



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ENLACES WDM DE FIBRA ÓPTICA PARA EL
ANILLO METROPOLITANO ACADÉMICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO

P R E S E N T A :

GERARDO NAVA HEREDIA



TUTOR:

DR. RAMÓN GUTIÉRREZ CASTREJÓN

Junio 2009

DEDICATORIA

A mis padres por su amor, paciencia y apoyo.

Gracias por todo.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor el Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón por su dedicación y entusiasmo.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, UNAM por la beca otorgada a través del proyecto M-103008 del programa PAPIIT.

Gracias.

ÍNDICE

ABSTRACT	4
RESUMEN	5

CAPÍTULO 1

1.- INTRODUCCIÓN	6
1.1.- DIAGRAMA GENERAL DE TELECOMUNICACIONES	7
1.2.- MULTIPLEXAJE POR LONGITUD DE ONDA	12
1.3.- GRID COMPUTACIONAL	14
1.4.- MOTIVACIÓN Y OBJETIVO DEL PROYECTO	17
1.5.- BIBLIOGRAFÍA	21

CAPÍTULO 2

2.- ENLACE DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN FIBRA ÓPTICA	23
2.1.- DISPERSIÓN	23
2.2.- ATENUACIÓN	26
2.3.- EFECTOS NO LINEALES	29
2.4.- DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS	32
2.5.- BIBLIOGRAFÍA	37

CAPÍTULO 3

3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA	40
3.1.- TECNOLOGÍAS DE MULTIPLEXAJE UTILIZADAS	40
3.2.- ESTÁNDARES UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS	41
3.3.- EFECTO DE LA DISPERSIÓN	51
3.3.1.- PENALIZACIÓN POR DISPERSIÓN	54
3.4.- PRESUPUESTOS DE POTENCIA	55
3.5.- BIBLIOGRAFÍA	60

CAPÍTULO 4

4.- ANÁLISIS DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA	62
4.1.- TABLAS COMPARATIVAS	71
4.2.- INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	79
4.3.- COMPARACIÓN DE EQUIPOS y PRUEBAS	81
4.4.- SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN	84
4.5.- BIBLIOGRAFÍA	85

CAPÍTULO 5

5.- CONCLUSIONES	87
5.1.- TRABAJO FUTURO	88

ABSTRACT

The present work arises like part of the project that proposes the creation of a high performance Grid network in the metropolitan area of Mexico City; this Grid will be compound for three nodes belonging to the CINVESTAV, the UAM-I and the UNAM forming this way, what is known as Metropolitan Delta.

The nodes will be connected by means of point to point links to guarantee an efficient and sole right link and they will require the wide maximum of available band for the correct exploitation of the resources, for what they will be based on the use of optic fibers and they will use the WDM technology. The fibers that will form the links will be outstretched through the net of tunnels of the Sistema de transporte Colectivo (STC) Metro.

This thesis work poses the use of several configurations that contemplate: different types of fibers, of transmission speeds and of transmission capacities over the two WDM technology types. This analysis is carried out with the intention of determining the configurations that are feasible of implementing under the requirements of the project; helping this way, to select the best configuration.

RESUMEN

El presente trabajo surge como parte del proyecto que propone la creación de un Grid de alto rendimiento en la zona metropolitana de la Ciudad de México; dicho Grid estará compuesto por tres nodos pertenecientes al CINVESTAV, la UAM-I y la UNAM formando de esta manera, lo que se conoce como Delta Metropolitana.

Los nodos estarán conectados mediante enlaces punto a punto para garantizar una conectividad eficiente y exclusiva y requerirán el mayor ancho de banda disponible para el correcto aprovechamiento de los recursos, por lo que estarán basados en el uso de fibras ópticas y emplearán la tecnología WDM. Las fibras que formarán dichos enlaces estarán tendidas través de la red de túneles del Sistema de Transporte Colectivo (STC) Metro.

En este trabajo de tesis se plantea el uso de varias configuraciones que contemplan: diferentes tipos de fibras, de velocidades de transmisión y de capacidades de transmisión sobre los dos tipos de tecnología WDM. Dicho análisis se realiza con la intención de determinar las configuraciones factibles de implementar bajo los requerimientos del proyecto; ayudando de esta manera, a seleccionar la configuración más adecuada.

1.- INTRODUCCIÓN

La comunicación es la transferencia de información de un lugar a otro. La información es un patrón físico al cual se le ha asignado un significado comúnmente acordado.

El uso de la luz para propósitos de comunicación data de alrededor del año 800 a.C., donde señales de fuego fueron usadas para transmitir un limitado número de mensajes seleccionados; doscientos años después, mensajes de fuego al final de la conquista de Troya fueron transmitidos en lo que se conoció como "mensajería mediante señales luminosas" de Agamenón [1].

La desventaja principal de este tipo de sistemas es la incapacidad de transmitir toda clase de información, sólo un limitado número de mensajes seleccionados disponibles en común acuerdo por los usuarios.

Alrededor del año 200 a.C., el griego Polibio desarrolló un sistema de comunicación basado en antorchas capaz de transmitir caracteres en lugar de mensajes completos, la clave era una tabla de codificación que permitía transmitir hasta 24 caracteres. Un renacimiento del uso de las comunicaciones ópticas tuvo lugar en 1600 cuando se fabricó el primer telescopio [1].

En 1791, Claude Chappe desarrolló un sistema de comunicaciones ópticas basado en semáforos y que paso a paso se convirtió en una red que para 1844 incluía cerca de 500 estaciones y que se encontraba no sólo en Francia sino también en Bélgica, Italia, Alemania y Egipto.

Aunque este tipo de sistema de comunicación óptica fue muy exitoso, con el descubrimiento de la electricidad fue sustituido por otros sistemas ya bien conocidos.

En 1870 Jhon Tyndall demostró que la luz puede ser conducida en un chorro de agua como lo mostraban las leyes de Snell; a pesar de que fue hasta 1953 cuando Narinder Kapany desarrolló un filamento de vidrio con recubrimiento dando lugar así al nacimiento de las fibras ópticas; sin embargo la reducción de la señal luminosa o atenuación que presentaban estas fibras era muy alta y eso no las convertía en una opción viable como canal de comunicación, así lo señaló Charles Kao en 1966 [2].

Tal dificultad técnica fue superada en 1970 cuando Robert Maurer, Donald Keck y Peter Schultz fabricaron la primer fibra cuya atenuación era notablemente inferior que la anterior y continuaron trabajando para bajar aún más la atenuación al mismo tiempo que se perfeccionaban las técnicas de fabricación que permitieron establecerla como industria [2].

Así pues, la era moderna de las comunicaciones ópticas comenzó con el desarrollo de fibras ópticas con baja atenuación [1], proceso que fue seguido paralelamente por la comercialización de fuentes y receptores ópticos.

1.1.- DIAGRAMA GENERAL DE TELECOMUNICACIONES

El término telecomunicaciones se refiere al intercambio de información a través de cierta distancia; así que un sistema de telecomunicaciones transmite información de un lugar a otro [3].

El diagrama de bloques general de un sistema de telecomunicaciones consta de [4]:

- Fuente: representa la información que se va a transmitir y que puede consistir en datos, video y audio. Dicha información propiamente dicho, pasa por un transductor que la convierte en otra variable física a la salida del bloque.
- Transmisor: es un dispositivo que "prepara" y acopla a la señal entrante para que pueda viajar por el canal de comunicación.
- Canal de comunicación: es el medio físico a través del cual se va a propagar la señal que contiene la información.
- Receptor: recibe la señal transmitida y recupera la información de manera que sea lo más parecida posible a la enviada por el transmisor.
- Destino: es este bloque se presenta la información al usuario y a menudo es necesario regresar la señal a su forma física original mediante un transductor.

La siguiente Figura es un diagrama típico conocido como "enlace punto a punto" y dio origen a las telecomunicaciones modernas donde tres o más nodos (cada una de los puntos terminales del sistema) se involucran en el proceso de la comunicación y es necesario crear una red¹ para conectarlos.



Figura 1.- Diagrama de bloques de un sistema general de telecomunicación.

¹ Conjunto de nodos interconectados de diversas maneras.

Capítulo 1.- INTRODUCCIÓN

En el canal de comunicación y en algunos de sus elementos, la señal se puede ver influenciada por varios fenómenos, tales como [5]:

- Pérdidas o atenuación: es la disminución de la potencia de la señal que contiene la información, este efecto se compensa con amplificadores repartidos a lo largo del trayecto que tienen el efecto contrario.
- Distorsión lineal: es la alteración de la forma de la señal debido a que el canal de comunicación no tiene una respuesta a la frecuencia plana, de modo que opera generalmente como un filtro pasa bajas o paso banda, eliminando componentes espectrales importantes. Este efecto se compensa con ecualizadores de ganancia.
- Interferencias: consiste en la alteración de la señal que transporta la información por medio de otras señales. Este fenómeno se reduce con adecuados blindajes de los canales de comunicación.
- Ruido: se debe a la generación de señales totalmente aleatorias dentro del sistema de telecomunicaciones; por dicha razón, el ruido se produce literalmente en todos los componentes del sistema.
- Intromisión: consiste en tomar las señales del sistema de telecomunicaciones sin autorización.

Actualmente se está produciendo mucha más información que en épocas anteriores y mientras más información se genere, mayor va a ser la necesidad de entregarla en el lugar correcto, en el momento justo y en la forma adecuada; es por ello que la transmisión digital donde la información es transportada por señales que tienen un número finito de valores discretos² está desplazando a la analógica³ [5] ya que las señales digitales son más confiables a pesar de que requieren mayor capacidad del canal para transmitirse.

Lo anterior aunado a que los avances en las tecnologías de telecomunicaciones han disparado una demanda global por ancho de banda; una vez que se alcanzan los Kbits⁴ la demanda es de Mbits, y cuando se tienen Mbits se requieren Gbits. Por ejemplo, el consumo masivo de información debido al desarrollo de computadoras de alta velocidad y el crecimiento de Internet, pueden llegar a saturar la capacidad de algunos sistemas de telecomunicación existentes [6].

² Las más utilizadas son las binarias que tienen sólo dos valores (1 y 0 lógicos) llamados bits.

³ En la cual las señales pueden tener un número infinito de valores dentro de un rango finito.

⁴ La cantidad de información que se transmite (bit rate) se mide en bits por segundo, siendo frecuente el uso de prefijos.

Capítulo 1.- INTRODUCCIÓN

La capacidad de un sistema para transportar información depende del ancho de banda⁵ del canal de comunicación, ya que este limita la frecuencia de las señales que portan la información.

Por otra parte, frente al limitado rango de frecuencias que tienen los sistemas de microondas y los sistemas que utilizan el cobre como medio de transmisión y dada la susceptibilidad al debilitamiento que presentan las ondas de radio; los sistemas ópticos presentan muchas ventajas que los convierten en un sistema de telecomunicaciones ampliamente utilizado.

Los sistemas ópticos utilizan señales luminosas que son guiadas por filamentos flexibles llamados fibras ópticas y la luz dentro de todas las posibles señales factibles para transportar información es la que tiene la mayor frecuencia, así que el usarla como portadora brinda un gran ancho de banda; sin embargo, el uso de las fibras ópticas como canal de comunicación presenta además las siguientes ventajas [7]:

1. Menores pérdidas de potencia: debido a que hoy en día las fibras ópticas tienen una atenuación muy baja y esto evita en muchos casos el uso de amplificadores.
2. Inmunidad a la interferencia electromagnética: dado que la fibra óptica es totalmente dieléctrica (no es buen conductor de la electricidad) y además no genera interferencia en otros equipos de comunicación.
3. Dimensiones reducidas y bajo peso: puesto que esas son características propias de la fibra óptica y hacen que la instalación de cableado sea relativamente sencilla
4. Seguridad: ya que es prácticamente imposible interceptar la señal que viaja por una fibra óptica sin ser detectado.
5. Ancho de Banda: el gran ancho de banda que se ha mencionado se puede incrementar notablemente si se utilizan técnicas de multiplexaje (ver Capítulo 1.2).

Un sistema de telecomunicaciones óptico o de fibra óptica como también se le conoce, es un tipo particular de un sistema de telecomunicaciones y en el proceso completo de comunicación se incluyen tanto componentes electrónicos como ópticos.

Los componentes electrónicos manejan la información ya sea en su forma original (como proviene de la fuente) o en la eléctrica, mientras que los dispositivos ópticos preparan y transmiten las señales ópticas y son los que propiamente constituyen el sistema de telecomunicaciones óptico.

⁵ Rango de frecuencias dentro del cual se pueden transmitir señales.

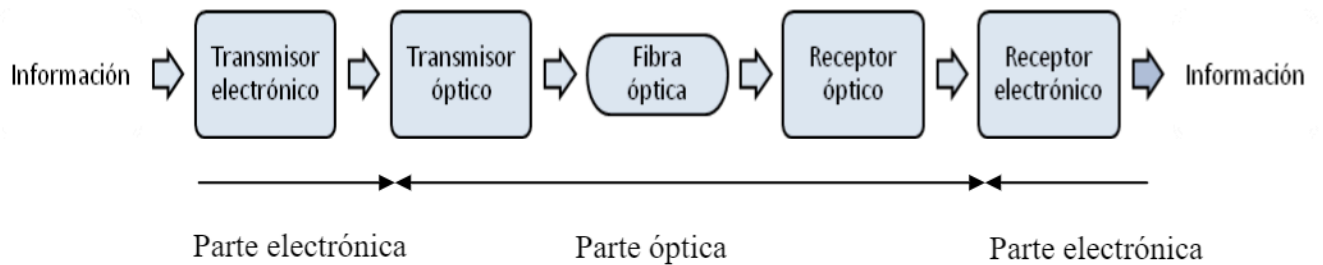


Figura 1.1.- Diagrama de un sistema de telecomunicaciones óptico.

El diagrama de bloques de la Figura 1.1 muestra como la información entra a un transmisor electrónico donde es convertida en señales eléctricas y adecuada para ser transmitida; después esta señal llega a un transmisor óptico y es convertida en pulsos de luz (señal óptica) para posteriormente ser transmitida sobre la fibra óptica.

En el extremo del receptor, un detector óptico convierte la señal óptica recibida en eléctrica, la cual es procesada por el receptor electrónico para extraer la información y presentarla en el formato correspondiente.

