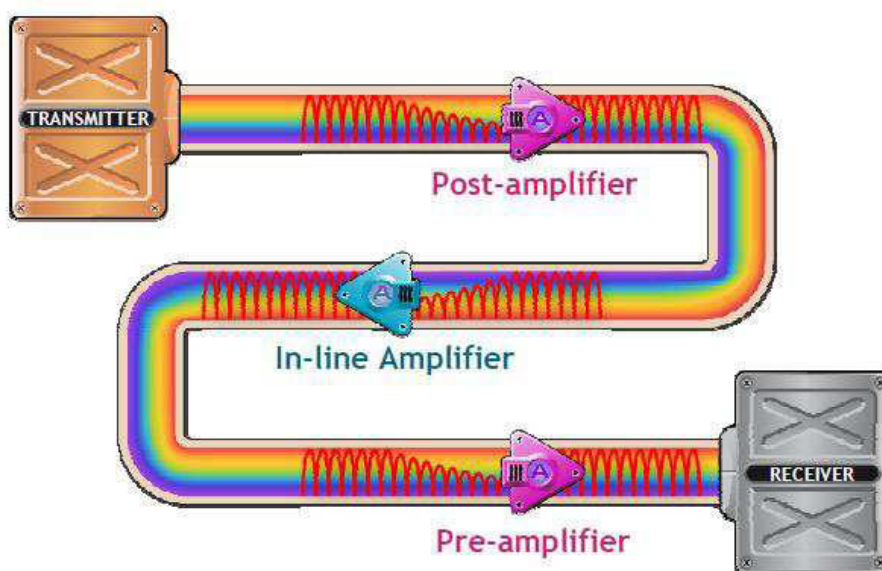
Figura 27: La parrilla Bragg (método de demultiplexación óptica).



Fuente: JDSU Pocket Guide – Dense Wavelength Division Multiplexing

c. Amplificadores. Debido a la atenuación que sufre la señal cuando viaja por la fibra, la distancia que puede alcanzar la señal con potencia suficiente para ser detectada correctamente, del lado del receptor, está limitada. Los amplificadores se usan para aumentar señales que viajan por una fibra óptica y han sido atenuadas, con el fin de mejorar la señal de llegada en el receptor y lograr cubrir mayores distancias. Los tres principales tipos de amplificadores pueden observarse en la Figura 28.

Figura 28: Amplificadores en una red DWDM



Fuente: Transmission Networks – WDM Technology – Fundamentals. Pág. 29.

Un amplificador óptico puede considerarse como un laser especial que refuerza directamente la intensidad de la señal óptica sin necesidad de hacer conversión eléctrica. Los dos parámetros que es importante que se controlen son la ganancia y la figura de ruido.

1) Post-amplificador. Son colocados directamente después del transmisor óptico. Este amplificador requiere utilizar la señal de entrada y amplificar esta señal a su máximo nivel de salida. El ruido agregado por el amplificador en este punto no es crítico porque la señal de entrada tiene un alto SNR (signal-to-noise ratio). Este tipo de amplificadores pueden también ser referidos como:

- Amplificadores de potencia
- Boosters
- Amplificadores Booster

2) Amplificador en línea. Son también conocidos como repetidores. Modifican una pequeña señal de entrada al amplificador y la impulsan para su retransmisión por la fibra. Controlando el pequeño rendimiento de la señal y el ruido añadido por el amplificador anterior, se reduce el riesgo de limitar la longitud de un sistema debido al ruido producido por los componentes de los amplificadores.

3) Pre-amplificador. Colocando un amplificador de señal justo antes del receptor nos garantiza tener una señal que aliviana las demandas en el receptor. Sin embargo, hay que tener extrema atención con el ruido agregado por esta amplificación. El ruido agregado debe ser mínimo para maximizar el SNR recibido.

d. Fibra óptica (canal de transmisión). Es un componente crítico en un sistema DWDM debido a que nos da el medio físico de transporte de la información. Las señales de carácter óptico viajan a través de este medio, como fue descrito en el capítulo anterior.

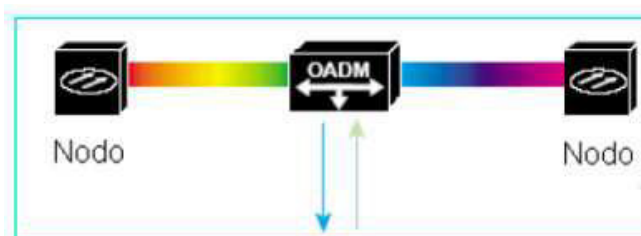
e. Receptor. Son un componente importante dentro de la red óptica DWDM ya que convierten señales ópticas a señales eléctricas. Los pulsos de luz transmitidos en las fibras ópticas son recibidos por un equipo sensible a la luz conocido como un foto-diodo, hecho de un material semiconductor. El tipo de foto-diodo a utilizar varía según la sensibilidad del receptor y según la tasa de bits que está siendo transmitida.

4. Topologías de redes DWDM. DWDM se ha diseñado para aplicaciones en redes de transporte con alcances de varios cientos a miles kilómetros de distancia sin regeneración. Según la necesidad, se dispone de topologías punto a punto, en anillo y malla.

a. Punto a punto. En los enlaces punto a punto, como puede observarse en la Figura 29, se presenta la versión más sencilla de topología, ya que es una conexión entre un transmisor y un receptor (la transmisión puede ser bidireccional). Algunas de las características a resaltar de este tipo de topología según Coimbra (2011:5) son:

- «La fibra y el tráfico son lineales, utilizando, o no, un multiplexor óptico OADM.
- Son de alta velocidad, actualmente hasta 160 Gbps. Pueden cubrir varios cientos de kilómetros, con menos de 10 amplificadores.
- En los equipos, la redundancia está a nivel del sistema. Los enlaces paralelos conectan sistemas redundantes a cualquier punto final.»

Figura 29: Topología punto a punto de una red DWDM con OADM.



Fuente: Multiplexación por división de longitud de onda WDM. Pág. 5.

b. En anillo. Los anillos son las topologías más comunes encontradas en áreas metropolitanas y en tramos de pocas decenas de kilómetros. Este tipo de topología permite a los nodos OADM proporcionar el acceso para conectar routers, switches o servidores, agregando o extrayendo canales en el dominio óptico. Puede apreciarse la topología en la Figura 30. En el tipo de anillos bidireccionales, el tráfico viaja desde el nodo de origen al nodo receptor por la mejor ruta o ruta más directa. Algunas de las características a resaltar de este tipo de topología según Coimbra (2011:6) son:

- «La fibra se instala en anillo. Los canales de tráfico se transmiten a través de los OADM hasta alcanzar su destino. Se usa en redes de acceso metropolitano.
- El anillo de fibra puede contener 4 canales con sus longitudes de onda respectivas. Es típico que existan menos nodos que canales.
- La velocidad de tráfico está en el rango de 622 Mbps a 10 Gbps por canal. Puede cubrir decenas de kilómetros sin amplificación.»

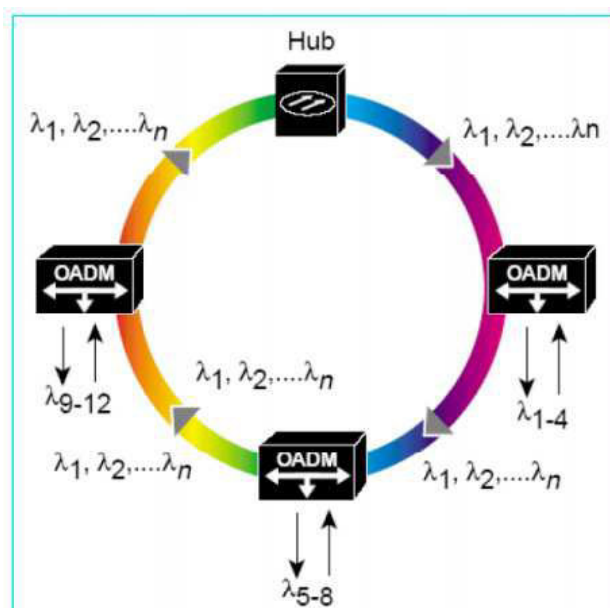
c. En malla. Según Coimbra (2011:7), se puede decir que este tipo de arquitectura consiste en lo siguiente:

«La arquitectura en malla es el futuro de las arquitecturas en redes ópticas. Durante su despliegue, abarcará a los anillos y a las arquitecturas punto a punto, gracias a la introducción de los OXC (Optical Cross-Connects) y switches configurables, que en

algunos casos reemplazarían, y en otros complementarían a los dispositivos DWDM fijos. Algunas de las características a resaltar de este tipo de topología son:

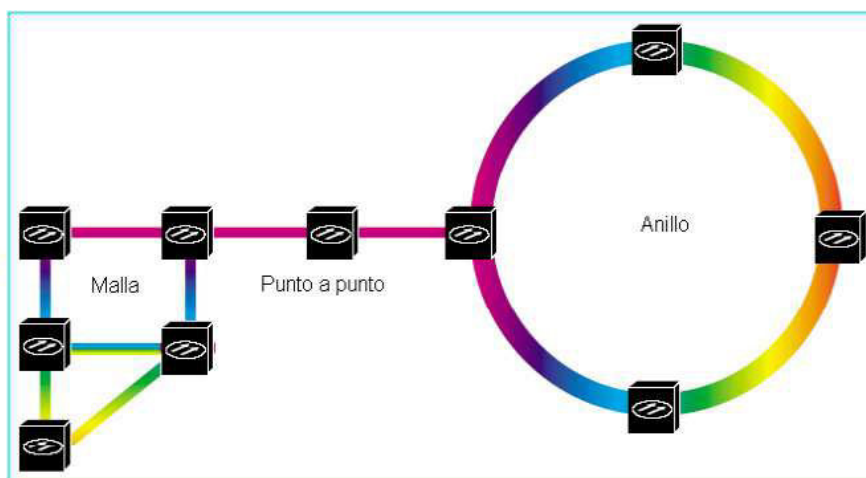
- Todos los nodos ópticos se interconectan entre sí. Se usan en redes de acceso metropolitano.
- Requiere esquemas de protección con redundancia al sistema, tarjeta o nivel de fibra. La redundancia en esta arquitectura emigrará a la redundancia por longitud de onda.»

Figura 30: Topología en anillo de una red DWDM



Fuente: Multiplexación por división de longitud de onda WDM. Pág. 6.

Figura 31: Red DWDM con los tres tipos de topologías



Fuente: Multiplexación por división de longitud de onda WDM. Pág. 7.

5. **Aplicaciones.** La tecnología DWDM pertenece a la capa física del modelo OSI, por lo que nos permite implementarla en cualquier tipo de red, solo es necesario montar una tecnología sobre esta capa física, en nuestro caso, DWDM. Su uso es principalmente en las redes de larga distancia, en las redes metropolitanas (MAN) y en las redes de almacenamiento (SAM).

Las redes de larga distancia (conocidas también como Long Haul) se encargan de interconectar otras redes de larga distancia o redes de área metropolitana. Este tipo de redes se utilizan para transmisión masiva de información en redes terrestres, estas distancias pueden ser desde los 300 a los 2500 kilómetros. Las longitudes de onda utilizadas en los sistemas DWDM de larga distancia tienen que estar dentro de la banda de los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA), que es en la tercera ventana de comunicaciones ópticas, de 1530 a 1625 nm. La tecnología DWDM presenta una gran solución para las empresas de telecomunicaciones, ya que con redes de larga distancia, como en este caso, para realizar expansiones es necesario modificar o agrandar el medio de transmisión, mientras que con esta red óptica, con instalación de equipos, en lugares estratégicos, es posible extender cobertura y aumentar el ancho de banda de la red, con la misma fibra anteriormente instalada. Cuando se diseña una red DWDM de larga distancia se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- El balance de potencia, la cual es la diferencia entre la potencia emitida por el transmisor y la mínima capaz de recibir el receptor.
- La dispersión de las longitudes de onda con la distancia recorrida, ya que puede generar solapamientos.
- Las no linealidades o espurios que pueden aparecer debido a la transmisión de altas potencias a través de la fibra.
- La ganancia óptima de los amplificadores ópticos o relación entre la potencia a su entrada y salida en el cual su curva de ganancia es más plana amplificando por igual a todos los canales.
- El ancho de banda de los amplificadores ópticos o rango de longitudes de onda susceptible de amplificar sin distorsión.