Los elementos de un sistema de telecomunicaciones óptico son [2]:

- Transmisor: la función primordial del transmisor es convertir las señales de eléctricas a ópticas mediante una fuente de luz. En la actualidad, los sistemas de telecomunicaciones ópticas utilizan como fuente de luz LED's (light emitting diodes) o LD's (laser diodes) [2]; ambas deben cumplir algunos requerimientos tales como: facilidad para modularlas⁶ a determinadas velocidades de transmisión, gran eficiencia de acoplamiento a la fibra óptica, potencia óptica de salida adecuada a la aplicación, confiable, ligera y de dimensiones razonables.

Una característica muy importante de las fuentes ópticas es el rango de longitudes de onda sobre las cuales está distribuida su potencia, es decir, el ancho espectral de la fuente $\Delta\lambda$ (generalmente medido en nm) que se define como la anchura del pulso medida a la mitad de la potencia máxima (FWHM). También es frecuente utilizar el ancho espectral rms σ_λ que se relaciona con el FWHM de la siguiente manera [3]:

$$\sigma_\lambda = \frac{\Delta\lambda}{2.3548} \quad (1)$$

⁶ Procedimiento en el cual se incorpora la señal que contiene la información a otra señal.

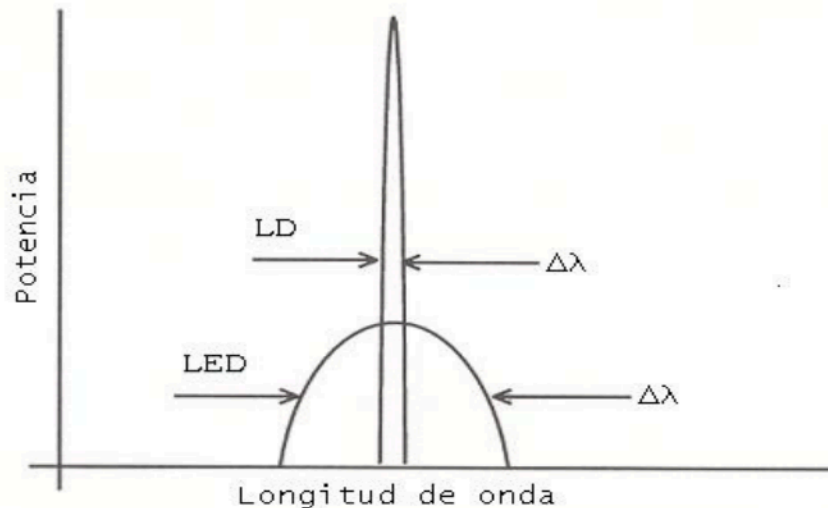


Figura 1.2.- Anchos espectrales de LD's y LED's.

El ancho espectral de la fuente tiene gran impacto en el ancho de banda del sistema ya que si este es grande, el ancho de banda se reduce y como lo muestra la Figura 1.2 los LD's tienen ancho espectral mucho menor que los LED's y es por ello que son utilizados con la tecnología WDM⁷.

- Fibra óptica: es un filamento transparente y flexible generalmente fabricado a partir de un tipo de vidrio llamado sílice y cubierto con una estructura protectora, que transmite las señales ópticas del transmisor al receptor y que se acopla a ellos a través de conectores.
- Receptor: se encarga de convertir la señal óptica proveniente de la fibra óptica en eléctrica por medio de un fotodetector que no es más que un dispositivo que transforma la luz incidente en una corriente eléctrica. El desempeño de un sistema digital está caracterizado por medio de la tasa de bits erróneos⁸ que se define como:

$$BER = \frac{\# \text{ bits erróneos}}{\# \text{ totalde bits}}$$

Un parámetro importante, indicativo del desempeño del receptor es su sensibilidad, la cual es definida como la mínima potencia óptica promedio que puede ser leída para una cierta tasa de bits erróneos determinada.

Cuando los sistemas de telecomunicaciones lo requirieren, es necesario el uso de regeneradores o amplificadores.

⁷ Ver Capítulo 1.2

⁸ Conocida como BER (bit error rate o ratio).

Los regeneradores convierten las señales ópticas en eléctricas para manipularlas y reconstruirlas (es por ello que compensan tanto atenuación como distorsión⁹) para después convertirlas nuevamente en señales ópticas y transmitir las.

Los amplificadores ópticos sólo compensan las pérdidas de potencia pero sin la necesidad de convertir las señales ópticas en eléctricas; los amplificadores ópticos más utilizados en los sistemas actuales son los llamados EDFA's (Erbium Doped Fiber Amplifier) y tienen la particularidad de poseer un ancho de banda de alrededor de 30 nm, en el rango de 1530 nm a 1560 nm que como se verá en el siguiente capítulo, es el rango donde operan los sistemas DWDM [6].

En este trabajo, como se verá en el Capítulo 3.4, no fue necesaria la utilización de este tipo de dispositivos ya que debido a las características de los enlaces no requieren ningún tipo de compensación.

1.2.- MULTIPLEXAJE POR LONGITUD DE ONDA

Se puede lograr un dramático incremento en la capacidad de transporte de información de una fibra óptica si se transmiten simultáneamente muchas señales a través de la misma fibra, esto es conocido como multiplexaje por división en longitud de onda (WDM) ya que aprovecha el gran potencial de ancho de banda con que cuenta la fibra óptica.

La tecnología de WDM está basada en el siguiente principio físico fundamental: varios rayos de luz con diferente longitud de onda se pueden propagar simultáneamente sobre el mismo camino óptico sin interferirse unos con otros, es decir WDM divide el ancho de banda de la fibra óptica en muchos segmentos y en cada uno, viaja una señal.

Principio de operación de un sistema WDM:

Varios transmisores generan una señal a determinada longitud de onda, todas esas señales son combinadas en una sola señal por un multiplexor y esa señal es transmitida sobre la misma fibra óptica. En el extremo del receptor un demultiplexor se encarga de separar las diferentes longitudes de onda (también llamados canales) que forman la señal y a cada una las dirige a los receptores; esto se ilustra gráficamente en la Figura 1.3.

⁹ Ver Capítulo 2.1

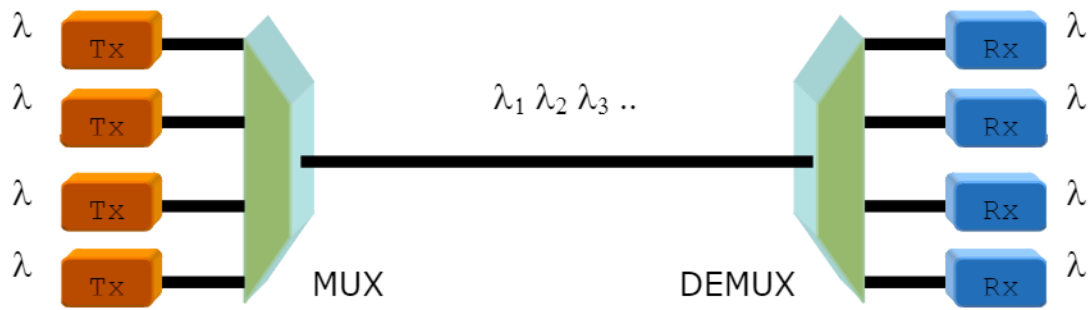


Figura 1.3.- Proceso de multiplexaje y demultiplexaje en WDM.

Dependiendo del espaciamiento entre dos longitudes de onda¹⁰ adyacentes, se puede clasificar a la tecnología WDM, según lo establecido en las recomendaciones G.694.1 y G.694.2 de la ITU-T respectivamente, en [9]:

- Multiplexaje denso por división en longitud de onda (DWDM)

El espacio intercanal es menor o igual a 200 GHz (≈ 1.6 nm). Se le dio ese nombre debido a la gran cantidad de longitudes de onda que puede transportar, usualmente utiliza el rango de 1530 nm a 1625 nm (bandas C y L como se verá posteriormente).

- Multiplexaje grueso por división en longitud de onda (CWDM)

Se le dio ese nombre porque el número de longitudes de onda que puede transportar es mucho menor que DWDM, siendo el espacio intercanal de 20 nm* y utiliza el rango de 1260 nm a 1625 nm (bandas O, E, S, C y L).

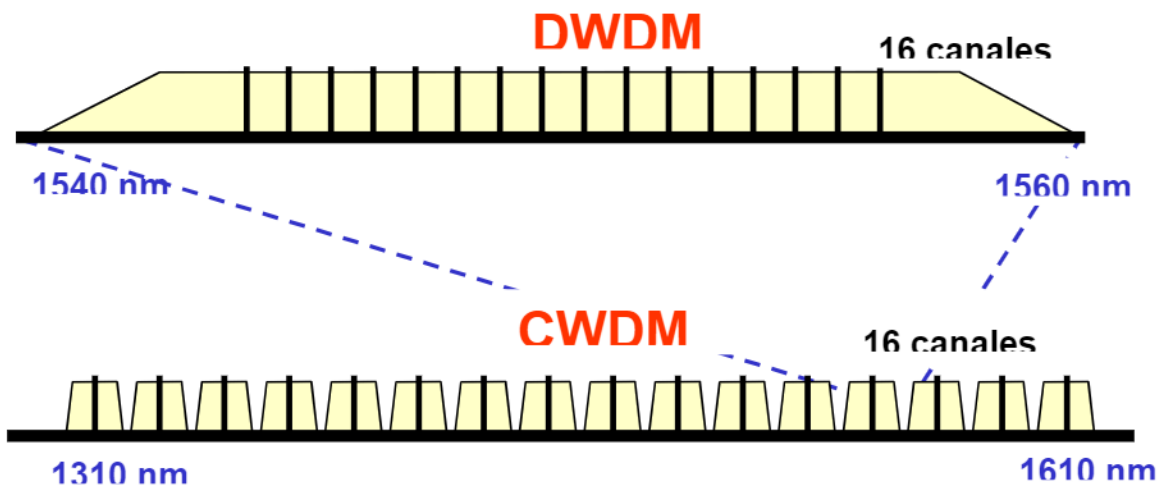


Figura 1.4.- Ejemplo de una distribución de canales en DWDM y CWDM

¹⁰ La relación que existe entre la long. de onda y la frecuencia es: f [THz] = $299792 / \lambda$ [nm].

Capítulo 1.- INTRODUCCIÓN

Como muestra la Figura 1.4, el mayor espaciado intercanal que presenta CWDM disminuye mucho su capacidad de transporte comparada con la que tiene DWDM, pero permite utilizar fuentes de luz menos precisas, filtros de banda ancha y en general, componentes menos complejos y caros siendo una tecnología idónea para redes empresariales y redes metropolitanas de corta distancia ya que los amplificadores ópticos trabajan sólo por pequeñas regiones y no es posible amplificar ópticamente una señal de un espectro tan amplio.

Por otro lado, DWDM es utilizado en sistemas que requieren de una gran capacidad de transmisión y dado que existen amplificadores ópticos como los EDFA's que operan en la banda C, es posible transmitir a través de largas distancias; mientras los sistemas DWDM de larga distancia soportan canales de hasta 40 Gb/s, la mayoría de los sistemas DWDM metropolitanos por lo general soportan hasta 10 Gb/s y los CWDM comerciales tienen su límite en 2.5 Gb/s [10].

La fibra óptica tiene la posibilidad de operar en un amplio rango de frecuencia y dado que es importante identificar que regiones son óptimas para utilizarse, se han establecido las regiones o bandas de operación para los sistemas ópticos que se muestran en la siguiente tabla [11]:

BANDA	DESCRIPCIÓN	INTERVALO [nm]
O	Original	1260 a 1360
E	Extendida	1360 a 1460
S	Corta (Short)	1460 a 1530
C	Convencional	1530 a 1565
L	Larga	1565 a 1625
U	Ultralarga	1625 a 1675

1.3.- GRID COMPUTACIONAL

Actualmente la ciencia ha avanzado notablemente, y para su buen desarrollo se requiere que la tecnología complementa estos avances de manera que el procesamiento de la información sea más ágil, es así que se necesita una tecnología que brinde más rapidez en la obtención de resultados.

En los últimos años han surgido nuevos sistemas computacionales de alto rendimiento, perfeccionándose de tal manera que permiten cubrir las necesidades de diversos usuarios; dichos sistemas varían en la manera que utilizan tanto procesadores como memoria y en la forma de interconectarlos [12]. El Grid Computacional es una tecnología nueva e innovadora, concebida a mediados del año 1990; la idea detrás del Grid es la de utilizar de forma coordinada todo tipo de recursos (cómputo, almacenamiento, dispositivos y

aplicaciones específicas) desde cualquier nodo que la forma, pudiendo incluso ser estos heterogéneos y encontrarse conectados mediante redes de área extensa (ver Figura 1.5) [13]. Con esto se busca enfrentar problemas a los que solo se enfrentaban los grandes supercomputadores de entidades gubernamentales, universidades o grandes empresas multinacionales; y aún más, la idea es tener una cierta variedad de nodos en todo el mundo lo que conformaría una computadora mundial (el Grid Mundial) en donde se podrían resolver tareas muy intensivas.

Las características generales de los Grids son las siguientes [13]:

- Capacidad de balanceo: no habría necesidad de calcular la capacidad de los sistemas en función de los picos de trabajo, ya que en esos casos se puede enviar la carga de trabajo a otras máquinas disponibles en el Grid.
- Alta disponibilidad: con la nueva funcionalidad, si un servidor falla, se reasignan los servicios en los servidores restantes.
- Reducción de costes: Con esta arquitectura los servicios son gestionados por "lotes de recursos". Ya no es necesario disponer de "grandes servidores" y se puede hacer uso de componentes de bajo costo.

De manera general hay tres formas básicas de aprovechar los recursos computacionales mediante el Grid [14]:

Computación de alto rendimiento

Para aplicaciones que pueden procesarse en paralelo, el Grid ofrece la posibilidad de ejecutar una tarea que demande poder de procesamiento en arreglos de computadoras conectados en red; en este aspecto, el Grid representa una significativa ventaja en cuanto a costo y rendimiento se refiere comparado con supercomputadoras convencionales resultando así accesible para más empresas y universidades.