Las redes DWDM metropolitanas, a diferencia de las de larga distancia, se basan en arquitecturas en anillo, debido a sus necesidades de flexibilidad. La arquitectura en anillo posibilita, además, ofrecer a un precio muy económico la protección de canal y de línea. Las longitudes de onda utilizadas en las redes metropolitanas se extienden desde 1280 a 1625 nm, abarcando la segunda y tercera ventana de comunicaciones ópticas. Debido a que ocupa estas dos ventanas, se obtiene un mayor ancho de banda y a la vez, se pueden ocupar filtros ópticos menos complejos y menos costosos. Cuando se diseña una red DWDM metropolitana se debe tener en cuenta únicamente el balance de potencia, es decir, la diferencia entre la potencia

transmitida por el transponder de transmisión y el transponder de recepción correspondiente. También se debe tomar en cuenta todas las pérdidas asociadas a los filtros de extracción e inserción de canales por los que pasa el canal óptico en cuestión.

Por último, las redes de almacenamiento (SAN) se encuentran dentro de las redes metropolitanas. Se necesitan anchos de banda elevados, ya que en ellas se almacenan grandes cantidades de datos, por lo que DWDM es una gran tecnología para esta situación, ya que su ancho de banda puede seguir aumentando, cumpliendo las necesidades requeridas.

6. **Ventajas de la tecnología DWDM.** Una de las ventajas más importantes es la transparencia porque DWDM es una arquitectura de nivel físico lo que permite transportar cualquier formato de transmisión en cada canal óptico sin necesidad de utilizar una estructura común para la transmisión de señales; se utilizan diferentes longitudes de onda para enviar información síncrona o asíncrona, analógica o digital, a través de la misma fibra. El diseño de esta tecnología es transparente al formato y velocidad de transmisión de los datos. Por otra parte, según Pallo (2004:190).

«Desde la perspectiva técnica y económica, la posibilidad de suministrar potencialmente una capacidad de transmisión ilimitada es la ventaja más obvia de la tecnología DWDM. A medida que la demanda cambia, se puede añadir más capacidad, ya sea actualizando el equipamiento o aumentando el número de longitudes de onda de la fibra sin costo de actualización. Aparte del ancho de banda, las ventajas técnicas más convincentes del DWDM son las siguientes:

- Escalabilidad: el DWDM puede hacer que la abundancia de fibra en redes metropolitanas y redes empresariales, permita cubrir rápidamente los aumentos de demanda de ancho de banda de los enlaces punto a punto o de los anillos SONET/SDH actuales.
- Aprovisionamiento dinámico: el aprovisionamiento rápido, simple y dinámico de las conexiones de red dan a los proveedores la posibilidad de suministrar servicios de banda ancha en días en vez de meses.»

7. **Tecnologías sobre DWDM.** Existen gran cantidad de tecnologías para el transporte y la encapsulación de los datos en el mercado metropolitano. Una característica de estas redes es que ellos están llamados a apoyar una variedad de tipos y tasas de tráfico mayores y nuevas. En general, hoy en día, hay una tendencia hacia el uso de una capa óptica común para el transporte de datos.

a. **ATM.** Varios proveedores de servicios utilizan ATM (modo de transferencia asíncrono) porque puede encapsular diferentes protocolos y tipos de tráfico en un formato común para la transmisión sobre una infraestructura óptica. ATM se presenta en las redes MAN. Puede

acomodar interfaces de alta velocidad y suministrar la gestión de servicios de circuitos virtuales, mientras ofrece capacidades de gestión de tráfico.

El modo de transferencia asíncrono es una tecnología de enlace de conmutación rápida de paquetes de longitud fija y tiene la capacidad de transportar cualquier tipo de tráfico. Ésta es más eficiente que las tecnologías síncronas debido a su naturaleza síncrona, tales como TDM en la que se basa SONET/SDH.

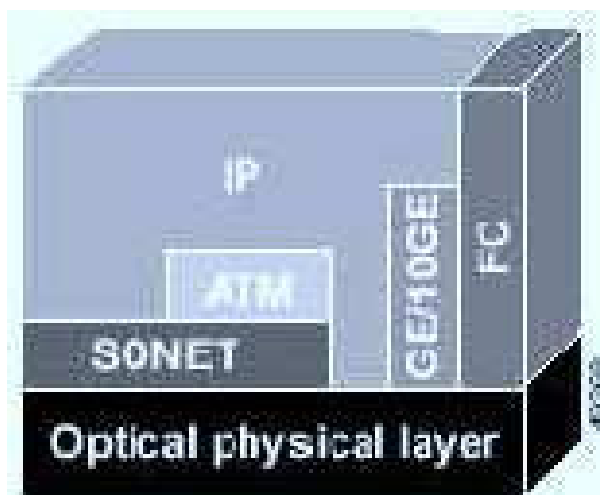
b. IP. La red IP/WDM es designada para transmitir tráfico IP en una red WDM, aprovechando las ventajas de ambos, la conectividad universal de IP y la masiva capacidad de ancho de banda de WDM. El motivo de combinar estas tecnologías es simplificar la infraestructura de red con un menor costo como consecuencia de menos elementos y menos fibra, más flexibilidad y estabilidad. Según Millán (2003:1):

«El desarrollo de IP y de WDM ha supuesto que la transición a un modelo de gigarouters IP conectados directamente sobre sistemas WDM sea una elección factible para algunas redes de transporte. No obstante, no es probable que sea la única opción, ya que las redes SONET/SDH y ATM están ampliamente desarrolladas e implantadas, y proporcionan varias características y servicios útiles.»

Algunos métodos para transportar paquetes IP sobre la red WDM son los siguientes (ver Figura 32):

- IP sobre ATM sobre SDH/SONET sobre DWDM
- IP sobre SDH/SONET sobre DWDM
- IP sobre Gigabit Ethernet sobre DWDM
- IP sobre DWDM robusto

Figura 32: Enlace de datos y protocolos de red por encima de capa óptica.



Fuente: Introduction to DWDM technology. Pág. 3.3.

c. GigabitEthernet. Es una tecnología que es relativamente económica comparada con otras tecnologías que ofrecen transmisión de datos, sin embargo, no provee una calidad excelente o no tiene tolerancias a fallos. Como su nombre lo dice, la característica principal es que consigue una capacidad de transmisión de 1 Gbps. Ethernet ofrece las ventajas técnicas de una tecnología adaptable, fiable y sencilla. Sus implementaciones son estándar y a un costo inferior que el SONET o ATM. Arquitecturalmente, la ventaja de esta tecnología es su potencial emergente para servir una solución escalable.

VI. DWDM EN GUATEMALA

A. Antecedentes, ¿qué había antes de DWDM?

En los años 80s las tecnologías de alta velocidad dominantes eran las llamadas jerarquías digitales no-síncronas referidas por PDH. En aquellos tiempos, el tráfico de voz era el abundante en las redes de telecomunicaciones. Sin embargo, con el pasar de los años siguió el crecimiento explosivo del tráfico de información a través de las redes, en su mayor parte por el internet, lo que ocasionó gran demanda de comunicación a altas velocidades. Es por eso que se crea el estándar SDH, tecnología que permite el transporte dominante en las redes metropolitanas de los proveedores de servicios de telecomunicaciones. Las tecnologías que existían para transporte de datos se pueden resumir básicamente en dos. Primero PDH y luego sustituida, pero no en su totalidad, por SDH. Actualmente, todavía se tienen servicios de estos protocolos en nuestro país, principalmente SDH, que constituye una jerarquía digital sobre la cual está basada la infraestructura física de las fibras ópticas. Además, previo a DWDM, se utilizó CWDM para el transporte de datos, debido a que no existía suficiente tecnología para crear más densidad en las longitudes de onda.

1. PDH. La Jerarquía Digital Plesiócrona (por sus siglas en inglés) es una tecnología usada tradicionalmente para telecomunicaciones, permitiendo enviar varios canales sobre un mismo medio (ya sea cable coaxial, radio o microondas) usando TDM y equipos digitales de transmisión. Puede implementarse en fibra óptica, aunque no está diseñado para este medio. En Guatemala se hizo presente a finales de los 80s y principios de 90s aproximadamente.

PDH funciona en un estado donde tanto el emisor como el receptor están sincronizados. Por esto permite la transmisión de flujos de datos que están funcionando a la misma velocidad (bit rate), pero permitiendo una cierta variación alrededor de la velocidad nominal gracias a la forma en la que se construyen las tramas. Entonces es definido, como el conjunto de sistemas de transmisión que utiliza dos pares de alambre (uno para transmitir y otro para recibir) y un método de multiplexación TDM para interpolar múltiples canales de voz y de datos digitales.

A nivel internacional existen tres estándares para PDH:

- T1, el cual es el estándar de Norteamérica que consiste en 24 canales de 64 kbps dando una capacidad total de 1.544 Mbps.

- E1, el cual es el estándar europeo, definido por la ITU-T, pero utilizado en el resto del mundo, incluyendo Guatemala. E1 consiste de 30 canales de 64 kbps (canales E0) y 2 canales reservados para la señalización y sincronía, la capacidad total es de 2.048 Mbps.
- J1, el estándar japonés, con una capacidad de 1.544 Mbps, usando la misma estructura de 24 canales de 64 kbps. La longitud de su trama es de 193 bits (24 canales de voz/datos más un bit de sincronización), el cual es transmitido a una tasa de 8000 tramas por segundo.

Dentro de las desventajas más importantes que presenta PDH se encuentran la flexibilidad y su capacidad para la administración eficiente de la red. Por otra parte, existe gran cantidad de equipo de multiplexaje en este tipo de redes, por lo que el control de los registros de interconexión se vuelve un problema. También las diferentes jerarquías existentes: americana, europea y japonesa, hacen muy difícil el inter-funcionamiento. La escasa normalización ha conducido a que los códigos línea, la modulación o las funciones de supervisión, sean específicas de cada suministrador, de forma que equipos de diferentes fabricantes casi en su mayoría, son incompatibles entre sí. Otras desventajas notables son:

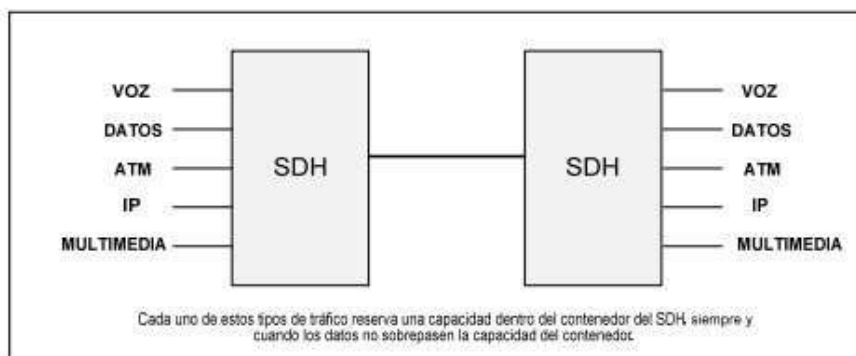
- Capacidad limitada de administración
- Incompatibilidad intercontinental
- No pensada para fibra óptica
- Capacidades máximas bajas: Japón 98 Mb/s, Norteamérica 274 Mb/s, Resto del mundo 139 Mb/s
- Carece de herramientas de gestión ni posibilidad de tolerancia a fallos.