La mayoría de aplicaciones del Grid caen dentro de este tipo, debido precisamente a que esta surgió por la necesidad de encontrar soluciones más efectivas y económicas en problemas de ciencia e ingeniería que requerían computación de alto rendimiento. Además, es precisamente este tipo de aplicación la que es de interés para el trabajo que aquí se presenta. Entre otros, el Grid ha sido enfocado a resolver problemas en los siguientes campos:

- Modelado y simulación climatológica y oceanográfica.
- Procesamiento e interpretación de datos sísmicos.
- Modelado y simulación de la calidad del medio ambiente.
- Modelado de mercados financieros.
- Simulación y verificación de diseños electrónicos y mecánicos.

Capítulo 1.- INTRODUCCIÓN

También es importante mencionar que es esta clase de Grid la que demanda el mejor desempeño de la red que conecta los distintos elementos ya que en estas aplicaciones se involucran intensos procesos de intercomunicación que son muy sensibles al ancho de banda y latencia, es decir, el tiempo que le lleva a la señal propagarse a lo largo del enlace.

Agrupación de datos y colaboración

En este aspecto, el Grid puede realizar una "integración virtual" de datos donde se pueda acceder a información ubicada en diferentes fuentes como en cualquier servicio de datos, evitando así que el usuario trate con la complejidad que la ubicación de la fuente de la información implica.

Con esta "integración virtual" los datos permanecen en el lugar donde se encuentra la fuente, sin interrupción de aplicaciones que se estén ejecutando localmente o políticas de administración de datos.

La integración de datos de múltiples fuentes facilita un extenso conjunto de aplicaciones tales como: herramientas de análisis de mercadotecnia, aplicaciones de servicio al cliente, datos de aplicaciones geológicas, etc. Debido a que se puede acceder a dichos recursos como un servicio en la red con un mínimo de modificaciones. El Grid también puede hacer posible que varios recursos sean habilitados para trabajar en colaboración de manera que el sistema virtual creado, ofrezca una gran variedad de recursos a los usuarios.

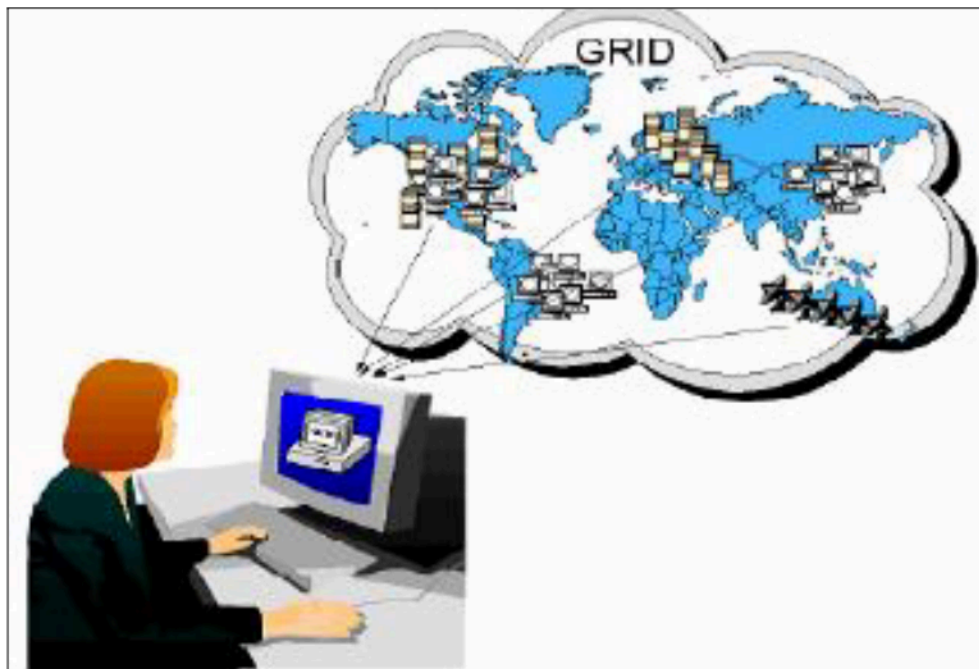


Figura 1.5.- Mediante el Grid se puede hacer uso de recursos ubicados en cualquier nodo.

Asignación de recursos y optimización

El Grid permite compartir de manera flexible el poder de procesamiento y almacenamiento, mejorando así la utilización de los recursos disponibles ya que por ejemplo, tradicionalmente se han asignado computadoras a cierto grupo de usuarios o para ejecutar determinadas aplicaciones y cuando no está en uso se está desaprovechando dicho recurso; ahora mediante el Grid se puede hacer uso de recursos disponibles.

Con la creación de Grid's se busca enfrentar problemas a los que sólo se enfrentaban las grandes supercomputadoras, y aún más, la idea es tener una cierta variedad de nodos en todo el mundo lo que conformaría un Grid Mundial en donde se podrían resolver tareas muy intensivas [12]. El Grid permite que instituciones de menos recursos tengan acceso a poder computacional de forma remota, o que diversas instituciones puedan integrar sus recursos computacionales para obtener uno más poderoso.

1.4.- MOTIVACIÓN Y OBJETIVO DEL PROYECTO

Los avances recientes en la tecnología computacional permiten a investigadores, de manera individual o grupal, acceder con presupuestos no muy elevados a recursos de cómputo razonables para la ejecución de sus proyectos de investigación. Sin embargo, la capacidad de procesamiento que se puede alcanzar con estos recursos no es, y nunca será suficiente para abordar problemas científicos y tecnológicos de gran envergadura como los implícitos en los estudios contemporáneos de sistemas complejos tanto estáticos como dinámicos.

El tratamiento en un tiempo razonable de estos grandes retos requiere de un número muy considerable de procesadores, por arriba de las varias centenas, y de elevadas capacidades de almacenamiento masivo permanente, del orden de los Terabytes [15]. A lo largo de los últimos 20 años, la comunidad científica nacional, particularmente la perteneciente a la región centro, usuaria del cómputo de alto rendimiento, ha crecido tanto en número de investigadores como en los recursos computacionales que demandan los programas de las distintas especialidades, esta situación resulta en la imposibilidad de cubrir los requerimientos con los recursos informáticos actuales a nivel nacional [15].

Por lo tanto, se ha propuesto la creación de una Delta Metropolitana (ver Figura 1.6) de cómputo de alto rendimiento mediante la conformación de un Grid de capacidad excepcional consistente en tres nodos robustos, para remediar el atraso que existe en la infraestructura de cómputo de alto rendimiento en la región central de nuestro país y proporcionar acceso al

Capítulo 1.- INTRODUCCIÓN

mismo tiempo a posibles usuarios de todo el país ya que es un servicio indispensable y prioritario para el desarrollo de muchas líneas de investigación científica y tecnológica. Cada uno de estos nodos tendrá más de 1000 procesadores y estarán instalados en los centros de cómputo del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, de la Universidad Autónoma Metropolitana y de la Universidad Nacional Autónoma de México; todas ellas instituciones ubicadas dentro del Distrito Federal [15].

La conectividad en la Delta Metropolitana consistirá de enlaces punto a punto entre cada uno de los centros de cómputo de las instituciones mencionadas, de tal manera que la conectividad entre ellos sea independiente del tendido de la red de cada institución participante, esta independencia asegurará una conectividad eficiente y exclusiva de las tareas relacionadas con el cómputo de alto rendimiento.

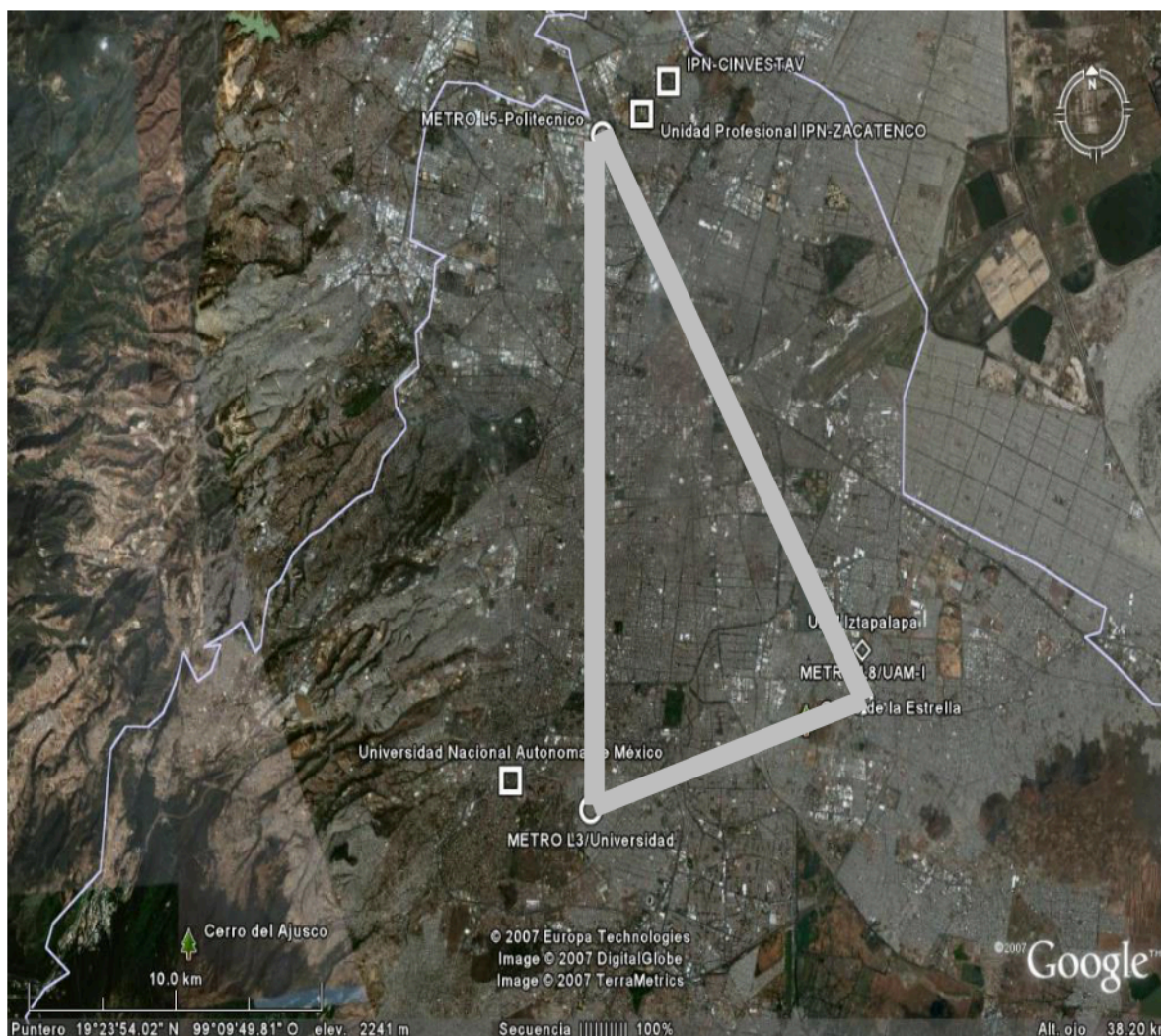


Figura 1.6.- Topología física de Delta Metropolitana.

Capítulo 1.- INTRODUCCIÓN

Dichos enlaces estarán basados en el uso de la fibra óptica y se planea utilizar la tecnología de Multiplexaje por Longitud de Onda (ya sea CWDM o DWDM) para incrementar aún más su capacidad, para ello, se pretende utilizar la red del Sistema de Transporte Colectivo (STC) Metro, tendiendo la fibra sobre las canaletas que se extienden a lo largo de los túneles.

La selección de las rutas se hace considerando las distancias de cada enlace, los cambios de Línea dentro del STC Metro y además, también se consideró que hubiera una estación cercana a cada una de las instituciones para que los tramos que van de las respectivas estaciones del Metro a los correspondientes centros de cómputo fueran lo más cortos posible como se observa en la Figura 1.7.

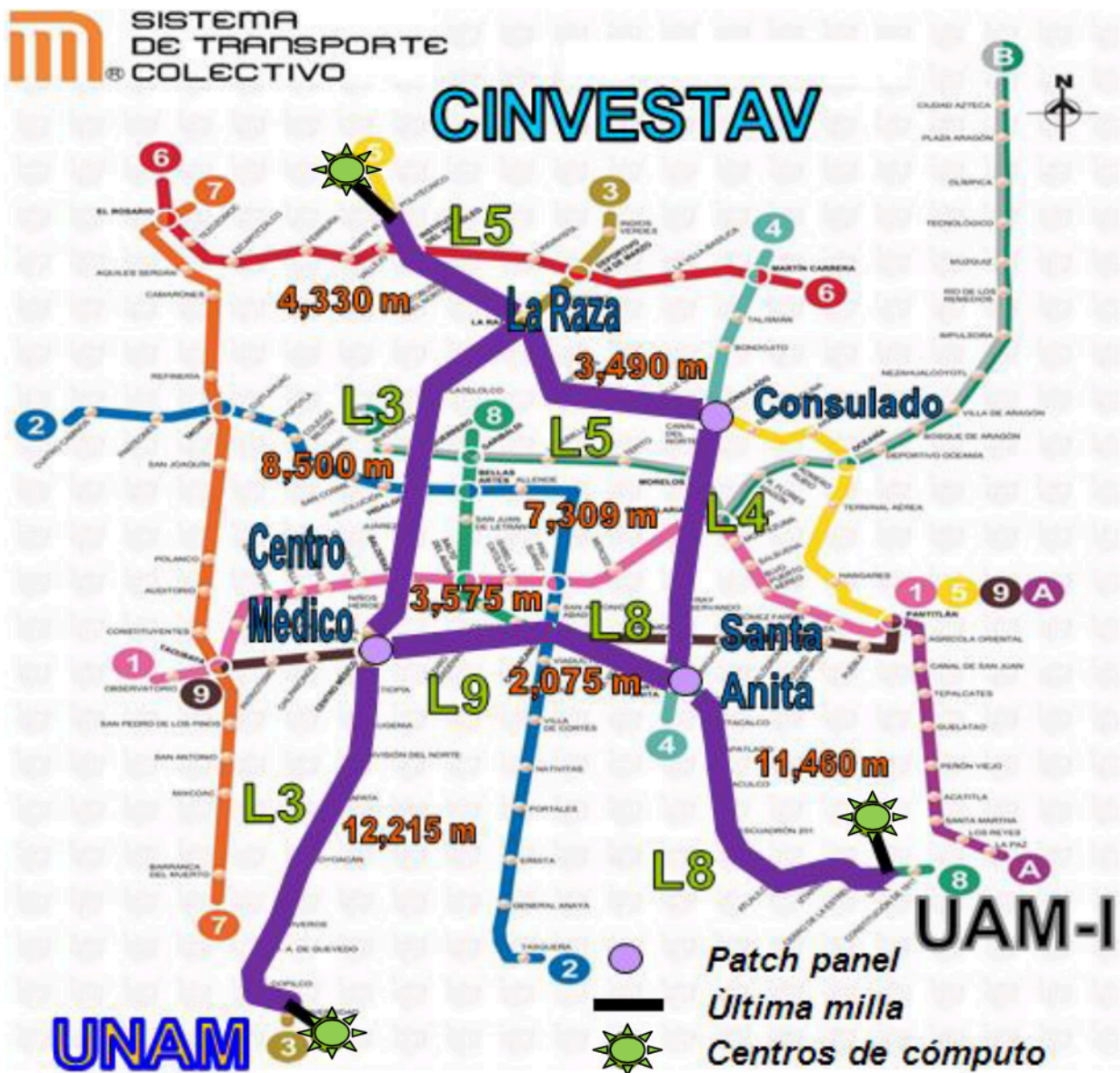


Figura 1.7.- Detalle de la Topología física de la Delta Metropolitana.

Capítulo 1.- INTRODUCCIÓN

Para llevar a acabo la realización de los enlaces de este proyecto, es necesario por una parte, conocer las configuraciones que ofrecen las distintas tecnologías de multiplexaje antes mencionadas, determinar el tipo de fibra óptica que se va a emplear y además establecer los parámetros del equipo que se adecuen a las condiciones establecidas por los requerimientos del proyecto.

Así pues, el objetivo de este trabajo de tesis es realizar el análisis y diseño de los enlaces de fibra óptica que formarán parte del anillo académico metropolitano de la Ciudad de México (Delta Metropolitana).

Los resultados obtenidos en dicho análisis brindarán información muy valiosa relacionada con los distintos elementos que forman los enlaces; específicamente respecto al tipo de fibra, a la tecnología de multiplexaje, a la capacidad del sistema, a la velocidad de transmisión, al intervalo de longitudes de onda utilizado y a los parámetros del equipo de telecomunicaciones óptico a utilizar; mostrando en cada caso, la factibilidad de implementar diversas configuraciones planteadas conforme a las características del proyecto. Para ello, se procedió de la siguiente manera:

Primeramente se realizó el análisis de los enlaces considerando la viabilidad de utilizar varias configuraciones que comprenden los elementos que forman los enlaces mencionados en el párrafo anterior. Con los datos recabados, se elaboraron tablas comparativas donde están presentes los parámetros determinantes que caracterizan el enlace tales como: la atenuación y el coeficiente de dispersión, además de los elementos ya mencionados.

Con base en los resultados presentados en las tablas comparativas se realiza una interpretación de los resultados donde se resaltan las características de la configuración utilizada y se determinan aquellas cuya utilización es factible y cumplan con las condiciones y expectativas del proyecto, mostrando diversidad de soluciones. Inclusive, en algunas de las configuraciones que no resultaron viables se sugieren algunas modificaciones que permitirían utilizarlas.

Posteriormente, se llevaron a cabo una serie de pruebas donde se utilizaron equipos de empresas dedicadas a las telecomunicaciones ópticas; de esta serie de pruebas se pudieron extraer algunos datos de interés para el análisis desarrollado en el presente trabajo y con ellos, se realizaron comparaciones con los resultados obtenidos; tales comparaciones dan solidez a los mismos.

De esta forma se contribuye a la realización del proyecto mencionado, ya que los resultados del análisis realizado y los datos recabados de las pruebas efectuadas, permitirán tener una visión general de la novedosa tecnología involucrada y a su vez, elegir aquella configuración que técnicamente resulte más adecuada para implementarse en los enlaces que formaran parte de la Delta Metropolitana.

1.5.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] Franz, J.H. and Jain V.K. *Optical Communications Components and Systems*. Narosa Publishing House, 2000.
- [2] Mynbaev, D. K. and Lowell L. Scheiner. *Fiber-Optic Communications Technology*. Prentice Hall, 2001.
- [3] Agrawal, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*, Second Edition. Jhon Wiley & Sons, Inc. 1997.
- [4] Gibson, J. D. *Principles of Digital and Analog communications*, Second Edition. Macmillan Publishing Company. 1993.
- [5] Ibarra M. P. Apuntes del curso: *Comunicaciones Digitales*. Facultad de Ingeniería, UNAM, 2006.
- [6] *Introducción a DWDM*.
Escuela de Ingeniería Electrónica, Universidad Nacional de Rosario.
<http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~comunica/TBAApub/DWDM.doc>.
- [7] Quevedo, R. I. y Miguel S. López. *Principios de Teoría de las comunicaciones*. IPN, 1998.
- [8] Green, D. L. *Fiber Optic Communications*. CRC Press, Inc., 1993
- [9] Gutiérrez Castrejón, R. *Hacia un sistema de telecomunicaciones completamente óptico*. Instituto de Ingeniería, UNAM, 2005.
- [10] *CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)*.
Soporte de Redes Ópticas. Ericsson España.
<http://www.ramonmillan.com/documentos/cwdm.pdf>
- [11] *Nuevas Tecnologías de Fibras Ópticas y su Implementación en Redes Nacionales*.
Seminario Nacional de Telecomunicaciones y Congreso Internacional de Telecomunicaciones, SENACITEL
<http://antigua.senacitel.cl/downloads/senacitel2004/tt29.pdf>
- [12] *Computación Distribuida*.
Grupo de Electricidad y Sistemas Electrónicos. Universidad Técnica Particular de Loja.
<http://sig.utpl.edu.ec/download/data/computacion%20distribuida.PDF>

- [13] *Clustering y Grid Computing*.
Escuela de Informática. Universidad Nacional de Trujillo.
<http://www.seccperu.org/files/Clustering%20and%20Grid%20Computing.pdf>

- [14] *Building Scalable, High Performance Cluster and Grid Networks: The Role of Ethernet*.
2006 Force 10 Networks, Inc.

- [15] Protocolo del proyecto "Delta Metropolitana de Cómputo de Alto Rendimiento", CONACYT, 2007

- [16] ITU-T Recommendation G.694.1, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid," June 2002.

- [17] ITU-T Recommendation G.694.2, "Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid," December 2003.

- [18] Kartalopoulos, S. V. *DWDM Networks, Devices, and Technology*. IEEE Press, 2003.

- [19] Spirit, D. M. and M. J. O'Mahony. *High Capacity Optical Transmission Explained*. Jhon Wiley & Sons, 1995.

- [20] *Laseres para WDM*.
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
<http://www-optica.inaoep.mx/investigadores/carlost/pdfs/Danielceballos.pps>

- [21] *WDM. Una Tecnología con Fibra*.
Centro de Investigación e Innovación en Telecomunicaciones.
<http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=1>

- [22] *OFS Optical Fiber Cable*.
Product Overview. October 2003.

- [23] Departamento de Física, Universidad de Santiago de Chile.
<http://fisica.usach.cl/~websolar/interior/comofunciona.pdf>

- [24] *Análisis Comparativo de Sistemas CWDM en Función del Tipo de Fuente y Fibra Empleada*.
Universidad San Pablo CEU y Universidad d Politécnica de Madrid.
http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos_gandia_2005/articulos/DF1/453.pdf

2.- ENLACE DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN FIBRA ÓPTICA

Las telecomunicaciones ópticas debido a sus características se han convertido en el medio de comunicación por excelencia para la transmisión de grandes cantidades de información a altas velocidades [1].

Hoy en día, han sido instalados cables de fibra óptica en gran parte del mundo e incluso en los océanos; sin embargo, llegar a este punto no hubiera sido posible sin el desarrollo de algunas tecnologías (como WDM o los amplificadores ópticos) que permiten aprovechar al máximo la enorme capacidad de este novedoso sistema de telecomunicaciones.

2.1.- DISPERSIÓN

La dispersión produce el ensanchamiento gradual de la duración de los pulsos luminosos conforme estos se propagan a lo largo de la fibra óptica [2], tal y como se muestra en la Figura 2. Los pulsos se pueden llegar a ensanchar lo suficiente como para traslaparse¹, distorsionando demasiado la señal y haciéndola indistinguible para el receptor [3].

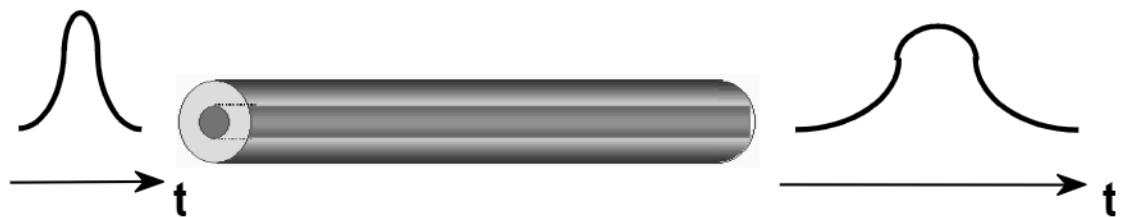


Figura 2.- Proceso de dispersión en las fibras ópticas.

El efecto de la dispersión implica una reducción del ancho de banda del sistema pues al ensancharse los pulsos, se limita la velocidad de transmisión ya que si estos se encuentran muy próximos pudieran llegar a traslaparse debido a la dispersión. Existen diversos tipos de dispersión, pero los más determinantes en las características de los sistemas actuales son los siguientes [4]:

- Intermodal: la dispersión intermodal solo se presenta en las fibras multimodo* y es causada porque las distintas señales (representadas como rayos de luz de acuerdo a la Figura 2.8) que se propagan a través de la fibra óptica siguen diferentes trayectorias lo que ocasiona que para un determinado punto de la fibra lleguen en tiempos distintos [5].

¹ Lo que se conoce como interferencia intersimbólica.

* Ver Capítulo 2.4.

Capítulo 2.- ENLACE DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN FIBRA ÓPTICA

En los enlaces que se diseñan en este trabajo se van a utilizar fibras monomodo* y por lo tanto no se considerará este tipo de dispersión.

- Cromática: es causada por la dependencia del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica en la longitud de onda del haz de luz; es decir, haces de luz de diferentes longitudes de onda viajan a través de la fibra a diferentes velocidades y es por ello que para un determinado punto, llegan en tiempos distintos; la dispersión cromática es la mayor limitante del ancho de banda de las fibras monomodo debido a que no existen fuentes de luz que radien luz en solamente una longitud de onda.

Realizando un desarrollo en serie de Taylor de la constante de fase alrededor de ω_0 que es la frecuencia a la cual el espectro del pulso está centrada y es llamada como la frecuencia central o frecuencia de la portadora, se tiene [6]:

$$\beta(\omega) = \beta_0(\omega_0) + \beta_1(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2 \dots \quad (2)$$

Donde:

β = constante de propagación.

$\beta_n|_{n=0,1,2,\dots}$ = denota las correspondientes derivadas de β con respecto a ω .

ω_0 = frecuencia angular central del pulso.

ω = frecuencia angular .

El primer término de la serie causa un cambio de la fase; a partir del segundo término se define la velocidad de grupo como [7]:

$$v_g(\omega) = \frac{1}{\beta_1} \quad (2.1)$$

que es la velocidad a la cual viaja la energía del pulso a lo largo de la fibra y

donde: $\beta_1 = \frac{\partial \beta}{\partial \omega}$.

En el tercer termino de la ecuación (2), el factor β_2 muestra la dependencia de la velocidad de grupo con la frecuencia y determina el ensanchamiento de los pulsos luminosos debido a que sus diferentes componentes espectrales se dispersan durante la propagación y no llegan simultáneamente al otro extremo de la fibra.

Esta dispersión de las velocidades de grupo es conocida como "dispersión cromática" o "dispersión de la velocidad de grupo (GVD)". El factor β_2 es conocido como parámetro GVD y de este modo, determina que tanto se ensancha el pulso conforme se propaga [8].

Capítulo 2.- ENLACE DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN FIBRA ÓPTICA

Si $\Delta\omega$ es el ancho espectral del pulso, L la longitud de la fibra y consideramos $\tau_g(\omega)$ como el tiempo que le lleva a cada componente espectral recorrer una distancia L , entonces:

$$\tau_g(\omega) = \frac{L}{v_g(\omega)} \quad (2.2)$$

La magnitud del ensanchamiento de los pulsos se determina mediante la siguiente expresión:

$$\Delta t = \Delta\omega \cdot \frac{\partial \tau_g(\omega)}{\partial \omega} \quad (2.3)$$

Sustituyendo $\tau_g(\omega)$ en la ecuación (2.3):

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{L}{v_g(\omega)} \right) \cdot \Delta\omega \\ \Delta t &= L \cdot \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right) \cdot \Delta\omega = L \cdot \left(\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \right) \cdot \Delta\omega \end{aligned} \quad (2.4)$$

Finalmente:

$$\Delta t = L \cdot \beta_2 \cdot \Delta\omega \quad (2.5)$$

Tomando en cuenta la siguiente igualdad: $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ y derivándola respecto a λ , tenemos que:

$$\Delta\omega = \frac{-2\pi c}{\lambda^2} \cdot \Delta\lambda \quad (2.6)$$

Sustituyendo (2.6) en (2.5), nuestra expresión final puede ser escrita como:

$$\Delta t = D \cdot L \cdot \Delta\lambda \quad (2.7)$$

Donde:

$$D = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{1}{v_g(\lambda)} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.8)$$

D = coeficiente de dispersión cuyas unidades son $\frac{ps}{km \cdot nm}$.

2.2.- ATENUACIÓN

Es la disminución paulatina de la potencia de la señal conforme esta se propaga a lo largo de la fibra óptica. La atenuación surge debido a pérdidas causadas por impurezas e irregularidades en el núcleo de la fibra y en el revestimiento. Las pérdidas están clasificadas como:

Pérdidas por doblamiento

Las pérdidas por doblamiento ocurren cuando una fibra óptica es sometida a una curvatura de radio finito y se clasifican en:

- Por macrodoblamiento: son causadas por grandes curvaturas de la fibra que provocan que en la curvatura alguna porción del haz de luz escape del núcleo de la fibra, atenuando así la señal [2]; tal como se puede observar en la Figura 2.1.