2. **SDH.** La Jerarquía Digital Síncrona (por sus siglas en inglés), es un estándar para el transporte de información en telecomunicaciones por la Unión Internacional (ITU). Se encuentra dentro del área de las telecomunicaciones desde 1992 y sigue siendo muy utilizado actualmente. La jerarquía SDH se desarrolló en Estados Unidos bajo el nombre de SONET (conocido también de esta manera). Está basado en enviar una señal síncrona multiplexada a través de un rayo de luz transmitido sobre fibra óptica. Para entender de mejor manera Figueroa (2008:22) nos redacta:

«SDH es un protocolo de transporte, de la capa física del modelo OSI, capa 1, basado en la existencia de una referencia temporal común que multiplexa diferentes señales dentro de una jerarquía común y gestiona su transmisión de forma eficiente a través de redes ópticas, con mecanismos internos de protección.»

La Figura 33 muestra los tipos de tráfico que se pueden transportar sobre SDH, sin embargo, cada uno de estos tipos, reserva capacidad de transporte, lo que significa que el ancho de banda que sea designado en SDH para un momento sea menos denso.

Figura 33: tipos de tráfico sobre SDH

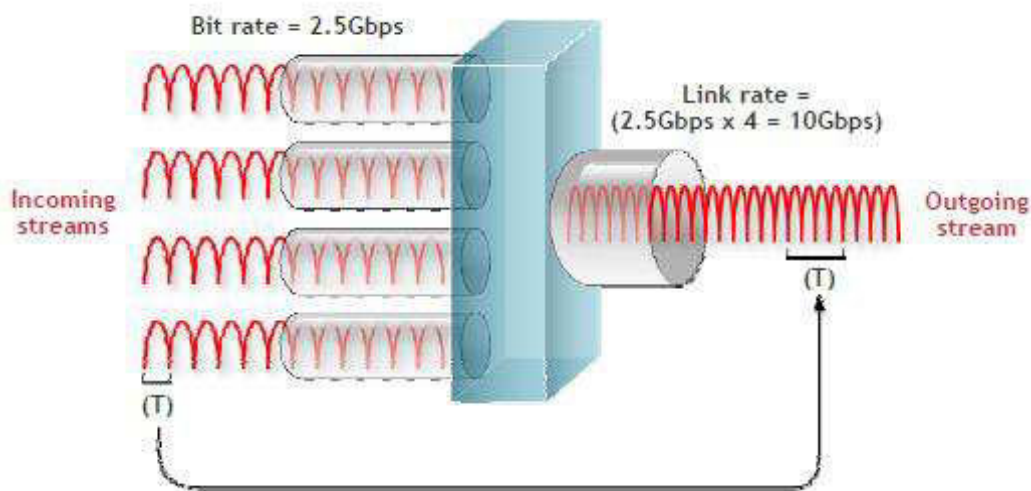


Fuente: Adecuación de una red de fibra óptica SDH, para soportar la nueva generación SDH.

Pág. 23.

SDH se convirtió en el estándar de transporte óptico para TDM. Su funcionamiento era obtener n cadenas de bits, las multiplexaba y modulaba ópticamente la señal, mandándola usando un equipo de emisión de luz sobre la fibra con un bit rate igual a $(\text{bit rate entrante}) \times n$. El principio descrito puede ser observado en la Figura 34, donde se muestra el incremento en el bit rate dependiendo del número de entradas que se tiene.

Figura 34: TDM sobre SDH



Fuente: Transmission Networks – WDM Technology – Fundamentals. Pág. 12.

Es un sistema de transporte digital realizado para proveer una infraestructura de redes de telecomunicaciones más simple, económica y flexible. Entró en el mercado del transporte de datos debido a que ofrecía algunas ventajas como:

- Altas velocidades de transmisión: para los inicios en que se utilizaba esta tecnología, era capaz de generar altas velocidades.
- Ofrecía alta disponibilidad y grandes posibilidades de ampliación: permitía a los proveedores de redes reaccionar rápida y fácilmente frente a las demandas de sus clientes.
- Fiabilidad: incluyen varios mecanismos automáticos de protección y recuperación ante posibles cambios del sistema.
- Estandarización: los estándares permiten la interconexión de equipos de distintos fabricantes en el mismo enlace. Esta estandarización da a los usuarios la libertad de elegir los suministradores, evitando complicaciones de búsqueda de solución por parte de un solo fabricante.

3. CWDM. La red de larga distancia había sido construida y muchos usuarios en ciudades alrededor de áreas metropolitanas deseaban acceso a internet de inmediato. DWDM era la primera consideración para proveer la capacidad deseada. DWDM era la tecnología comprobada para construir la sección de larga distancia de la red y por lo tanto la primera opción obvia. Sin embargo, DWDM se mostró muy costosa, incluso para cortas distancias sin amplificadores. Entonces CWDM fue introducida como una nueva posible solución de transmisión de bajo costo para múltiples longitudes de onda. Proveedores de servicios pequeños reconocieron CWDM como la respuesta por encima de DWDM inicialmente. Según Meza (2009:185):

«CWDM fue, desde el principio, diseñada para la red de área metropolitana. Empresas y proveedores de servicio están alerta respecto de CWDM debido a su capacidad de escalamiento a medida que la red crece. Más allá de esto, implementar una red CWDM es algo trivial. CWDM permite que una arquitectura WDM de bajo costo con interconexiones simples pueda hacer fácil la construcción de redes de anillo y punto a punto. Las topologías utilizadas para construir son en general:

- Malla con múltiple enlaces interconectados con los nodos.
- Anillos con enlaces y funciones Add/Drop
- Punto a multipunto para broadcasting
- Punto a punto

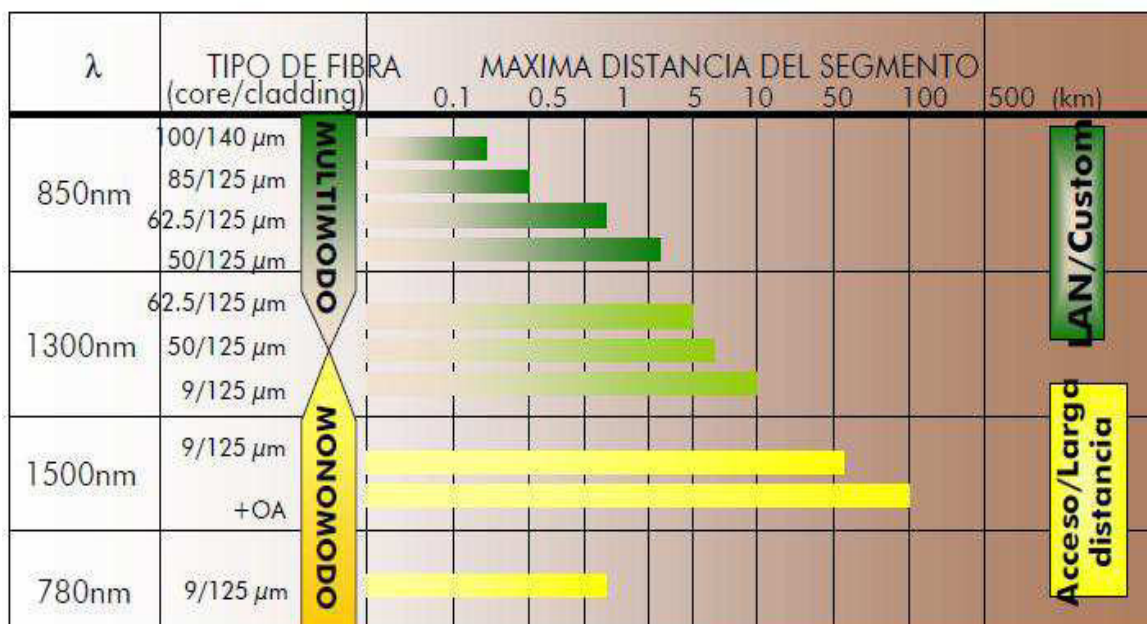
Las topologías clave utilizadas particularmente en las redes metro son de anillo y punto a punto. Malla y multipunto, las cuales son utilizadas mayormente en red Core, son costosas de implementar y, por lo tanto, no son utilizadas frecuentemente en redes metro.»

B. Situación actual en Guatemala

DWDM es una tecnología en evolución y en cortos períodos de tiempo. Las últimas soluciones de DWDM en el mercado están enfocadas a la escalabilidad, es decir, extender su capacidad en la línea con la demanda del mercado. Los problemas generados por esta tecnología son mínimos comparados con las ganancias de capacidad logradas. Inicialmente DWDM se caracterizó por ser reconocida como una solución para ocuparse de inmensos volúmenes de tráfico para largas distancias, como conexiones entre países o continentes. Básicamente, se detallarán tres aspectos importantes en la tecnología DWDM para la descripción de la situación actual en el país: fibras ópticas, topologías y los detalles técnicos de la tecnología.

1. Red actual de fibra óptica. Hace aproximadamente 20 años, se empezó utilizando fibra multimodo para clientes corporativos, con topologías punto a punto para distancias cortas. Poco a poco, con el pasar de los años, se empezó a utilizar las fibras monomodo, debido a las ventajas que presentaba en comparación con la multimodo, sin pensar en multiplexación por longitudes de onda. En la Figura 35, puede observarse las distancias máximas de variadas fibras y puede notarse la mejora con la fibra monomodo.

Figura 35: Distancias máximas en variadas fibras



Documentación de apoyo Alcatel de Argentina S.A.

En Guatemala, se manejan fibras con estándar G652. Antes de la llegada de CWDM y DWDM, el estándar más utilizado era el G652.A. Pero con la llegada de la tecnología WDM (ya

con multiplexación de longitudes de onda), fue necesario ir reemplazando las fibras G652.A, por fibras G652.B, la cual ya nos permite manejar longitudes de onda. Todos estos cambios se realizaron, con una previa caracterización de fibras, para saber cuáles podían ser utilizadas, evaluando parámetros como la dispersión y la atenuación, por longitud de onda. Para la tecnología DWDM, es necesario, como mínimo, una fibra G652.B por sus características y su capacidad de transmisión de longitudes de onda multiplexadas.

Hoy en día, en nuestro país, las empresas de telecomunicaciones están realizando cambios en sus redes de fibra óptica, para que sólo se tengan fibras de los estándares G652.D y G653 (esta última es estrictamente para WDM). A continuación se presentan unas características generales de estos tipos de fibra (siendo las fibras monomodo más utilizadas).

- NDSF (Non-Dispersion-Shifted Fiber). (ITU-T G.652) Las fibras NDSF, comúnmente conocidas como la fibra monomodo estándar (SSMF), fueron diseñadas para ser utilizadas en la segunda ventana óptica establecida, cerca de los 1310 nm. Para optimizar el rendimiento de la fibra óptica en esta ventana, fue diseñada de forma que, la dispersión cromática fuera cercana a cero para una longitud de onda de 1310 nm. Puede trabajar a los 1550 nm (ventana óptima para los EDFAS en WDM), pero presenta muchos problemas por su alta dispersión cromática. Como ya se mencionó, se utilizan los estándares G652.B y G652.D en Guatemala. Poco a poco, se quiere ir reemplazando todas las fibras con estándar B, a fibras de estándar D, esto debido a las características de transmisión en longitudes de onda específicas, como puede verse en la Figura 36. También es posible comparar características de las distintas variaciones de la fibra estándar G652 en la Figura 37.
- DSF (Dispersion-Shifted Fiber). (ITU-T G.653) Fibra de dispersión con cambios que permite el mínimo de atenuación en la región de los 1550 nm con dispersión cero en la misma longitud de onda, lo que permite llevar mayor cantidad de datos a mayor distancia. Cuando se inició el despliegue de las tecnologías DSF y EDFAs (explicados más adelante), se proporcionaban inconvenientes a los sistemas WDM. La potencia extra que tenía que transportar la fibra de vidrio por el uso de varios amplificadores por cada longitud de onda, dio como resultado, los efectos de transmisión no-lineales. Uno de los primeros y más perjudiciales efectos que aparece en esta fibra, es el efecto de la mezcla de cuatro ondas (FWM). Debido a la baja atenuación en la región de 1550 nm, es una fibra altamente recomendable para la tecnología DWDM. También comparar características de las distintas variaciones de la fibra estándar G653, en la Figura 38.