Las fibras ópticas cada vez son más flexibles y permiten cierto grado de curvatura debido a que al instalarlas no se pueden seguir trayectorias totalmente rectas; además de que se están diseñando perfiles del índice de refracción que reducen la sensibilidad de las fibras a los dobleces, sin embargo dicha mejora degrada otros parámetros de la fibra. Esto explica por que los fabricantes indican en sus hojas de especificaciones las pérdidas inducidas por ciertos radios de curvatura.

Existe una regla general que se refiere al radio mínimo de curvatura y que dice que este debe ser mayor a 150 veces el diámetro del recubrimiento para aplicaciones de larga distancia y mayor a 100 veces para aplicaciones de corta distancia [10].

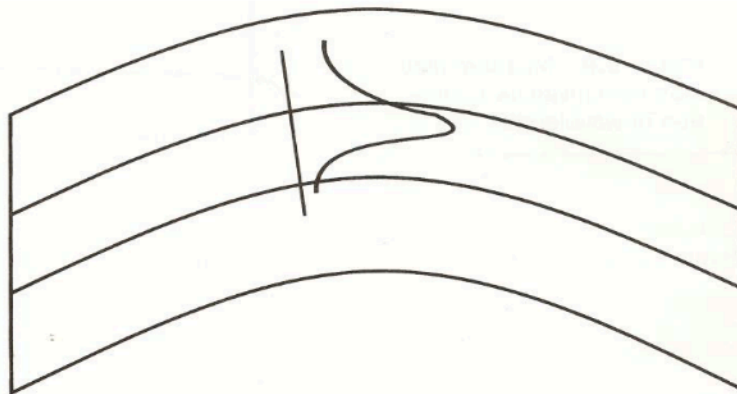


Figura 2.1.- Debido a la gran curvatura de la fibra, parte de la potencia de la señal sale del núcleo.

Capítulo 2.- ENLACE DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN FIBRA ÓPTICA

- Por microdoblamiento: son causadas por imperfecciones en la geometría de la interfase núcleo-revestimiento, fluctuaciones del diámetro y pequeñas deformaciones del eje axial de la fibra.

Cuando el rayo de luz que se propaga a lo largo de la fibra se encuentra en su trayecto con esa imperfección, cambia inesperadamente su dirección no cumpliendo con el principio de la reflexión total interna y parte de él escapa hacia el revestimiento; como lo muestra la Figura 2.2.

Muchas de las microdeformaciones se generan durante la instalación de la fibra óptica, cuando esta es presionada contra una superficie que no es totalmente lisa [3].

Afortunadamente, el proceso de fabricación de las fibras ópticas está tan desarrollado que, actualmente pérdidas por este efecto no presentan mayor problema.

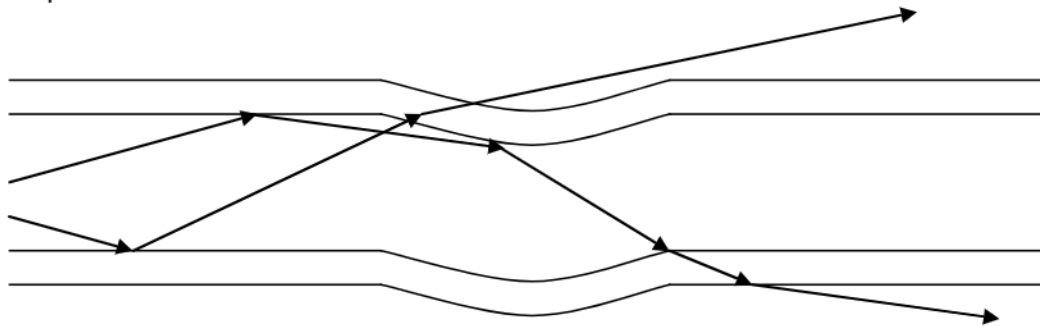


Figura 2.2.- Debido a microdeformaciones en la fibra parte de la luz escapa del núcleo.

Pérdidas por esparcimiento

A este tipo de pérdidas también se les conoce como "esparcimiento de Rayleigh" y es causadas por fluctuaciones microscópicas en la densidad del núcleo, lo que introduce variaciones aleatorias del índice de refracción y que al final se traduce en imperfecciones geométricas que causan que parte de la luz escape del núcleo cuando se encuentran con tal imperfección debido a que la estructura molecular del cualquier material nunca es perfecta y siempre presenta irregularidades [11]. Una representación gráfica se observa en la Figura 2.3.

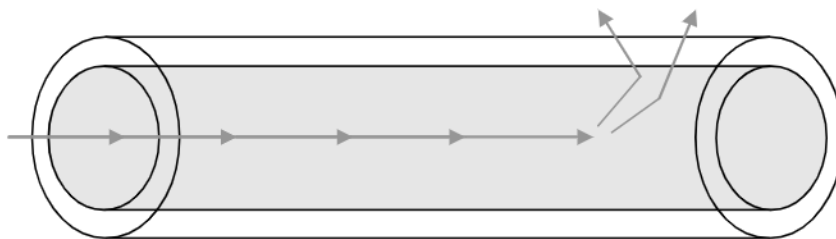


Figura 2.3.- Pérdidas por esparcimiento.

Capítulo 2.- ENLACE DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN FIBRA ÓPTICA

El grado de pérdidas por esparcimiento afecta más longitudes de onda cortas que largas, por eso disminuye rápidamente al incrementar la longitud de onda de la luz y se puede lograr un bajo nivel de pérdidas por este tipo en el rango de 1300 a 1550 nm [9].

Tales pérdidas por esparcimiento surgen cuando el tamaño de la imperfección es más pequeño que la longitud de onda de la señal luminosa que se propaga; esas imperfecciones no pueden ser totalmente eliminadas y fijan el límite inferior de las pérdidas de la fibra como se puede apreciar en la Figura 2.4 [2].

Pérdidas por absorción

Ocurre cuando los fotones del haz de luz que se propaga en la fibra óptica interactúan con el material con el que está hecho el núcleo de la fibra óptica debido a que su energía dada por la siguiente expresión:

$$E_p = h \cdot f$$

E_p = energía del fotón

h = constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} [J \cdot s]$)

f = frecuencia del fotón

Es igual a la diferencia de energía que hay entre dos niveles energéticos (ΔE) del material y por lo tanto el fotón es absorbido, lo que tiene como consecuencia una disminución de la potencia de la señal luminosa ya que el material emite la energía absorbida como luz con otra longitud de onda o mediante vibraciones mecánicas, lo que se traduce en calor.

Los iones de oxígeno en el sílice puro (SiO_2) tienen diferencias de niveles energéticos muy altos, así que sólo los fotones de los rayos ultravioleta podrían ser absorbidos (lo que se conoce como absorción intrínseca), sin embargo los dopantes e impurezas como el Hierro, Cromo, Cobalto, etc. tienen electrones que pueden ser excitados por fotones en el espectro visible e infrarrojo (absorción extrínseca).

Los fabricantes de fibras ópticas han hecho muchos esfuerzos para elaborar los núcleos de las fibras cada vez más limpios de impurezas, sin embargo los efectos de la dispersión están aún presentes en cierto modo debido a algunas moléculas del anión Hidroxilo (OH^-) provenientes de agua que se incorporan en el proceso de fabricación y es muy difícil eliminarlas.

Dichas moléculas tienen "picos" característicos de absorción a 945, 1240 y 1380 nm y es debido a que algunos de ellos presentan gran atenuación de

Capítulo 2.- ENLACE DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN FIBRA ÓPTICA

la señal que se ha dividido el rango de longitudes de onda en "ventanas" donde la absorción es baja tal como se muestra en la Figura 2.4.

Actualmente ya hay fibras conocidas como "pico de agua nulo" (zero water peak) que presentan muy aminorado este efecto y permiten transmitir en un mayor rango de longitudes de onda [2] [10]. Son precisamente este tipo de fibras las que se consideraron en el análisis preliminar de este trabajo de acuerdo a las recomendaciones G.652 categorías C y D y G.655 categorías D y E de la ITU.

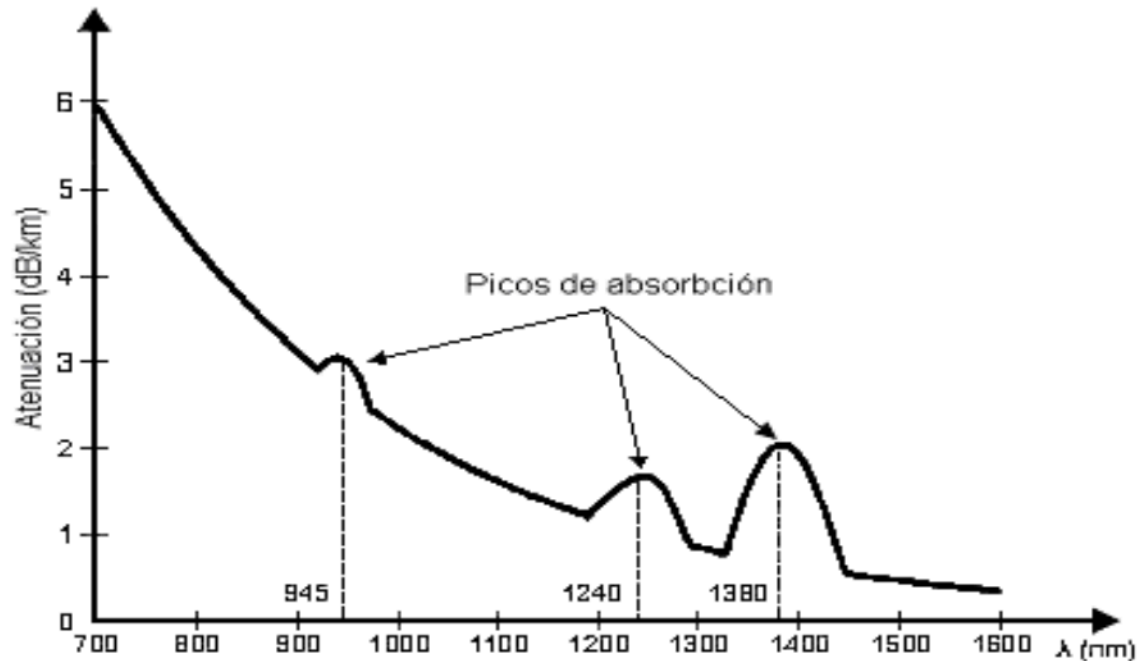


Figura 2.4.- Gráfica de atenuación típica de una fibra óptica.

2.3.- EFECTOS NO LINEALES

Los efectos no lineales que se presentan en la fibra óptica se manifiestan a altas potencias y se originan por la dependencia del índice de refracción de la fibra con la potencia óptica de las señales luminosas que se propagan en ella y por fenómenos de dispersión estimulada. Estos efectos últimamente han cobrado importancia debido a que con las tecnologías actuales de transmisión (WDM) es posible enviar varios canales por una misma fibra y consecuentemente la potencia dentro de la misma se incrementa.

La dependencia del índice de refracción con la potencia de la señal se manifiesta en diferentes fenómenos como: automodulación de fase,

Capítulo 2.- ENLACE DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN FIBRA ÓPTICA

modulación cruzada de fase y mezcla de cuatro ondas; mientras que el fenómeno de esparcimiento es responsable del efecto Brillouin y Raman.

Automodulación de fase (SPM)

Dado que el índice de refracción de la fibra óptica tiene una componente que depende de la intensidad del pulso luminoso que transporta; se provoca un cambio en la fase de manera que cada parte del pulso experimenta una diferente variación de fase y siendo la frecuencia la derivada de la fase, se van generando componentes de frecuencia conforme este se propaga. Mediante el fenómeno de dispersión², estas componentes generadas provocan el ensanchamiento del pulso [12] [13].

Modulación cruzada de fase (XPM)

Este efecto tiene la misma naturaleza y consecuencias que la automodulación de fase (SPM) pero únicamente se presenta cuando varias señales ópticas se propagan de manera simultánea en la misma fibra, siendo la fase de cada una de ellas dependiente no sólo de su potencia, sino también de la potencia de las demás señales. Esto provoca un entrecruzamiento de canales que resulta en diafonía para el sistema. Similarmente a la automodulación de fase, la modulación cruzada es perjudicial para el sistema de transmisión.

Mezcla de cuatro ondas (FWM)

Este efecto no lineal surge de la interacción entre las señales ópticas al propagarse simultáneamente en la misma fibra, dando como resultado la generación de nuevas señales a frecuencias diferentes e incluso iguales a las originales [14], tal y como se muestra en la Figura 2.6.

En el caso de que tres ondas de diferente frecuencia: ω_1 , ω_2 y ω_3 se propaguen dentro de la fibra simultáneamente, componentes de frecuencia $\omega = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3$ son generadas. La generación de varias frecuencias es posible en principio y corresponde a las diferentes combinaciones de los signos de la ecuación, estando el estudio de todos los demás términos fuera del alcance y requerimientos de esta tesis.

Sin embargo, los términos de la forma $\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k$ para $i, j \neq k$ son de gran importancia puesto que influyen en los otros canales.

Los efectos de este fenómeno en los sistemas de telecomunicaciones ópticos son principalmente: interferencia entre los canales y disminución de su potencia [7]. En la Figura 2.5 se muestran 3 longitudes de onda y

² Ver capítulo 2.1.

Capítulo 2.- ENLACE DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN FIBRA ÓPTICA

posteriormente en la Figura 2.6 se puede apreciar el resultado de dicho efecto no lineal.

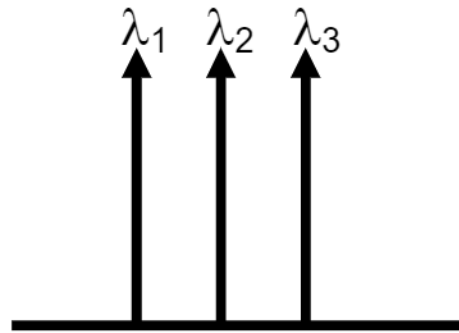


Figura 2.5.- Representación gráfica de 3 canales igualmente espaciados.