Figura 36: Comparación de propagación de señal en fibra G652.D (primera gráfica) y en fibra G652.B (segunda gráfica).

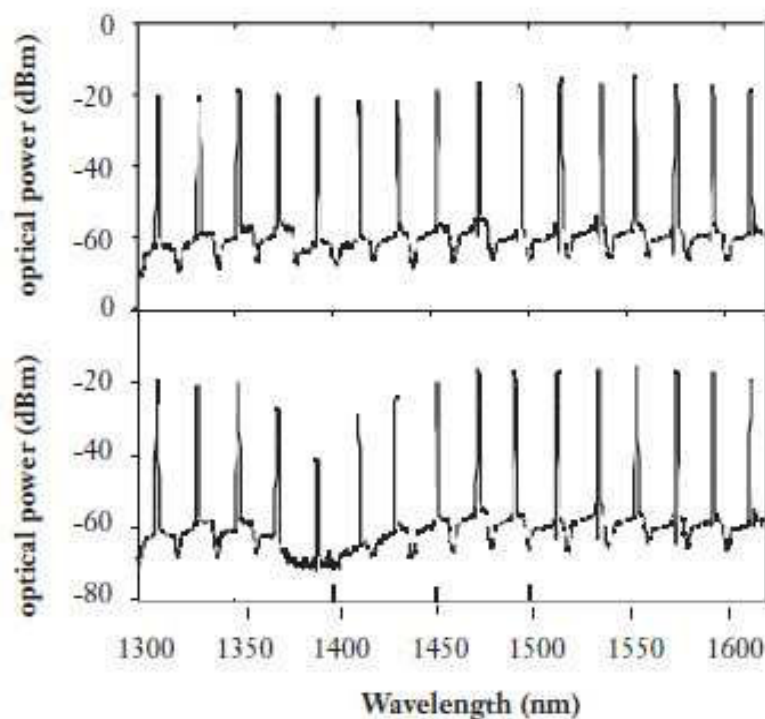


Figura 37: Características de las fibras pertenecientes a la familia G652.

	Longitud de onda	Atenuación (dB/km)	Atenuación por macrocurvatura 100 vueltas de 30 mm de radio	Dispersión 0	PMD (ps/√km)
G.652.A	1310 y 1550nm (bandas O y C)	0,5 dB/km @1310nm 0,4 dB/km @1550nm	0,1 dB @1550nm	$\lambda_0=1300\text{nm}$	0,5
G.652.B	1310, 1550 y 1625nm (O, C y L)	0,4 dB/km @1310 0,35 dB/km @1550 0,4 dB/km @1625	0,1 dB @1625nm	$\lambda_0=1300\text{nm}$	0,2
G.652.C	Desde 1260 hasta 1565 (O, E, S y C)	0,4 dB/km @1260~1565	0,1 dB @1625nm	$\lambda_0=1300\text{nm}$	0,5
G.652.D *	Desde 1260 hasta 1625 (O, E, S, C y L)	0,4 dB/km @1260~1625	0,1 dB @1625nm	$\lambda_0=1300\text{nm}$	0,2

(*) recomendada

Figura 38: Características de las fibras pertenecientes a la familia G653 y G654.

	Longitud de onda	Atenuación (dB/km)	Atenuación por macrocurvatura 100 vueltas de 30 mm de radio	Dispersión 0 (ps/nm km)	PMD (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)
G.653.A	1550nm	0,35 dB/km @1550	0,5 dB @1550nm	$\lambda_0=1500\text{nm}$	0,5
G.653.B	1550nm	0,35 dB/km @1550	0,1 dB @1550nm	$\lambda_0=1500\text{nm}$	0,2
G.654.A	1550nm	0,22 dB/km @1550	0,5 dB @1550nm	$\lambda_0=1350\text{nm}$ $\lambda_{\text{min}} 1550 = 20$	0,5
G.654.B	1550nm	0,22 dB/km @1550	0,5 dB @1550nm	$\lambda_0=1350\text{nm}$ $\lambda_{\text{min}} 1550 = 22$	0,2

Página Web: [http://www.telnet-](http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf)

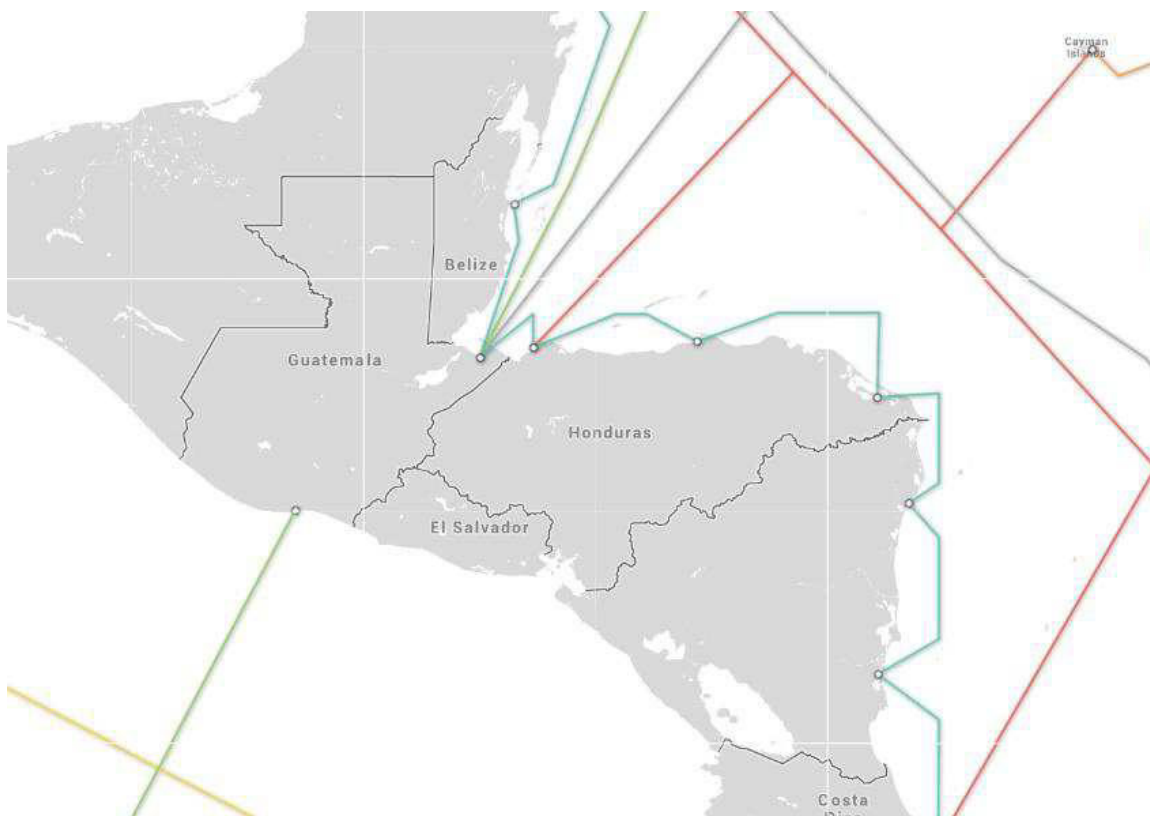
[ri.es/fileadmin/user_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf](http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf)

2. Topologías de DWDM existentes en Guatemala. Puede decirse que en Guatemala hay tres formas de implementación de la tecnología DWDM. La primera es la interconexión con otros países cercanos de forma terrestre, como el caso de México, El Salvador y Honduras. Se tienen redes de fibra y transporte de datos por medio de DWDM que se interconectan con el fin de tener una red regional y facilitar el transporte de datos a grandes distancias, en topologías punto a punto y en anillo para generar una protección. La segunda forma es el transporte de datos por medio de DWDM en fibra submarina, que nos conecta con países más lejanos, como puede ser Nicaragua, Belice o las islas del Caribe, como puede apreciarse en la Figura 39. Por último, se encuentra el uso de DWDM en aspecto nacional conectando los puntos más demandados de Guatemala, con el fin de cubrir las necesidades de transporte dentro del país.

Actualmente, se está enfocando a incrementar y satisfacer las necesidades en redes metropolitanas. No se está usando nuevas redes de fibra, sino que simplemente se conecta una red de datos utilizando redes existentes. El objetivo es principalmente en redes donde existe alta densidad poblacional y, por ende, alto tráfico de datos. Es por eso que las topologías tienen sus principales nodos en ciertas cabeceras de los departamentos. Esto respecto al interior del país, pero en la capital, siendo el departamento más poblado y que presenta más demanda de datos (no solo por su cantidad de población sino por ser el departamento más avanzado en

tecnología), es necesario elaborar una topología más pequeña para abarcar y satisfacer necesidades en el transporte de datos. Así es como se van cumpliendo y satisfaciendo las necesidades presentadas, pero el paso a cubrir al país en su mayoría es grande, debido a las infraestructuras y la red de la fibra que existe.

Figura 39: Conexiones submarinas que existen actualmente en Guatemala



Página Web: <http://www.submarinecablemap.com/>

3. Detalles y especificaciones técnicas de DWDM en Guatemala. El exponencial incremento del tráfico de datos y de voz, debido a las necesidades de un mercado creciente, produce una gran demanda de ancho de banda. Al aumentar la capacidad los operadores de telecomunicaciones se ven obligados a escoger entre varias opciones: aumentar capacidad del canal que está siendo transmitido por el medio de transmisión, instalación de más medios de transmisión para enviar datos por nuevos canales, o transmitir varios canales por una misma fibra, logrado mediante multiplexación por división de longitud de onda. Es aquí donde destaca la principal ventaja que tiene la tecnología CWDM y aún más DWDM, ya que estas tecnologías nos permiten transmitir varios canales por el mismo medio de transmisión previamente instalado.

Como ya se detalló anteriormente, DWDM trabaja en las bandas C y L. Al ser una tecnología densa, estas bandas pueden ser divididas en varios canales, dependiendo de la tecnología. Hoy en día se pueden llegar a conseguir 40, 80 o hasta 160 canales ópticos, separados entre sí por 1.6 nm, 0.8 nm, o 0.4 nm. La tecnología permite combinar esta cantidad de canales con un ancho de banda efectivo de unos 10 Gbit/s, 40 Gbit/s, 100 Gbit/s y hasta 400 Gbit/s por canal, de manera que las capacidades de transmisión son más que suficiente para el transporte de datos que existe en la actualidad.

En Guatemala, como en cualquier otro país, se tienen variados equipos y de distintas empresas para la implementación de esta tecnología. La cantidad de canales depende del tráfico a transportar, y ya con este aspecto definido, se establece el equipo a instalar. Los principales equipos utilizados en el país son de 96 canales (principalmente para enlaces con otras regiones) y 44 canales (para redes metropolitanas). Usualmente los equipos de 44 canales, tienen una ampliación lo que permite extenderse a 88 canales, si la demanda lo requiere.

- Los equipos de hasta 96 canales basan su arquitectura en separaciones de 50 GHz. Además poseen compatibilidad con una grilla de 25 GHz, lo que nos permite futuras ampliaciones al equipo. Es posible transportar señales con ancho de banda efectivo de 10Gbit/s, 40Gbit/s y 100Gbit/s, por canal. Su principal uso, actual, es en redes de larga distancia, por lo que cuenta con un alcance de miles de kilómetros, con los amplificadores correspondientes. También cuenta con la posibilidad de utilizar multiplexores ópticos Add-Drop (OADM), equipo el cual sube o baja longitudes de onda de forma transparente.

Aunque posee gran cantidad de canales, en nuestro país, no se están utilizando todos los canales disponibles que el equipo brinda, ya que la demanda de servicio no lo requiere por el momento. Esto nos permite crecer más adelante, sin necesidad de invertir en equipos o medios de transmisión.