El mezclado de cuatro ondas es un fenómeno que no puede ser completamente eliminado; sin embargo, puede ser minimizado para que su efecto no sea tan nocivo tomando en cuenta algunas consideraciones de diseño, tales como: no eliminar completamente la dispersión, espaciar los canales desigualmente, incrementar el espaciamiento intercanal y reducir la potencia óptica dentro de la fibra.

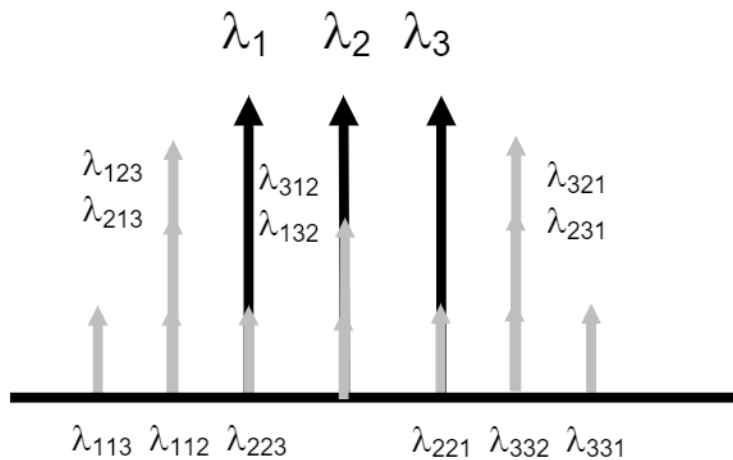


Figura 2.6.- Traslape de canales ocasionado por el efecto "Mezcla de cuatro ondas".

Dispersión Raman

Se debe a la interacción que existe entre las señales ópticas y las vibraciones moleculares de la fibra óptica, dando como resultado que parte de la energía de la señal sea transferida a las vibraciones de las propias moléculas [2].

Dichas oscilaciones dan lugar a la generación de una señal de menor frecuencia que la señal incidente, dicha señal es radiada en todas direcciones y tiene la particularidad de poseer un ancho espectral bastante amplio, pudiendo incluso llegar a traslaparse con alguna otra señal de transmisión [15].

Dispersión Brillouin

El origen de este tipo de dispersión es similar al de la dispersión Raman, difiere en que la energía aportada por la señal incidente es mucho menor y la longitud de onda de la señal generada es muy cercana a su longitud de onda, además, la transferencia de potencia se realiza básicamente en dirección contraria a la de propagación [16].

Dadas las características de los enlaces de los que trata este trabajo, varios de los efectos no lineales no tienen influencia significativa y en los otros, se suprimen sus efectos al seguir recomendaciones y normas establecidas por organismos especializados³.

2.4.- DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS

Existen fibras ópticas en las que solamente se puede propagar un rayo luminoso y son llamadas "monomodo" (SM), en cambio en las fibras "multimodo" (MM) se pueden propagar más de dos rayos tal como se muestra esquemáticamente en la figura 2.7 [9]:

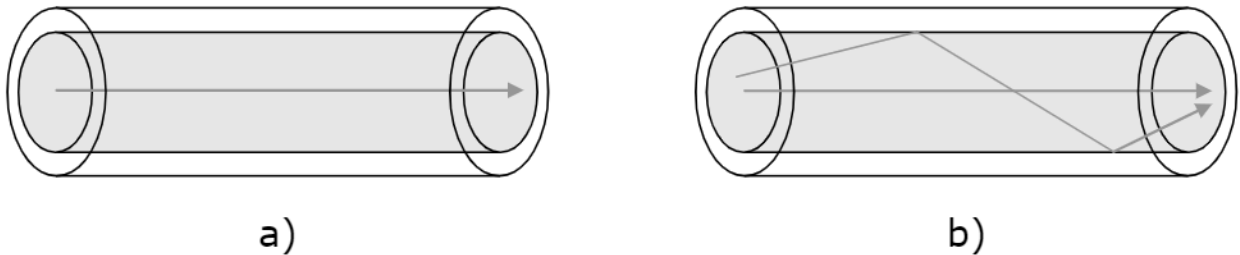


Figura 2.7.- Representación de a) fibra monomodo y b) fibra multimodo.

En los enlaces de telecomunicaciones ópticos como los del presente trabajo, se utilizan las fibras monomodo como medio de enlace ya que estas fibras permiten alcanzar grandes distancias y transmitir elevadas tasas de bit's, las cuales vienen limitadas principalmente por la dispersión cromática y los efectos no lineales [17], por lo que este trabajo se limita a describir los diferentes tipos de estas fibras monomodales.

La forma de manipular las propiedades de la fibras es mediante el diseño del perfil del índice de refracción⁴, dando ello lugar a los siguientes tipos de fibra:

³ Ver capítulo 3.

⁴ Se define como: $n = \frac{c}{v}$, donde: n = índice de refracción, c = vel. de la luz en el vacío y v = vel. de la luz en el material.

Capítulo 2.- ENLACE DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN FIBRA ÓPTICA

Fibra óptica convencional (Single Mode Fiber, SMF)

Esta fibra se caracteriza por tener su longitud de onda de dispersión cero en torno a los 1310 nm y muestra una atenuación mínima alrededor de 1550 nm, estas características provienen de las propiedades naturales del material con el que está hecha la fibra (sílice) y su perfil del índice de refracción es de salto de índice donde el diseño tradicional es conocido como "revestimiento emparejado" (matched cladding) y existe otro diseño llamado "revestimiento deprimido" (depressed cladding) donde el índice de refracción del revestimiento decae alrededor del núcleo. Ver Figura 2.8.

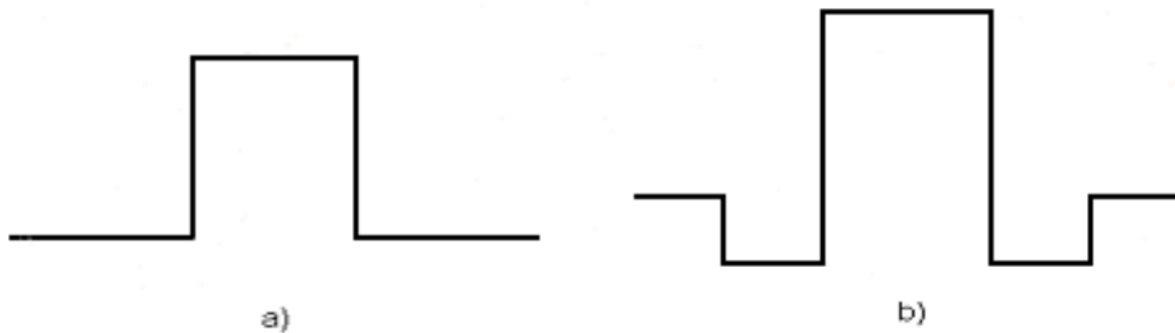


Figura 2.8.- Perfiles del índice de refracción a) Revestimiento emparejado y b) Revestimiento deprimido.

Esta fibra está normalizada en la recomendación ITU-T G.652 [17] y existen varias categorías que se distinguen principalmente en función de los requisitos de atenuación a 1383 nm [18].

- La categoría 652.A contiene los atributos y valores recomendados necesarios para sistemas de hasta 2.5 Gb/s en enlaces de máximo 80 km, así como sistemas de 10 Gb/s hasta 40 km y de 40 Gb/s en enlaces menores a 2 km.
- La categoría 652.B contiene los atributos y valores recomendados que son necesarios para soportar aplicaciones de mayor velocidad binaria, 10 Gb/s para algunas de las descritas en las recomendaciones G.691 y G.692 de la ITU y 40 Gb/s para algunas aplicaciones de las recomendaciones G.693 y G.959.1 también de la ITU. En función de la aplicación, puede ser necesario compensar la dispersión cromática.
- La categoría 652.C es semejante a la G.652.A, pero permite transmitir en partes de una gama de longitudes de onda ampliada desde 1360 nm a 1530 nm debido a que en su curva de atenuación se han suprimido los picos de absorción. Esta fibra es "zero water peak".

Capítulo 2.- ENLACE DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN FIBRA ÓPTICA

- La categoría 652.D es semejante a la 652.B y al igual que la 652.C permite transmitir en partes de una gama de longitudes de onda ampliada desde 1360 nm a 1530 nm dado que también es "zero water peak".

En la Figura 2.9 se muestran el comportamiento de la atenuación y la dispersión de una típica fibra G.652 "zero water peak". Es importante resaltar que en las gráficas se verifica que la longitud de onda con dispersión cero está alrededor de 1310 nm y que la atenuación muestra un valor mínimo alrededor de 1550 nm.

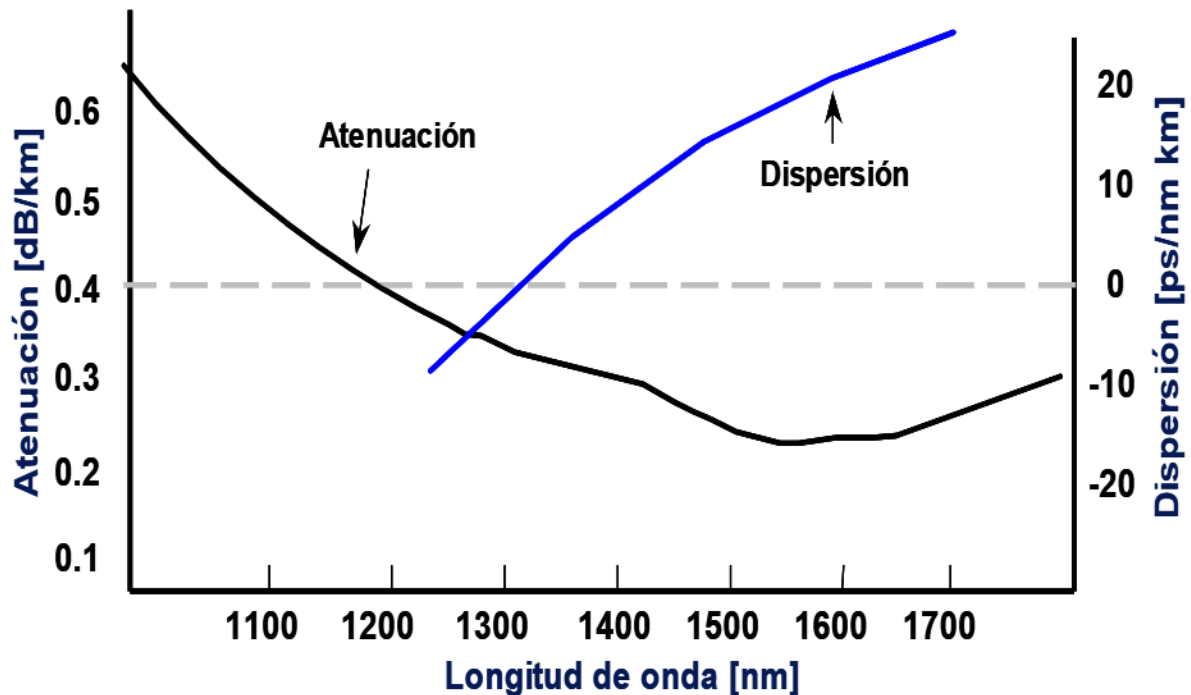


Figura 2.9.- Gráfica de atenuación y dispersión de una típica fibra G.652 "zero water peak".

Fibra óptica de dispersión desplazada (*Dispersion-Shifted Fiber, DSF*)

Como se mencionó, la fibra óptica convencional tiene una dispersión nula alrededor de 1310 nm, sin embargo, en esa región la atenuación es alta y viceversa; así que para lograr la máxima distancia de transmisión en un enlace de alta capacidad, se debe modificar la curva de dispersión para hacer coincidir los puntos de mínima atenuación y dispersión en la misma región.

Mediante la modificación geométrica del perfil de índice de refracción, se consigue desplazar la longitud de onda de dispersión nula, surgiendo de este modo las fibras de dispersión desplazada. Su principal inconveniente proviene de los efectos no lineales, ya que su área efectiva⁵ es bastante más pequeña que en el caso de la fibra monomodo estándar, por lo tanto, este tipo de fibras

⁵ Se Define como la sección por la que pasa toda la potencia con una densidad uniforme.

Capítulo 2.- ENLACE DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN FIBRA ÓPTICA

no son en principio adecuadas para sistemas DWDM, ya que el fenómeno no lineal de mezclado de cuatro ondas (FWM) produce degradaciones significativas. Por esta razón, este tipo de fibras no se consideró dentro del análisis de este trabajo. Este tipo de fibras se describe en la recomendación ITU G.653.

Fibra óptica de dispersión aplanada (Dispersión Flattened Fiber, DFF).

Este tipo de fibra tiene dos longitudes de onda con dispersión cero, por lo que ofrece la característica deseable de muy baja dispersión sobre un amplio rango de longitudes de onda y por lo tanto, parecía⁶ apropiada para utilizarse cuando se desarrolló la tecnología WDM donde se usan muchas longitudes de onda al mismo tiempo.

Por medio de la manipulación del perfil del índice de refracción, se logró obtener el comportamiento de la dispersión deseado; algunos de los perfiles se muestran en la Figura 2.10.

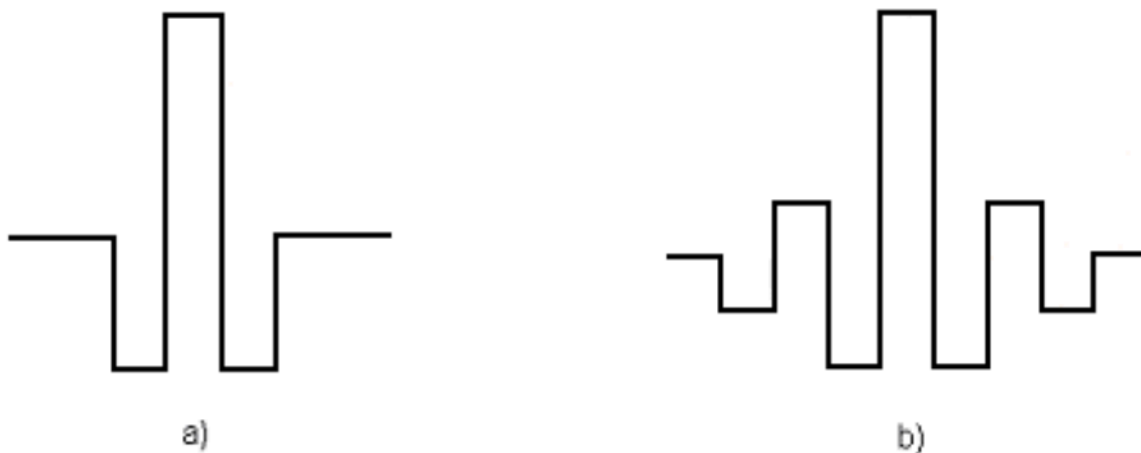


Figura 2.10.- Perfiles del índice de refracción para la fibra óptica de dispersión aplanada a) double clad o W profile b) quadruple-clad profile para DFF.