- Los equipos de hasta 44 canales, basan su arquitectura en separaciones de 100 GHz. También posee una ampliación que puede convertirla en equipo de 88 canales ópticos. Puede transportar señales con ancho de banda efectivo de 1 Gbit/s, 2.5 Gbit/s, 10Gbit/s y algunos hasta 40 Gbit/s. Su principal uso es en redes metropolitanas, por lo que abarca cientos de kilómetros. También tiene la posibilidad de usar OADM, lo cual es un beneficio importante en el área metropolitana y con topología en anillo, ya que nos da protecciones, permite insertar canales y también descargarlas en diferentes puntos.

Al igual que el equipo anterior, en estos actualmente no se están utilizando los 44 canales disponibles (ni en los nodos más demandados), por lo que es posible tener un crecimiento a futuro con el mismo equipo y si fuera necesario, es posible extender el equipo a 88 canales.

Los mencionados no son los únicos equipos utilizados para DWDM en Guatemala, pero sí son los más comunes y los que cumplen con los requerimientos del cliente. En la Tabla VII, pueden apreciarse algunos de los requerimientos (se mencionan los más importantes que se consideraron) que da un operador de lo que espera de la implementación de DWDM. Además se establece si se cumple actualmente con cada requerimiento en Guatemala, para dar una perspectiva y comparación con otros países, de cómo se encuentra implementada la tecnología actualmente en Guatemala.

Tabla VII: requerimientos principales por parte de un operador sobre implementación de tecnología DWDM

Requerimiento	Cumplimiento
Cumplir con las recomendaciones de la ITU-T G.709/Y1331 (02/12), G.872 (10/12), G.874 (08/13) y G.798 (12/12).	Las empresas que ofrecen la implementación de DWDM, para sus equipos ya toman en cuenta estas recomendaciones, por lo que sí se cumplen los estándares planteados.
Garantizar mínimo 80 canales en banda C con capacidad de 40 Gbps y 100 Gbps indistintamente y espaciamiento entre lambdas de 50 GHz, según recomendación G.694.1 (02/12)	Actualmente se tienen hasta 96 canales en banda C, con esas capacidades y con ese espaciamiento entre canales.
Estar en capacidad de soportar lambdas o canales de 40 Gbps y 100 Gbps de manera simultánea sin afectar la cantidad de canales utilizables en la grilla de frecuencias según recomendación G.694.1 (02/12)	El sistema soporta esas capacidades con los respectivos transponders y esto no incrementa ni disminuye la cantidad de canales utilizables en la banda.
Es deseable que el sistema ofertado utilice la banda C extendida de tal manera que sea viable soportar más de 80 canales de 40 Gbps y 100 Gbps garantizando el espaciamiento entre lambdas de 50 GHz, según recomendación G.694.1 (02/12)	Los equipos y la tecnología trabajan en la banda C y C extendida, soportando más de 80 canales y con esas capacidades (principalmente transmisión de datos regional).
Garantizar la inserción o extracción de lambdas de 40G y 100G en cualquier parte de la grilla sin generar afectación en las lambdas existentes y sin restricción alguna (como por ejemplo banda de guarda).	La tecnología ofertada en Guatemala tiene la posibilidad de usar OADM, lo cual es un beneficio importante en el área metropolitana y con topología en anillo, ya que nos da protecciones, permite insertar canales y también descargarlas en diferentes puntos.
Garantizar la canalización de diferentes tipos de servicios en una misma portadora óptica (lambda), es decir Lambdas multiservicio.	Si es posible transportarlo en un mismo canal, pero se necesita equipo específico (transponder) el cual si está implementado y disponible para Guatemala.

Continuación Tabla VII: requerimientos principales por parte de un operador sobre implementación de tecnología DWDM

Requerimiento	Cumplimiento
Soportar la implementación de ROADM o mecanismos equivalentes que permitan la conmutación de lambdas entre diferentes grados o direcciones ópticas sin intervención física en sitio.	Como ya se especificó anteriormente, los equipos utilizados permiten la implementación de ROADM para la inserción o extracción de datos.
Contar con mecanismo ALS ("automatic laser shutdown") o similar. Se debe indicar sus características de operación y funcionamiento.	En Guatemala hay equipos que utilizan como ALS el llamado APR (Automatic Power Reduction).
Contar con puntos ópticos de prueba para medición de los niveles de potencia en cada nodo, con el fin de garantizar la seguridad de los operarios ante una exposición.	En cada amplificador se tiene un punto de monitoreo, así utilizando un OSA (analizador de espectros), se puede saber los niveles de potencia para cada canal.
Se debe garantizar que el sistema de gestión asociado a la plataforma ofertada este en capacidad de mostrar los parámetros ópticos de desempeño en formato grafico y/o tablas que puedan ser exportados a un sistema externo.	El sistema de gestión de los equipos de DWDM es bastante poderoso, generando archivos completos con toda la información necesaria del estado de la red (incluyendo gráficas y tablas en Excel).

Estos son solo ejemplos de los principales requerimientos que solicita el cliente al implementar la tecnología DWDM para la transmisión de datos, no quiere decir que sean los únicos. Como puede notarse, la tecnología en nuestro país está bastante avanzada ya que se cumple con la mayoría (si no es que todos) de los requerimientos solicitados, tanto en detalles técnicos, como en instalaciones, control, interfaces, amplificadores, protecciones y gestiones y monitoreo.

C. Principales retos y soluciones que existen en tecnología DWDM

Existen diversos retos que se presentan al implementar la tecnología DWDM en Guatemala. Estos se dan en el medio de transmisión, en este caso la fibra óptica y en los equipos utilizados para hacer posible la transmisión de datos.

1. Topología y daño al medio de transmisión. Respecto a las condiciones que tenemos como país, entre las principales complicaciones que se presentan y que afectan o complican el medio de transmisión se encuentran: la topología, por ser un país montañoso,

complicando las rutas del medio de transmisión; y el daño a la fibra óptica, principalmente provocado por desastres naturales (inundaciones), caída de postes y vandalismo.

Como solución a este reto, se ha optado por la combinación de dos tipos de instalación de la fibra: aéreo y subterráneo. De esta manera se logra reducir el daño al medio de transmisión y también se obtiene una cobertura casi total, en el país. Es preferible utilizar la instalación subterránea, por medio de canalizaciones, debido a que es menos frecuente que suceda una falla. Además de la protección, la durabilidad es otra ventaja, debido a las condiciones en que la fibra está expuesta. Los únicos inconvenientes son: el aspecto económico, ya que es superior el gasto, comparado con una instalación aérea y los permisos legales para realizar las canalizaciones.

Como ya se mencionó, en Guatemala, se poseen ambas instalaciones. En el área urbana, ya casi todas las instalaciones realizadas de fibra óptica, son por medio subterráneo, incluso, también, para enlaces de larga distancia (entre departamentos). Sin embargo, la forma de instalación aérea, es predominante hasta el momento (irá disminuyendo en los próximos años). En este método, algunas empresas de telecomunicaciones, aprovechan el uso de los postes de energía, teniendo acceso así, a casi toda la región. La situación descrita no es la más recomendable, ya que los postes tienen un límite de carga. Dada esta situación, empresas en Guatemala, han optado por instalar postes destinados a telecomunicaciones, correctamente dimensionados para la carga que tienen.

2. Principales retos en transmisión de la señal. Ya se hablaron de las complicaciones físicas que se podía tener en una red DWDM, pero ahora hay que mencionar los principales retos que se dan dentro del medio de transmisión:

- Dispersión cromática de la fibra: representa el retraso o incremento de tiempo (en ps) de la señal transmitida. Depende del tipo de fibra y limita la distancia de transmisión para una buena calidad de servicio. El ensanchamiento que sufren los pulsos de luz es un factor que limita la calidad de la señal sobre enlaces ópticos.

La dispersión es una consecuencia de las propiedades físicas del medio de transmisión. Las fibras monomodo, están sujetas a la dispersión cromática que causa un ensanchamiento de los pulsos de luz según la longitud de onda y provoca una superposición de los pulsos y errores en la decodificación. Una red que transmite a 10 Gbit/s tiene 16 veces más tolerancia a la dispersión cromática que una que trabaja a 40 Gbit/s. Este dato permite hacernos la idea de la limitación que impone la dispersión cromática a altas velocidades.

Donde afecta más la dispersión mencionada es en los sistemas para largas distancias y altas tasas de transmisión. En distancias cortas de pocos kilómetros la distorsión total es pequeña y no afecta gravemente al comportamiento del sistema. Este error puede corregirse con un DCM explicado más adelante. Otro método de compensación de la dispersión cromática, es el empleo de fibras compensadoras de dispersión, cuyo diseño reduce o anula la dispersión en la tercera ventana. Existe otro tipo de fibras tienen un valor de dispersión elevada y de signo contrario al de las fibras monomodo estándar, y de esta forma se obtiene en cómputo global una dispersión nula. Otro método poco utilizado es el uso de FBG (Fiber Bragg grating) el cual introduce un retardo que depende de la longitud de onda de forma que compensa el retardo sufrido por las diferentes longitudes de onda de la señal transmitida.

- Condiciones de fibra óptica: Pese a que se está utilizando una red de fibra óptica pensada para otra tecnología, si se está utilizando la fibra G.652.B como mínimo, es una fibra que puede y es utilizada para la tecnología DWDM, aunque no es lo más recomendable. Algunas fibras, dan complicaciones por algún deterioro o, incluso, por tantas fusiones con el fin de arreglarlas, y esto afecta directamente la señal transmitida. Como consecuencia puede también generarse dispersión extrínseca, ya sea por macrocurvaturas o por microcurvaturas. Este problema es solucionado reemplazando la fibra, por una en mejor estado, o simplemente se deja la atenuación generada por el deterioro de la fibra, pero se debe considerar utilizar amplificadores ópticos, para que se reciba la señal deseada.
- Atenuación del multiplexor o del demultiplexor: son pérdidas relacionadas con estos dispositivos y se describen en las hojas de características dadas por el fabricante. Estos dispositivos pueden insertar las pérdidas como la atenuación por inserción. Se corrige este comportamiento con amplificadores.
- Mantener la señal a ruido: se le conoce así a la proporción existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe. Es un aspecto de gran importancia en esta tecnología y que hay que cuidar que se mantenga, ya que es un factor limitante en el número de amplificadores que pueden ser conectados en serie. El ruido puede ser causado por los equipos utilizados o por alteraciones a la señal.

a. Equipos utilizados para la corrección de la señal. El desarrollo en la amplificación óptica permitió que las distancias de transmisión se multiplicaran. Hoy en día es posible transmitir canales DWDM por medio de un enlace de fibra a lo largo de muchos kilómetros. Es posible regenerar el nivel de la señal para todos los canales simultáneamente, situando amplificadores de línea a 80 km más o menos. La distancia de transmisión ya no es

limitada por la potencia de la señal sino por el ruido del amplificador y la acumulación de impedimentos de transmisión tales como dispersión cromática y ausencias de linealidad de fibra. Hablando de las ampliificaciones, según Meza (2004:170):

«Principio de la ampliificación óptica: un amplificador óptico duplica los fotones entrantes por medio de un proceso conocido como emisión estimulada. Este es el mismo proceso responsable de la regeneración de luz en los láseres. Un amplificador ideal incrementaría solamente la fuerza de la señal sin ningún efecto secundario desventajoso y funcionaría como un tipo de desajuste de pérdida por distancia y pérdida por componente. Sin embargo, en realidad, el proceso de emisión espontánea, el cual está enlazado inseparablemente con la emisión estimulada, da lugar a ruido óptico que degrada la señal.»