Fibra óptica de dispersión desplazada no nula (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber, NZDSF)

Con este tipo de fibra se solucionan en buena medida los problemas de las no linealidades de la fibra de dispersión desplazada, ya que ahora la dispersión cromática es baja pero no nula alrededor de los 1550 nm; esta pequeña cantidad de dispersión cromática disminuye el efecto de la mezcla de cuatro ondas. Esta fibra está optimizada para su utilización en la gama de longitudes de onda comprendida entre 1530 nm y 1565 nm.

⁶ Eso hasta que se conocieron los efectos no lineales.

Capítulo 2.- ENLACE DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN FIBRA ÓPTICA

La recomendación G.655 de la ITU-T [18] normaliza este tipo de fibra y en el presente trabajo se consideraron las dos más recientes categorías:

- La categoría 655.D define el coeficiente de dispersión cromática con dos curvas que fijan tanto el límite inferior como superior de este, en el rango de 1460 nm a 1625 nm.
Para longitudes de onda mayores que 1530 nm la dispersión es positiva y de suficiente magnitud como para suprimir la mayoría de los efectos no lineales; para longitudes de onda menores que 1530 nm, la dispersión cruza el cero pero eso no impide que la fibra pueda ser usada en CWDM a partir de 1471 nm.
- La categoría 655.E define el coeficiente de dispersión cromática de la misma manera que la categoría anterior; pero esta tiene valores más altos, lo cual puede resultar útil cuando el espaciamiento intercanal es muy reducido; estas fibras tienen un coeficiente de dispersión positivo no nulo para longitudes de onda arriba de 1460 nm.

En la Figura 2.11 se muestran el comportamiento de la atenuación y la dispersión de una típica fibra G.655 "zero water peak". De las gráficas puede observarse que la longitud de onda con dispersión cero está alrededor de 1500 nm y que tiene un valor bajo alrededor de los 1550 nm.

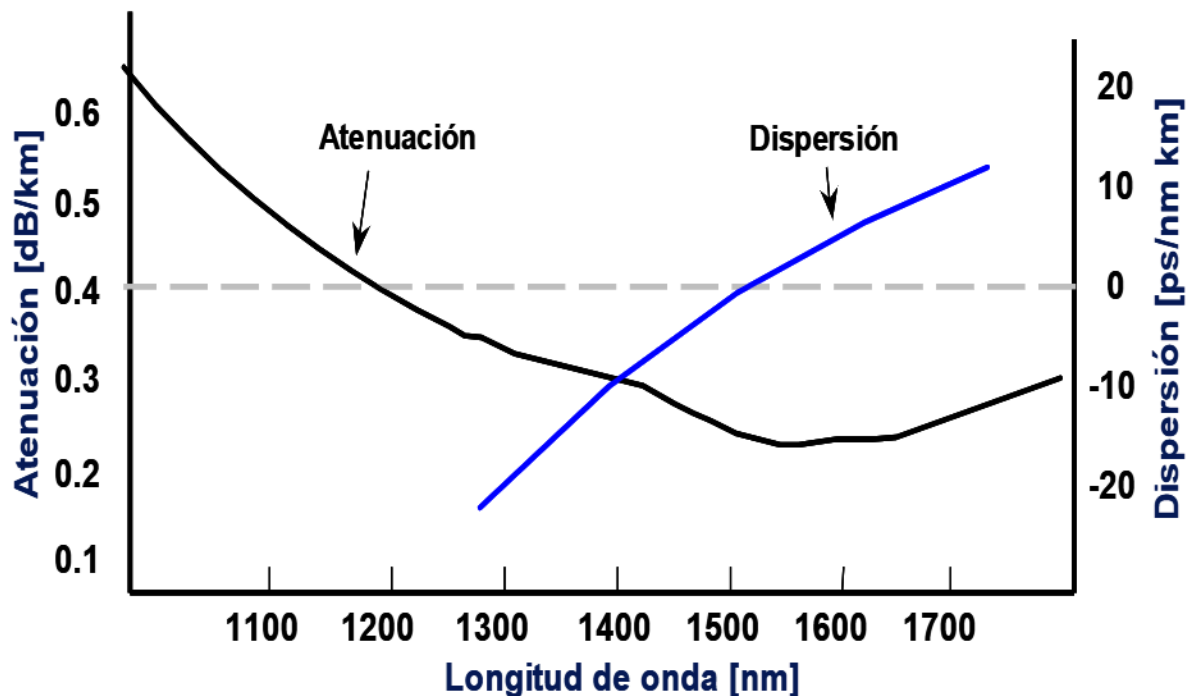


Figura 2.11.- Gráfica típica de atenuación y dispersión de una típica fibra G.655 "zero water peak).

2.5.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Tendencias en Telecomunicaciones Ópticas.* Departamento de Física, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.
http://www.accefyn.org.co/PubliAcad/Encuentro/Full_text/fibras_opticas/Fop-04-m.pdf
- [2] Franz, J.H. and Jain V.K. *Optical Communications Components and Systems.* Narosa Publishing House, 2000.
- [3] Agrawal, G.P. *Fiber-Optic Communication Systems,* Second Edition. Jhon Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [4] Gutiérrez Castrejón, R. *Hacia un sistema de telecomunicaciones completamente óptico.* Instituto de Ingeniería, UNAM, 2005.
- [5] Green, D. L. *Fiber Optic Communications.* CRC Press, Inc., 1993
- [6] Gutiérrez Castrejón, R. Apuntes del curso: *Sistemas ópticos de comunicación.* Facultad de Ingeniería, UNAM, 2008.
- [7] Kartalopoulos, S. V. *DWDM Networks, Devices, and Technology.* IEEE Press, 2003.
- [8] Keiser, G. *Optical Fiber Communications,* Third Edition. Mc Graw Hill, 2000.
- [9] Bailey, D. and E. Wright. *Practical Fiber Optics,* First Edition. Newnes, 2003.
- [10] Mynbaev, D. K. and Lowell L. Scheiner. *Fiber-Optic Communications Technology.* Prentice Hall, 2001.
- [11] *Cisco ONS 15454 Engineering Planning Guide.* May, 2005.
- [12] Gualda, E. M. *Optimización de las prestaciones de enlaces ópticos submarinos de gran capacidad y larga distancia mediante el control de la dispersión.* Universidad Politécnica de Cataluña, 2005.
<http://www.icfo.es/images/publications/T05-001.pdf>
- [13] *Efectos No Lineales.* Grupo de Comunicaciones Ópticas, Universidad de Valladolid.
http://pesquera.tel.uva.es/tutorial/Tema_I/No_lineal/No_lineal.html
- [14] Spirit, D. M. and M. J. O'Mahony. *High Capacity Optical Transmission Explained.* Jhon Wiley & Sons, 1995.

Capítulo 2.- ENLACE DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN FIBRA ÓPTICA

- [15] Green, E. P. *Fiber to the home: the new empowerment*. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [16] *Fenómenos no Lineales en Fibras Ópticas*. Grupo de Tecnologías de las Comunicaciones, Universidad de Zaragoza.
http://diec.unizar.es/asignaturas/defaultWebs/11958/2_6_No_lineales.pdf
- [17] Tipos de fibra óptica. Radiocomunicaciones y fibra óptica.
http://www.radioptica.com/Fibra/tipos_fibra_optica.asp
- [18] ITU-T Recommendation G.652, "Characteristics of a single-mode optical fibre and cable," June 2005.
- [19] ITU-T Recommendation G.655: "Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable," March 2006.
- [20] The Fibreoptic Industry Association.
<http://www.fia-online.co.uk>
- [21] La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
http://www.accefyn.org.co/PubliAcad/Encuentro/Full_text/fibras_opticas/Fop-04-m.pdf
- [22] *Propiedades de transmisión de la fibra óptica*.
<http://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/propiedades-tranmision>
- [23] *Óptica no Lineal*
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
www-optica.inaoep.mx/investigadores/carlost/NLO/JuanOidor.pps

3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

Para asegurar el correcto funcionamiento de un sistema de telecomunicaciones, en su etapa de diseño se deben analizar minuciosamente las limitaciones impuestas sobre la capacidad de transmisión del enlace y sobre su distancia máxima [1].

- La capacidad de transmisión está limitada por el fenómeno físico de la dispersión¹ que es característico de toda fibra óptica y que provoca lo que se conoce como interferencia intersimbólica; siendo su efecto mayor mientras más grande sea la dispersión de la fibra y más larga la distancia que recorren las señales luminosas [2].
- La distancia máxima de transmisión de los sistemas de telecomunicaciones ópticos está limitada por la dispersión y por la atenuación de la fibra óptica que es provocada por varios factores² y por otras pérdidas de potencia a lo largo del enlace.

Ambas limitaciones se analizarán en el desarrollo de este capítulo.

3.1.- TECNOLOGÍAS DE MULTIPLEXAJE UTILIZADAS

En este trabajo se consideraron ambas tecnologías WDM, CWDM y DWDM, con configuraciones típicas y parámetros basadas en recomendaciones de la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) que se desglosarán más adelante. Además como el tipo de fibra empleado es fundamental en el desempeño de un sistema de este tipo, también se consideraron varios tipos de fibras que por sus características son adecuadas a los requerimientos del sistema; otro factor importante a tomar en cuenta es el ancho espectral de las fuentes ya que dependiendo de este y de la dispersión de la fibra entre otros parámetros (ver Capítulo 3.3), estará limitada la distancia a la cual se puede asegurar una confiable recepción de la señal.

Actualmente, los equipos utilizados en las tecnologías WDM ofrecen varias opciones de alcance y en general, su capacidad es altamente escalable; por lo que en el análisis de este trabajo sólo se van a considerar aquellas configuraciones comúnmente utilizadas que se consideren adecuadas a las características y propósitos del proyecto del cual se desprende este trabajo. Por lo tanto, las configuraciones consideradas de las tecnologías WDM son las siguientes:

¹ Ver Capítulo 2.1.

² Ver Capítulo 2.2.

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

CWDM

La tecnología CWDM empleada consta de 16 canales de 2.5 Gb/s o de 10 Gb/s con un espaciamiento intercanal de 20 nm (2500 GHz) de acuerdo a la recomendación G.694.2 de la ITU-T³, cubriendo el espectro de 1310 nm a 1610 nm sobre la fibra G.652.D. Otra configuración incluida en el análisis de este trabajo consta de 6 canales de 2.5 Gb/s en el rango de 1460 nm a 1570 nm sobre la fibra G.655.D.

DWDM

La tecnología DWDM considerada en este trabajo tiene 40 canales ya sea de 2.5 Gb/s o de 10 Gb/s en el rango de 1529.55 nm a 1560.61 nm con un espaciamiento intercanal de 100 GHz (≈ 0.8 nm) conforme a la recomendación G.694.1 de la ITU-T. Además para dicha configuración se optó por considerar las categorías D y E de la fibra G.655. También como parte del análisis se incluyó una configuración donde se tienen 120 canales ya sea de 2.5 Gb/s o de 10 Gb/s, abarcando la gama de 1491.5 nm a 1602.31 nm.

En el siguiente cuadro se agrupan las configuraciones consideradas:

CWDM		DWDM	
Fibra	# Canales	Fibra	# Canales
652.D	16	652.D	40
655.D	6	655.D	40
		655.E	40
		655.D	120

Cuadro 3.- Configuraciones WDM consideradas.

3.2.- ESTÁNDARES UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS

Para la realización de este trabajo se recurrió a un estándar y a varias recomendaciones de la ITU-T aunque debido a que son tecnologías recientes gran parte de la estandarización de los parámetros del equipo involucrado en estos sistemas bajo las configuraciones consideradas, aún está bajo estudio o en revisión. En el caso en que no hubiera un estándar disponible recurrimos a valores típicos de equipos similares para realizar los cálculos.

A continuación se mencionan los estándares y recomendaciones utilizados:

Para determinar las diferentes características de las fibras ópticas necesarias para obtener el alcance del enlace en función de la dispersión o para realizar

³ Unión Internacional de Telecomunicaciones sección T.

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

los presupuestos de potencia se consultaron las siguientes recomendaciones, mismas que identifican a las fibras por el número asignado a estos documentos:

ITU-T G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.

Esta recomendación describe las características geométricas, mecánicas y de transmisión de fibras y cables ópticos monomodo cuya longitud de onda de dispersión nula está situada en torno a 1310 nm. En un principio, esta fibra fue diseñada para funcionar óptimamente en la región de longitud de onda de 1310 nm, pero puede asimismo utilizarse en la región de 1550 nm.

Esta recomendación contiene algunos valores del coeficiente de atenuación; sin embargo, la recomendación ITU-T G.695 que se muestra más adelante, contiene los coeficientes de atenuación en el rango de 1271 nm a 1611 nm de acuerdo a pruebas de laboratorio que se realizaron y aunque también son valores límite, son ligeramente menores a los que se muestran a continuación:

ATRIBUTO	DATO	VALOR
Coeficiente de atenuación	Máximo de 1310 nm a 1625 nm	0.4 dB/km Véase nota.
	Máximo a 1550 nm	0.3 dB/km

Cuadro 3.1.- Atenuación en la fibra G.652.

Nota: Esta región de longitud de onda puede ampliarse hasta 1260 nm añadiendo 0.07 dB/km al valor de atenuación a 1310 nm debido a la atenuación producida por la dispersión de Rayleigh⁴. Las características de dispersión de esta fibra se tomaron de la recomendación G.695 de la ITU que se menciona posteriormente.