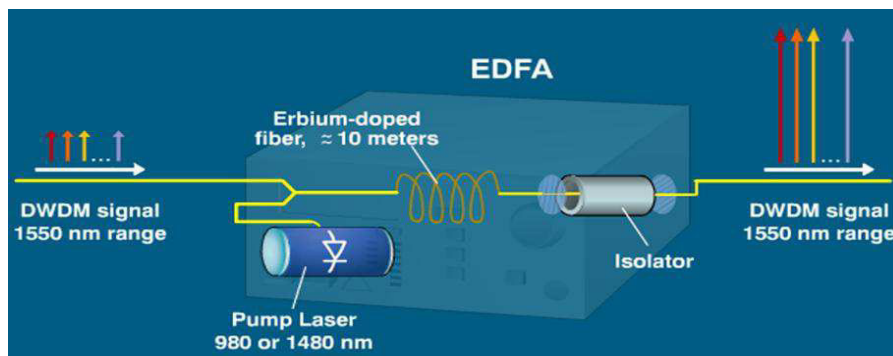
Existen varios equipos para corrección, ampliificación o recuperación de la señal cuando esta se ve muy afectada por diferentes factores. Debido a la atenuación que sufre la señal cuando viaja por la fibra, la distancia que puede alcanzar la señal con potencia suficiente para ser detectada del lado del receptor, está limitada. Entre los equipos más comunes que se utilizan actualmente en redes DWDM de nuestro país se encuentran: DCM, EDFA, amplificador de Raman y amplificador de potencia. Los parámetros clave de los amplificadores ópticos son la ganancia, la igualdad de ganancia, el nivel de ruido y la potencia de salida.

1) DCM. Significa módulo compensador de dispersión por sus siglas en inglés. Este módulo se utiliza para anular la dispersión causada por la fibra. Básicamente consiste en tener dispersión negativa y tiene la ventaja de trabajar en un amplio rango de longitudes de onda. Cada DCM es diseñado para compensar una cantidad específica de dispersión, existen desde 10 hasta unos cientos de kilómetros dependiendo del diseño de la red.

2) EDFA. Significa amplificador de fibra dopada con erbio (por sus siglas en inglés). Es el más común de los amplificadores ópticos y como su nombre lo dice, se basa en fibras ópticas de silicón que se dopan con erbio, convirtiendo la fibra en activa. Su funcionamiento es el siguiente: una señal débil entra en una fibra dopada con erbio, en que una luz a 980 nm o 1480 nm es inyectada mediante una bomba láser. De esta manera la luz inyectada estimula los átomos de erbio que liberan su energía almacenada como luz adicional de 1550 nm. Como este proceso continua por la fibra, la señal se refuerza.

La distancia que logra el amplificador EDFA para que la señal se mantenga, depende de la potencia de la señal, la potencia de bombeo, la concentración de iones de erbio en la fibra y la cantidad de ganancia que se desea. Otros parámetros típicos que presenta un amplificador EDFA pueden observarse en la Tabla VIII.

Figura 40: Funcionamiento de un EDFA.



Documentación de apoyo Alcatel de Argentina S.A.

Tabla VIII: Parámetros típicos de un amplificador EDFA

Longitud de onda de bombeo	1480 nm	980 nm
Eficiencia de bombeo (dB/mW)	5	10
Figura de ruido (dB)	5.5	3-4.5
Potencia de salida de saturación (dBm)	20	5
Ganancia (dB)	40	50
Potencia de bombeo (mW)	50-200	10-20

Página Web: http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_8_2.htm

Estos amplificadores se han utilizado tradicionalmente para propósitos terrestres y submarinos. Las ventajas más destacadas que producen estos amplificadores son las siguientes:

- Funcionamiento en tercera ventana óptica (la más apropiada para transporte de larga distancia)
- Buen ancho de banda, típicamente 30 a 35 nm
- Alta ganancia óptica, superando en ciertos casos los 30 dB según diseño y aplicaciones
- Alta potencia de salida (hasta 15 dBm o más según longitud de onda)
- Factor de ruido relativamente bajo (típicamente 4 a 5 dB). Este factor es definido como la razón de la señal-ruido en la entrada y en la salida
- Inmunidad a la diafonía y distorsión. Mantiene perfecta linealidad incluso al encontrarse muy saturado

3) Amplificador de Raman. Estos dispositivos se basan en amplificar la señal óptica mediante el efecto de dispersión de Raman estimulado (SRS) que es un tipo de difusión no lineal que da lugar a amplificaciones de banda ancha de múltiples canales ópticos. Esta amplificación se produce cuando una longitud de onda baja es inyectada y es propagada a través de la fibra. La señal inyectada crea una amplia banda de ondas de choque que les transfiere energía y aumenta los canales múltiples en los sistemas WDM. Los espectros de ganancias para los amplificadores de Raman son bastante amplios (150 nm a 200 nm) abarcando por completo las bandas S, C, L y U.

Típicamente los amplificadores Raman producen ganancias entre los 20 a 35 dB con potencias entre los 800 mW y 1 W. Esta tecnología es utilizada comúnmente para aplicaciones de largo alcance utilizando una potencia menor en la transmisión, presentando diferentes beneficios en la banda espectral ancha y baja generación de ruido.

D. Ventajas y mejoras que ha presentado la tecnología

Ya se mencionaron las ventajas principales que nos puede dar la tecnología WDM y más específicamente DWDM. Sin embargo, aunque solo lleva un par de años la implementación de la tecnología en Guatemala, ya se pueden hablar sobre ventajas que ha generado, tanto al proveedor como al cliente de un servicio de transmisión de datos.

- Utilizando las fibras ya instaladas puede implementarse la tecnología DWDM, logrando tener más transferencia de datos sin tener que haber cambiado/mejorado el medio de transmisión. Esto representa disminución de costos.
- Aunque el costo de implementación inicial sea alto, ya sea por el equipo o los servicios de instalación, se logra obtener un ROI (retorno de la inversión, por sus siglas en inglés) alto por la cantidad de información que puede ser transmitida.
- También presenta una reducción de costos en mantenimientos a la fibra y equipos. La fibra necesita menos mantenimiento que otros medios de transmisión y también es muy duradera (proveedores dan hasta garantías de 20 años) y, aunque esté muy dañada es posible realizar su reparación o los empalmes necesarios a un bajo costo, por la tecnología que existe para reparar fibra óptica. Respecto a los equipos, si se le da el mantenimiento o reparación correcta (por alguien que conozca y domine el equipo), puede representar una reducción de costos, por su larga duración.
- Rentabilidad, ya que por todos los beneficios que presenta, se logra tener más usuarios y, por ende, más ingresos.
- Como cliente, las ventajas que se tienen principalmente son: obtener un mejor servicio (mayor ancho de banda y mayores velocidades) y por un menor costo.

- De las ventajas más importantes, es el posible crecimiento que se puede tener a futuro con DWDM, sin tener que cambiar la red de fibra óptica, únicamente, equipos o las formas de transmisión de la información. Esto permite que, al necesitarse mayor ancho de banda por alta demanda, pueda brindarse este servicio únicamente cambiando cierto equipo o agregando extensiones a un equipo ya instalado y no cambiar una red completa.
- Transparencia, al soportar los servicios existentes como TDM (SDH o PDH) y ATM. Soporta redes punto a punto, anillos y conectividad multi-anillo, topologías de estrella y malla mientras provee una combinación de redes de banda ancha y transporte óptico.

E. Limitaciones que presenta Guatemala

Realmente, no son muchas las limitaciones que presenta el país para la implementación de tecnología DWDM. El principal factor que no permite el crecimiento de la tecnología, son las inversiones en proyectos. Sin embargo, no puede ser considerado como una limitación, ya que todos los países presentan esta realidad. Cuando el mercado lo requiera, se harán estas inversiones. Actualmente, la situación de Guatemala no ha requerido una masificación de fibra óptica, debido a que hoy en día se cumple con las demandas de los clientes con las redes de cobre y de fibra óptica existentes. La inversión implicaría desde el medio de transmisión, hasta la compra de equipos, construcción de espacios físicos, mantenimientos, instalaciones, etc. Es un gasto inicial grande y, por lo tanto, para que una empresa acceda a invertir este capital monetario en proyectos completos, se necesita que existan clientes, así de esta forma, obtener una retribución de lo invertido (ROI) en poco tiempo. Cuando las demandas de transmisión de datos en Guatemala aumenten y sea necesario ampliar los anchos de banda y las velocidades, existen empresas que tienen la capacidad de realizar estas inversiones.

Una limitación real que se da en Guatemala es la dificultad/complicación de obtener autorizaciones para la instalación de medios de transmisión. Ya sea instalación por medio aéreo o por medio subterráneo, existen diversas restricciones que imponen la municipalidad o incluso la Superintendencia de Telecomunicaciones (SIT), lo que provoca un aumento en los costos. Por ejemplo, la *Ley General de Telecomunicaciones* realizada por la SIT establece en su artículo 25 lo siguiente:

“ARTÍCULO 25. Establecimiento de servidumbres. La instalación de redes lleva implícita la facultad de usar los bienes nacionales de uso común mediante la constitución de servidumbres o cualquier otro derecho pertinente para fines de instalación de redes de telecomunicaciones, sin perjuicio del cumplimiento de las normas técnicas regulatorias, así como de las ordenanzas municipales y urbanísticas que corresponda. Las servidumbres o cualquier otro derecho que pudiera afectar bienes nacionales de uso no común o propiedades privadas deberán ser convenidas por las partes y se regirán por las normas generales que sean aplicables.”

Es la única ley relacionada con la instalación de los medios de transmisión, pero claramente enuncia que hay que respetar y cumplir las normas técnicas regulatorias correspondientes al lugar de instalación. A continuación, en la Tabla IX, se presentan algunos artículos del Acuerdo COM 33 – 2003 que contiene *La declaratoria de las vías públicas municipales preestablecidas como rutas de conducción subterránea* por parte de la Municipalidad de la ciudad capital.

Tabla IX: Artículos con relación a la instalación del medio de transmisión.

ARTÍCULO 1. Objeto.	Eliminar la alta densidad de elementos e infraestructura instalados en la superficie y espacio aéreo de las vías públicas y espacios abiertos del Municipio a cambio de trasladarlos a redes de canalización subterránea.
ARTÍCULO 6. Nuevas Autorizaciones.	Las nuevas solicitudes para la instalación de infraestructura aérea y en la superficie ubicada en rutas preestablecidas realizadas a partir de la vigencia del presente Acuerdo, no serán autorizables; únicamente la canalización subterránea para la conducción de sistemas de información y telecomunicaciones, la cual será construida por el interesado. En zonas bajo régimen especial se regirán por sus propias regulaciones que para tal efecto estén vigentes. En zonas o rutas en las que la Municipalidad implemente sistema de canalización subterránea para uso común, las empresas deberán utilizarla, sujetas a las condiciones técnicas y administrativas que la Municipalidad establezca.
ARTÍCULO 9. De los Proyectos de Renovación Urbana.	Las personas individuales o jurídicas que tengan instalada infraestructura aérea en aquellas vías públicas en las que se realicen proyectos de renovación urbana impulsados por la Municipalidad, deberán trasladar a canalización subterránea sus tendidos aéreos, en las condiciones que establece el artículo 6 del presente Acuerdo, o bien, trasladarlo a infraestructura aérea Municipal de uso común implementada para el efecto, en el plazo estipulado por la Municipalidad a través del Departamento de Control de la Construcción Urbana o quien haga sus veces. Al presente Acuerdo podrá la Municipalidad incorporar nuevas rutas o áreas por propia disposición o a solicitud de los Comités Únicos de Barrio (CUB).

Estos artículos mencionados en la Tabla IX, solamente aplican para la ciudad capital (los demás departamentos también poseen sus propios requerimientos) y el plan es disminuir los medios de transmisión aéreos (por tendido) con el fin de beneficiar el ornato de la ciudad. Estos detalles implican limitaciones para la tecnología DWDM en Guatemala, debido a que encarece los proyectos, es decir, solo con el hecho de cambiar toda una instalación aérea por tendido en postes a una canalización subterránea, representa una gran inversión. Es así como se recae en el punto anteriormente mencionado: las inversiones en proyectos. Al presentarse complicaciones en la instalación del medio de transmisión, los costos de los proyectos suben y por lo tanto se necesita más mercado para realización de esta inversión.

Sin embargo, la municipalidad y las empresas de telecomunicaciones han tenido alternativas para disminuir estos costos. Por ejemplo, por parte de la municipalidad, se pretendía empezar a utilizar el proyecto *Poste Único*, el cual ordenaría infraestructura aérea para la conducción de servicios de transmisión de datos, internet, telefonía y televisión por cable. De esta manera se evitaría cambiar toda instalación aérea por subterránea; lastimosamente es un proyecto que todavía no es realizado. Otra alternativa que realizan las empresas por su parte, es el diseño de una red subterránea (aunque su costo sea mayor que una red aérea), tomando en cuenta las restricciones al realizar las canalizaciones o también se utilizan canalizaciones de la Municipalidad para uso común, sin descuidar condiciones técnicas y administrativas establecidas por la Municipalidad.

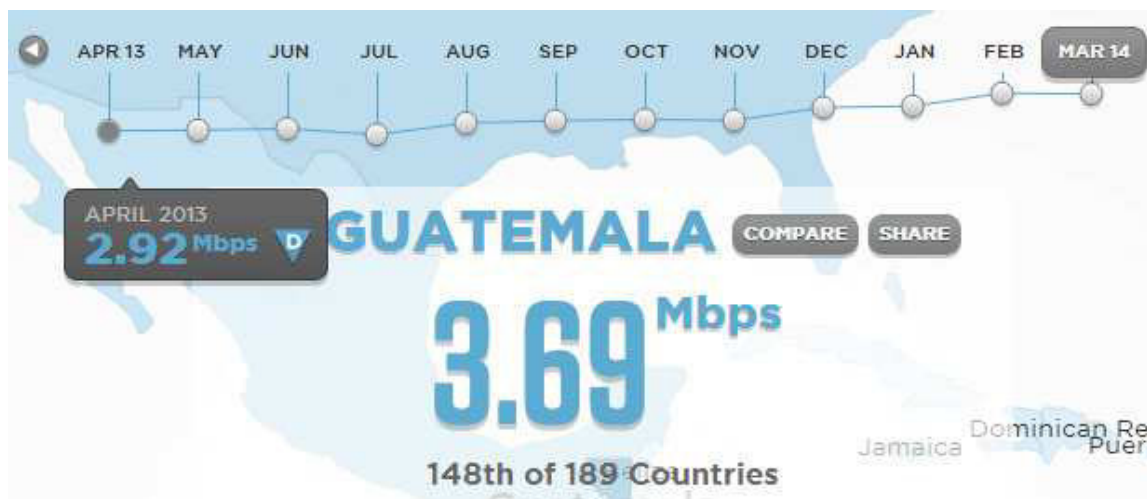
Ya se habló de las inversiones y de las autorizaciones necesarias en Guatemala como limitaciones de la implementación de la tecnología DWDM. En sí, respecto a la tecnología, se podría decir que no se tienen limitaciones destacadas. Actualmente en nuestro país, ya se cuenta con una red bastante buena de fibra óptica, los equipos utilizados para DWDM son de punta, los mantenimientos y el personal son altamente profesionales, se tiene cobertura en todo el país, se cubre la demanda y existe la posibilidad de crecimiento. Poco a poco, se irá dando la necesidad de ir mejorando algunos aspectos, como el cambio de equipos y el medio de transmisión, para el mejor desempeño y aprovechamiento óptimo de DWDM, cuando la demanda lo requiera.

F. Futuro y crecimiento

La tecnología DWDM es un concepto relativamente nuevo para Guatemala. Esto porque aún no se puede aprovechar al máximo todas las ventajas y soluciones que presenta esta tecnología. El crecimiento de la red óptica DWDM se reflejará con el aumento en la demanda de necesidad de transporte de datos. En la actualidad la demanda en Guatemala va en aumento, como puede observarse claramente en la Figura 41, presentando una velocidad de descarga de 2.92Mbps en abril del 2013 y una velocidad de 3.69Mbps en marzo del 2014 (según datos

obtenidos por *www.netindex.com*). Aún no se tiene la necesidad de un aumento notable en velocidades o anchos de banda, ya que la demanda es en su mayoría en la ciudad capital y relativamente baja en el interior del país. El crecimiento tecnológico de las áreas rurales implicará la necesidad de mejorar la red de fibra existente y también el tráfico de datos por todo el país. En la Figura 42, se presentan gráficas y se da la velocidad promedio de descarga en ciertas ciudades de Guatemala, ordenadas por volumen de pruebas.

Figura 41: Gráfica de velocidad de descarga en Guatemala (abril 2013 – marzo 2014)



www.netindex.com

Figura 42: Velocidades de descarga en ciudades de Guatemala



www.netindex.com

Figura 43: Velocidades de Proveedores de Servicios de Internet en Guatemala (ISPs)



www.netindex.com

Respecto al medio de transmisión, todavía nos encontramos en el proceso de sustitución de fibras G652.A por fibras G652.B o G652.D. A futuro se esperaría lograr sustituir toda la red de fibra en el país por el estándar G652.D o G653. Las ventajas como la baja atenuación en la banda de los 1550 nm y su baja dispersión las hacen una de las fibras más recomendables para la tecnología DWDM. Con estas sustituciones, con la correcta instalación y con el debido mantenimiento y cuidado de la fibra óptica, se pueden reducir costos y mejorar la implementación de la tecnología.

DWDM es una tecnología que ha evolucionado bastante en un corto período de tiempo. Este fenómeno puede apreciarse claramente en el incremento de canales en que una banda puede ser dividida. Hoy en día, se está utilizando, en Guatemala, equipo de hasta 96 canales basados en separaciones de 50 GHz. Y transportando señales con ancho de banda efectivo de 10Gbit/s, 40Gbit/s y 100Gbit/s, por canal. Estas soluciones están enfocadas a la escalabilidad, es decir, la posible expansión/crecimiento de capacidad en la línea según la demanda del mercado. Los equipos actualmente instalados en el país, no están siendo utilizados al 100%, ya que la demanda de transmisión de datos no lo requiere. Entonces, la demanda puede seguir creciendo, sin necesidad de cambios por el momento y, cuando el mercado lo requiera, los

equipos instalados tienen opción de expansiones, para generar más canales para la transmisión. En la actualidad, ya existen sistemas ultra-densos (UDWDM) con transmisión de 128 y 256 longitudes de onda a 10Gbit/s y 40Gbit/s por canal, pero aún no son necesarios en Guatemala. Por lo tanto, puede concluirse que DWDM es una tecnología que presenta amplio crecimiento y cubrirá las demandas de datos por varios años.

Otro aspecto de importancia respecto al crecimiento de la tecnología en Guatemala, son las topologías, con el fin de satisfacer las necesidades de redes regionales y metropolitanas. Actualmente, se cuenta con topologías de anillo y punto a punto, pero con el crecimiento en el mercado de móviles, bancos, corporaciones, etc. será necesario realizar anillos más pequeños, para lograr cubrir de mejor manera la demanda. También existe la arquitectura llamada "Mesh" (de acoplamiento) que promete ser la más robusta. Este desarrollo será permitido por la introducción de cros-conectores ópticos y switches, que en algunos casos sustituirán y, en otros, complementarán dispositivos DWDM fijos. Estas redes, por lo tanto, requerirán un alto grado de inteligencia de realizar las funciones de administración de protección y de ancho de banda. Las ventajas en flexibilidad y eficacia, sin embargo, son potencialmente grandes.

Por último, hoy en día, existen varias formas de transportar el tráfico de datos IP directamente sobre DWDM, esto con el fin de lograr disminuir la sobrecarga que suponen las capas de adaptación intermedias, ATM y SONET/SDH mayormente. Con el fin de proporcionar una administración de la red más sencilla y una provisión más rápida y flexible del ancho de banda para el tráfico IP, es importante conseguir un mecanismo para integrar el control de todas las capas de esta arquitectura de red heterogénea. Por otra parte, debido a la simple idea de que no es posible sustituir toda la infraestructura implantada en un corto período de tiempo por algún cambio de tecnología, los desarrollos en curso de diferentes cuerpos de estandarización, giran alrededor de esta idea, siendo GMPLS (General Multiprotocol Label Switching por sus siglas en inglés) la que más fuerza está adquiriendo. GMPLS soporta, no solamente dispositivos que realicen conmutación de paquetes, sino también dispositivos que realicen conmutación en el dominio del tiempo (TDM), longitud de onda (Λ) y espacio (fibra/puerto). Esta es la principal diferencia con MPLS, que es la tecnología en que está basada. Esta tecnología es el siguiente paso para mejor aprovechamiento de las ventajas que nos da DWDM. Hoy en día ya existe equipo especializado y proyectos enfocados a la implementación de GMPLS. Específicamente en Guatemala, ya se están empezando proyectos con esta tecnología y se espera que traiga ventajas y soluciones para la transmisión de datos.

VII. CONCLUSIONES

1. La fibra óptica es un medio de transmisión que hoy en día es sinónimo de rapidez y eficiencia, pero a pesar de estas ventajas, su utilización se ve limitada por el costo de instalación y la capacitación necesaria.
2. La tecnología de transmisión de multiplexación por división de longitud de onda (WDM), ha conseguido un incremento en la capacidad de transmisión, para redes metropolitanas y de larga distancia, aprovechando las características de la fibra.
3. Al ya existir una red de fibra óptica en Guatemala, la tecnología DWDM es altamente recomendable para empresas proveedoras de servicios de telecomunicaciones, ya que por medio de la misma red y con el equipo indicado es posible incrementar la capacidad de sus redes y además reducir sus costos.
4. Mayor parte de la fibra óptica instalada en Guatemala es G652 la cual es suficiente para el transporte de DWDM. Sin embargo, la tecnología se aprovecharía de mejor manera con un estándar G653.
5. En Guatemala ya se utilizan equipos de 44, 88 y 96 canales para transmisiones metropolitanas y es posible transportar señales con ancho de banda efectivo de 10Gbit/s, 40Gbit/s y hasta 100Gbit/s, por canal, dependiendo del equipo.
6. En Guatemala, los principales retos que se presentan en la tecnología DWDM son físicos, es decir, daño a las fibras ópticas y en corrección de la señal transmitida.
7. En las arquitecturas DWDM son necesarios los amplificadores cada cierta distancia, debido a las atenuaciones o dispersiones que se dan en la fibra, causada por impurezas, doblado de cables o empalmes realizados.
8. El principal factor que no permite el crecimiento y expansión de la tecnología DWDM en Guatemala son las inversiones, y para que las inversiones existan, debe haber mercado.
9. Entre las limitaciones se presenta Guatemala para la implementación de la tecnología DWDM se encuentran los permisos y autorizaciones de instalación de fibra.
10. Con la técnica DWDM se puede transmitir casi cualquier tipo de servicio en cada longitud de onda, dado que es la primera capa del sistema OSI; esta es sin duda, una de las ventajas principales de DWDM: la transparencia.

11. El crecimiento de la tecnología DWDM está estrechamente ligado al crecimiento en el aspecto tecnológico que presente el país. El crecimiento de la tecnología va a necesitarse cuando se presente una mayor demanda de transmisión de datos. Actualmente no se aprovecha al máximo todas las ventajas y capacidades que nos brinda DWDM.

VIII. RECOMENDACIONES

1. Analizar el factor de riesgo de posibles problemas en el medio de transmisión y del área de ampliación de red, a fin de tener un valor de disponibilidad de la red lo más realista posible.
2. Dar mantenimiento adecuado a las fibras ópticas y a los equipos, que estos factores son indispensables para el buen funcionamiento de la transmisión.
3. Si ya existe una red de fibra óptica en el país, analizar si todavía cumple con los requerimientos para tener una correcta transmisión de datos.
4. Hacer una proyección objetiva del crecimiento en el área en donde se planea extender la red de transmisión de datos, considerando desde la geografía del área hasta el crecimiento demográfico del lugar.
5. Efectuar análisis económico ya que puede representar un gasto inicial alto, pero con todas las ventajas que trae la fibra óptica y la tecnología DWDM, la remuneración es a corto plazo.
6. Investigar y conocer las tecnologías que pueden transportarse por medio de DWDM, porque nos permite el aumento de la capacidad de transmisión.

IX. BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar, A. (2008). *Medios de transmisión (fibra óptica, microondas)*. (Instituto Tecnológico de León) Recuperado el 30 de Julio de 2013, de <http://zedka.site90.net/medios%20de%20transmision.html>
2. Alcatel-Lucent. (2007). *Transmission Networks - WDM Technology - Fundamentals*. Documento perteneciente a Alcatel-Lucent.
3. Ángulo, J. R. (2007). *Análisis de los procesos básicos de un sistema de comunicaciones*. Medellín, Colombia: Universidad de Medellín.
4. Blake, R. (2004). *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. Estados Unidos: Cengage Learning Editores.
5. Chavarría, G., & Ramírez, C. (Diciembre de 2010). *Tecnología DWDM*. Recuperado el Septiembre de 2013, de <http://www.slideshare.net/gersonchavarriavera/redes-dwdm>
6. CISCO. (4 de Junio de 2001). *Introduction to DWDM Technology*. Recuperado el Septiembre de 2013, de http://www.cisco.com/application/pdf/en/us/guest/products/ps2011/c2001/ccmigration_09186a00802342cf.pdf
7. Coimbra, E. (Abril de 2011). *Transmisión de datos por fibra óptica*. Recuperado el Agosto de 2013, de <http://www.slideshare.net/edisoncoimbra/82-transmision-de-datos-por-fibra-ptica>
8. Córdoba, M. (2003). *Procesos de fabricación de fibras ópticas*. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Belgrano.
9. Curso Telnet. (Junio de 2005). *Curso de fibra óptica*. Recuperado el Agosto de 2013, de <http://www.telnet-ri.es/download/preventa/FO-COP-FTTH/CursoFOv1/CursoFO-1-Conceptos.pdf>
10. *Fibra óptica - Qué es y como funciona*. (5 de Febrero de 2013). (Aleben telecom) Recuperado el Agosto de 2013, de <http://www.alebentelecom.es/servicios-informaticos/faqs/fibra-optica-que-es-y-como-funciona>
11. *Fibra óptica*. (19 de noviembre de 2005). (Textos Científicos) Recuperado el Agosto de 2013, de <http://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica>

12. Figueroa, F. (2008). *Adecuación de una red de fibra óptica SDH, para soportar la nueva generación SDH*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
13. Flores, C. (2007). *Diseño de la Red de Transporte Alternativa para Tráfico internacional de TRANSELECTRIC S.A. con tecnología DWDM*. Sangolquí, Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército.
14. Galámez, M. (Agosto de 2009). *Criterios de selección para los amplificadores EDFA y Raman tipo "óptico-óptico" en DWDM*. Guatemala: Universidad de San Carlos.
15. García, A. (Noviembre de 2013). *Comunicaciones por Fibra Óptica*. Recuperado el Enero de 2014, de http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf
16. García, C. (31 de Octubre de 2012). *DWDM y CWDM*. Recuperado el Septiembre de 2013, de <http://sx-de-tx.wikispaces.com/DWDM+y+CWDM>
17. García, O. (2008). *Propuesta de criterios de selección, para la extensión de redes de datos, basadas en SDH y PDH*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
18. Gil, P., Pomares, J., & Candelas, F. (2010). *Redes y transmisión de datos*. España: Universidad de Alicante.
19. Gormaz, I. (2007). *Técnicas y procesos en las instalaciones en los edificios*. Madrid, España: Editorial Paraninfo.
20. Municipalidad de Guatemala (2010). *ACUERDO COM-001-08*. Obtenido de <http://mu.muniguate.com/index.php/component/content/article/78>
21. Herrera, E. (2003). *Tecnologías y redes de transmisión de datos*. México: Editorial LIMUSA, S.A.
22. Huidobro, M. (2006). *Redes y servicios de telecomunicaciones*. México: Editorial Paraninfo.
23. ITU-T. (9 de 2012). *Series G: Transmission systems and media, digital systems and networks*. Recuperado el Septiembre de 2013, de <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.Sup39-201209-l/es>

24. *La Fibra óptica (conceptos básicos)*. (Agosto de 2013). (Fibremex) Recuperado el Agosto de 2013, de <http://fibremex.com/fibraoptica/index.php?mod=contenido&id=3&t=3&st=4>
25. Marcano, D. (Agosto de 2012). *Elementos de una red DWDM*. Recuperado el Septiembre de 2013, de http://departamento.pucp.edu.pe/ingenieria/images/documentos/Capitulo_3_Elementos_de_una_Red_DWDM.pdf
26. Meza, J. (Junio de 2009). *CWDM Tecnología y aplicaciones*. Guatemala: Universidad de San Carlos.
27. Millán, R. (2002). *Redes DWDM metropolitanas*. Recuperado el Septiembre de 2013, de <http://www.ramonmillan.com/tutoriales/dwdmmetro.php>
28. Millán, R. (2003). *IP sobre WDM*. Recuperado el Septiembre de 2013, de <http://www.ramonmillan.com/tutoriales/ipsobrewdm.php>
29. Oliva, G., Salvado, J. G., & Penados, C. (2001). *Transmisión en fibra óptica*. Guatemala: Universidad Francisco Marroquín.
30. Orellana, C. (Enero de 2012). *Expansión de una red SDH con tecnología DWDM*. Guatemala: Universidad de San Carlos.
31. Pallo, J. P. (Diciembre de 2004). *Estudio de las redes ópticas de acceso DWDM y factibilidad de ser implementadas en la zona central del Ecuador*. Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.
32. Quintero, J. (s.f.). *Medios de transmisión*. Recuperado el 20 de Julio de 2013, de <http://www.slideshare.net/jjimiq/medios-de-transmision-no-guiados>
33. Santamaría, R. (Agosto de 2004). *Sistemas de Multiplexación CWDM*. Recuperado el Enero de 2014, de <http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb0413t.pdf>
34. Tábor, J. (Febrero de 2007). *IP sobre WDM*. Guatemala: Universidad de San Carlos.
35. Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. México: Pearson Educación.
36. Vieites, C. R. (Diciembre de 2003). *Implementación de un sistema DWDM en la red interurbana de Fibra óptica de Telcel BellSouth y evaluación teórica de equipos DWDM*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.

X. LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo:	Significado
°	Grados
bps	Bit por segundo
dB	Decibel
dB/Km	Decibel por kilómetro
Gbps	Gigabit por segundo
GHz	Giga Hertz
Kbps	Kilobit por segundo
KHz	Kilo Hertz
Km	Kilómetro
m	Metro
m/s	Metro por segundo
Mbps	Megabit por segundo
MHz	Mega Hertz
nm	Nanómetro
ps	Picosegundo
ps/nm	Picosegundo por nanómetro
Tbps	Terabit por segundo
THz	Tera Hertz
µm	Micrómetro

XI. GLOSARIO

Ancho de banda:	La diferencia entre la frecuencia más alta y la más baja de un canal de transmisión, medido en ciclos por segundo (Hertz). También se denomina ancho de banda a la cantidad de datos que se pueden transmitir en determinado período de tiempo, por un canal de transmisión, expresado en bits por segundo (bps).
Ángulo de aceptación:	Es el ángulo máximo medido desde el eje de la fibra para el cual el rayo incidente experimenta reflexión total.
Ángulo de refracción:	Ángulo geométrico imaginario que existe entre el plano de un objeto y la línea formado por un rayo de luz que tras caer sobre él, sale reflejada.
Ángulo de incidencia:	Ángulo que forma una línea recta al incidir en una superficie con la normal a la superficie en el punto de incidencia.
Apertura numérica:	Se refiere al rango de ángulos para los cuales la fibra acepta la luz de incidencia.
ATM:	Acrónimo para modo de transferencia asíncrona.
Booster:	Se puede denominar como un reforzador de la señal transmitida.
Cross-talk:	Se conoce también como ruido de diafonía. Se da cuando parte de las señales presentes en uno de ellos, considerado perturbador, aparece en el otro, considerado perturbado. La diafonía se mide como la atenuación existente entre el circuito perturbador y el perturbado.
CWDM:	(Coarse Wavelength Division Multiplexing) es multiplexación por división de ondas ligeras.

DCM:	Módulo de compensación de dispersión cromática.
DEMUX:	Abreviatura de demultiplexor.
DWDM:	(Dense Wavelength Division Multiplexing) es multiplexación por división de onda densa.
EDFA:	(Erbium-Doped Fiber Amplifier) es un amplificador que permite aumentar la señal óptica en ruta sin tener que convertirla a dominio eléctrico. Reduce de gran forma el costo de WDM.
Efecto Raman:	Cuando una porción muy pequeña de la luz que entra en un material sufre ligeros cambios de frecuencia (color), que son característicos del material e independientes de la frecuencia de la luz incidente.
FDM:	Multiplexación por división de frecuencia.
Fibra de aramida:	Tipo de fibra sintética, robusta y resistente al calor.
Frecuencias efectivas:	El ancho de banda es un concepto que es definido como el rango de frecuencias donde se concentra la mayor parte de la potencia de la señal, a estas frecuencias se les conoce como efectivas.
IEEE:	Corresponde a las siglas del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos dedicada a la estandarización.
IP:	Protocolo de internet. Conjunto de reglas que regulan la transmisión de paquetes de datos a través de internet.
ITU-T:	(International Telecommunications Union – Telecommunications Standards Sector) encargado de estandarizar la escala de longitudes de onda a usar en DWDM.
Kevlar:	Material cuya ligereza y resistencia a la rotura es excepcional. Son empleadas para la realización de neumáticos, velas náuticas,

chalecos antibalas y fibras ópticas.

MAN:	Red de área metropolitana.
Modelo OSI:	(OSI en inglés es Open System Interconnection). Es un marco de referencia para la definición de arquitecturas en la interconexión de los sistemas de comunicaciones. Consiste en un modelo de 7 capas.
NZDF:	(Non-Zero dispersión Fiber). Modelo de fibra óptica diseñado para superar los problemas de dispersión en la fibra.
OADM:	(Optical Add Drop Multiplexer) son acopladores de WDM con la capacidad de añadir o entregar lambdas en un punto intermedio de la red.
OXC:	(Optical Cross Connect) consiste en conmutar longitudes de onda a gran velocidad de una fibra a otra con base a las necesidades de tráfico.
MUX:	Abreviatura de multiplexor
PCS:	Sílice revestido con plástico.
Perfil de índice:	Es una representación gráfica del valor del índice refractivo, a través de la fibra. Existen dos tipos básicos de perfiles de índice: escalón y graduado.
Petrolato:	Producto derivado del petróleo, se obtiene a partir de residuos de la destilación del aceite que queda después de la evaporación del mismo.
Reflexión:	En óptica, proceso por el cual un rayo de luz que incide sobre una superficie y rebota. El ángulo con la normal a esa superficie que forman los rayos incidente y reflejado son iguales.

Refracción:	Es el cambio de dirección de una onda debido al cambio de velocidad. Esto ocurre cuando las ondas pasan de un medio con un índice de refracción dado a un medio con otro índice de refracción. Cambio de dirección de la luz.
SAN:	Redes de almacenamiento.
SCS:	Sílice revestido con sílice.
SMF:	(Standar Single mode fiber). Es un tipo de fibra monomodo, bastante utilizado en telecomunicaciones.
SNR:	(Signal to noise ratio). La relación señal a ruido se define como la proporción existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe. Es medida en decibelios.
SONET:	(Synchronous Optical Network), es un estándar a nivel físico que define el transporte de tráfico telefónico a través de enlaces de larga distancia de fibra óptica.
Tasa de bits (bit-rate):	Define el número de bits que se transmiten por unidad de tiempo a través de un sistema de transmisión digital o entre dos dispositivos digitales. Así pues, es la velocidad de transferencia de datos.
TDM:	(Time Division Multiplexing) tipo de multiplexación que se basa en división de señales entrantes por medio del tiempo.
WDM:	(Wavelength Division Multiplexer) multiplexación basada en división e las señales entrantes por medio de la longitud de onda a la que está trabajando la señal.