ITU-T G.655: Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.

En esta recomendación se describen las características geométricas, mecánicas y de transmisión de una fibra monomodo cuyo valor absoluto del coeficiente de dispersión cromática no es nulo en toda la gama de longitudes de onda de 1530 nm a 1565 nm. Esta dispersión suprime el crecimiento de los efectos no lineales, los cuales pueden ser particularmente perjudiciales en el caso de usar multiplexaje denso por división de longitud de onda (DWDM).

⁴ Fenómeno provocado por fluctuaciones en la densidad del núcleo de la fibra que a su vez causan variaciones en el índice de refracción en una escala menor que la longitud de onda.

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

En la versión consultada se agregan las categorías D y E, en ambas se limita el coeficiente de dispersión cromática por un par de curvas en el intervalo de 1460 a 1625; la inclusión de longitudes de onda bajas se hace con la intención de soportar la tecnología CWDM que no presenta deterioro significativo a causa de efectos no lineales, para canales de 1471 nm en adelante.

A partir de esta recomendación se obtuvieron los siguientes datos para las dos categorías consideradas en esta fibra:

ATRIBUTOS DE LA FIBRA G.655.D		
Atributo	Dato	Valor
Coeficiente de dispersión cromática [ps/nm·km]	Dmín (λ): 1460-1550 nm	$D_{\min}(\lambda) = \frac{7.00}{90}(\lambda - 1460) - 4.20$
	Dmín (λ): 1550-1625 nm	$D_{\min}(\lambda) = \frac{2.97}{75}(\lambda - 1550) + 2.80$
	Dmáx(λ): 1460-1550 nm	$D_{\max}(\lambda) = \frac{2.91}{90}(\lambda - 1460) + 3.29$
	Dmáx(λ): 1550-1625 nm	$D_{\max}(\lambda) = \frac{5.06}{75}(\lambda - 1550) + 6.20$
Atributos de cable		
Atributo	Dato	Valor
Coeficiente de atenuación	Máximo a 1550 nm	0.35 dB/km
	Máximo a 1625 nm	0.4 dB/km

Cuadro 3.2.- Valores de dispersión y atenuación para la fibra G.655.D

ATRIBUTOS DE LA FIBRA G.655.E		
Atributo	Dato	Valor
Coeficiente de dispersión cromática [ps/nm·km]	Dmín (λ): 1460-1550 nm	$D_{\min}(\lambda) = \frac{5.42}{90}(\lambda - 1460) + 0.64$
	Dmín (λ): 1550-1625 nm	$D_{\min}(\lambda) = \frac{3.30}{75}(\lambda - 1550) + 6.06$
	Dmáx(λ): 1460-1550 nm	$D_{\max}(\lambda) = \frac{4.65}{90}(\lambda - 1460) + 4.66$
	Dmáx(λ): 1550-1625 nm	$D_{\max}(\lambda) = \frac{4.12}{75}(\lambda - 1550) + 9.31$
Atributos de cable		
Atributo	Dato	Valor
Coeficiente de atenuación	Máximo a 1550 nm	0.35 dB/km
	Máximo a 1625 nm	0.4 dB/km

Cuadro 3.3.- Valores de dispersión y atenuación para la fibra G.655.E

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

A partir de las ecuaciones proporcionadas en estas tablas se obtuvieron las gráficas siguientes, donde como podemos ver, son pares de curvas que limitan los valores máximos y mínimos siendo la línea central el promedio.

GRÁFICA DE DISPERSIÓN DE LA FIBRA G.655.D

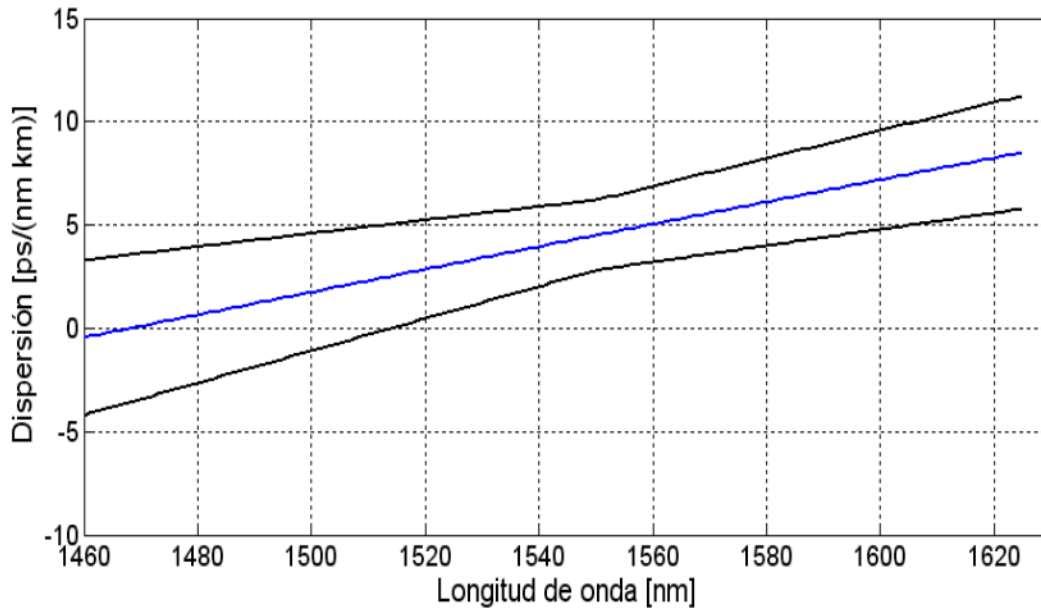


Figura 3.- Gráfica de dispersión de la fibra G.655.D

GRÁFICA DE DISPERSIÓN DE LA FIBRA G.655.E

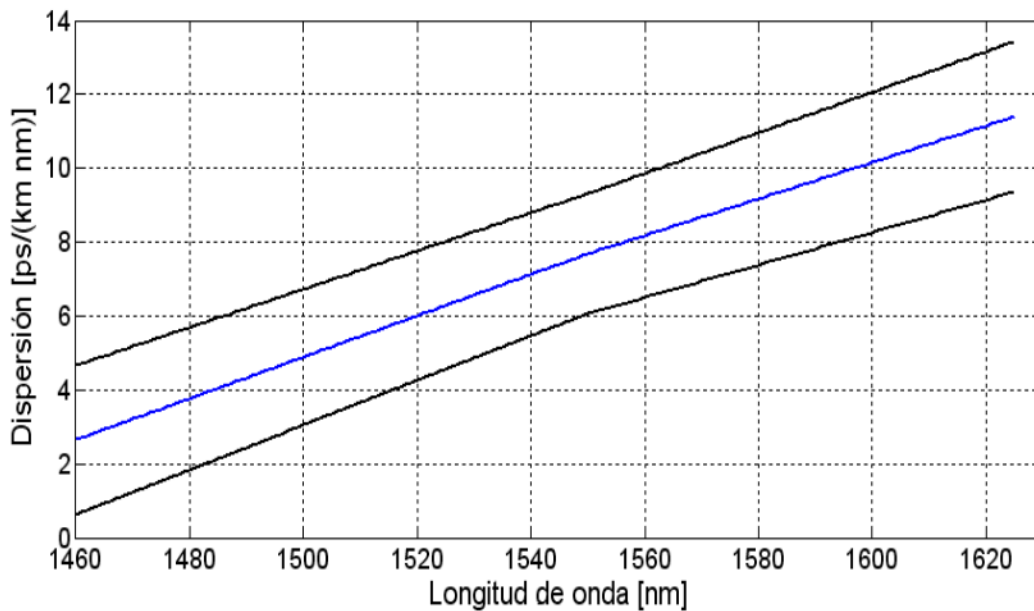


Figura 3.1.- Gráfica de dispersión de la fibra G.655.E

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

El espaciado intercanal de las configuraciones en las tecnologías CWDM y DWDM que ya han sido mencionados, cumplen con lo establecido en las siguientes recomendaciones:

ITU-T G.694.2: Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid.

El propósito de esta recomendación es definir la configuración⁵ de longitudes de onda para soportar la tecnología CWDM; dicha configuración está diseñada para permitir la transmisión simultánea de varias longitudes de onda con la separación suficiente para utilizar el equipo indicado para ello.

Se define que el espaciado entre las longitudes de onda nominales centrales no debe ser menor de 20 nm y que la variación total de la longitud de onda de las fuentes utilizadas puede ser alrededor de $\pm 6-7$ nm para ser compatible con los demás componentes. La configuración de longitudes de onda para CWDM dentro del rango 1271 nm a 1611 nm es mostrada en la siguiente tabla:

LONGITUD DE ONDA [nm] NOMINAL CENTRAL PARA UN ESPACIAMIENTO DE 20 nm.
1271
1291
1311
1331
1351
1371
1391
1411
1431
1451
1471
1491
1511
1531
1551
1571
1591
1611

Cuadro 3.4.- Longitudes de onda centrales para CWDM.

⁵ Conjunto de longitudes de onda o frecuencias de referencia usadas para denotar sus valores nominales centrales permitidos.

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

ITU-T G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.

En esta recomendación se define la configuración de las frecuencias utilizadas en DWDM. Dicha configuración fijada en 193.1 THz soporta una gran variedad de espaciamentos entre los canales que van de 12.5 GHz a 100 GHz y aún más amplios (múltiples enteros de 100 GHz); espaciamentos desiguales también son permitidos. Para espaciamentos de 100 GHz o mayores, las frecuencias de los canales permitidas (en THz) están definidas por:

$$f = 193.1 + n \times 0.1$$

Donde n es un entero (incluyendo el cero).

El Cuadro 3.5 muestra algunos valores nominales de frecuencias dentro de la banda C para un espaciamento de 100 GHz (que es el comúnmente utilizado para aplicaciones como las del presente trabajo)

FRECUENCIA NOMINAL CENTRAL [THz] PARA UN ESPACIAMIENTO DE 100 GHZ.	LONGITUD DE ONDA APROXIMADA [nm].
196.1	1528.77
196.0	1529.55
195.9	1530.33
195.8	1531.12
195.7	1531.90
195.6	1532.68
195.5	1533.47
195.4	1534.25
195.3	1535.04
195.2	1535.82
195.1	1536.61
195.0	1537.40
194.9	1538.19
194.8	1538.98
194.7	1539.77
194.6	1540.56
194.5	1541.35
194.4	1542.14
194.3	1542.94
194.2	1543.73
194.1	1544.53
194.0	1545.32
193.9	1546.12

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

193.8	1546.92
193.7	1547.72
193.6	1548.51
193.5	1549.32
193.4	1550.12
193.3	1550.92
193.2	1551.72
193.1	1552.52
193.0	1553.33
192.9	1554.13
192.8	1554.94
192.7	1555.75
192.6	1556.55
192.5	1557.36
192.4	1558.17
192.3	1558.98
192.2	1559.79
192.1	1560.61
192.0	1561.42
191.9	1562.23
191.8	1563.05
191.7	1563.86
191.6	1564.68
191.5	1565.50
191.4	1566.31
191.3	1567.13
191.2	1567.95

Cuadro 3.5.- Longitudes de onda centrales para DWDM en la banda C.

En cuanto a las tecnologías WDM, se encontraron las siguientes recomendaciones:

ITU-T G.695: Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications.

En este documento se muestra una tabla que contiene los valores del coeficiente de dispersión y de atenuación de la fibra G.652 y fue de gran utilidad:

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

COEFICIENTES DE ATENUACIÓN Y DISPERSIÓN DE LA FIBRA G.652.D

LONGITUD DE ONDA [nm]	DISPERSIÓN MÁXIMA [ps/(km nm)]	ATENUACIÓN MÍNIMA [dB/km]	ATENUACIÓN MÁXIMA [dB/km]
1271	--	0.385	0.470
1291	-3.85	0.365	0.441
1311	-1.85	0.352	0.423
1331	3.34	0.340	0.411
1351	5.02	0.329	0.399
1371	6.62	0.316	0.386
1391	7.97	0.301	0.372
1411	9.14	0.285	0.357
1431	10.31	0.269	0.341
1451	11.49	0.254	0.326
1471	12.68	0.240	0.312
1491	13.86	0.229	0.300
1511	15.06	0.220	0.290
1531	16.25	0.213	0.283
1551	17.46	0.209	0.277
1571	18.66	0.208	0.273
1591	19.87	0.208	0.275
1611	21.09	0.212	0.283

Cuadro 3.6.- Coeficiente de dispersión y de atenuación para la fibra G.652.

ITU-T G.698.1: Multichannel DWDM applications with single channel optical interfaces.

De dicha recomendación se obtuvieron los valores de los parámetros del transmisor y receptor utilizados en el análisis de este trabajo, los cuales fueron particularmente útiles en los correspondientes cálculos del presupuesto de potencia.

En la siguiente tabla se muestra tanto la potencia del transmisor como la sensibilidad del receptor para una distancia que no supere los 80 km y con una velocidad de transmisión de 2.5 Gb/s.

La sensibilidad está referenciada a un BER de 10^{-12} .

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

Para una velocidad de transmisión de 2.5 Gb/s:

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Potencia media de salida de canal máxima	dBm	4
Potencia media de salida de canal mínima	dBm	0
Sensibilidad del receptor mínima	dBm	-28

Cuadro 3.7.- parámetros utilizados para DWDM a 2.5 Gb/s.

La tabla de abajo muestra los mismos parámetros con las mismas condiciones, pero ahora para una velocidad de transmisión de 10 Gb/s.

Para una velocidad de transmisión de 10 Gb/s:

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Potencia media de salida de canal máxima	dBm	6
Potencia media de salida de canal mínima	dBm	3
Sensibilidad del receptor mínima	dBm	-24

Cuadro 3.8.- parámetros utilizados para DWDM a 10 Gb/s.

Para determinar las pérdidas de los conectores y empalmes, se consultó el siguiente estándar:

EIA/TIA 568 B.3 for fiber optics

Tal estándar menciona que la pérdida de inserción por cualquier empalme (ya sea de fusión o mecánico) deberá ser menor de 0.3 dB, siendo 0.1 dB un valor ampliamente utilizado en el caso de empalmes por fusión.

Con respecto a los conectores, se menciona que la pérdida por inserción máxima es de 0.75 dB por conexión (es decir 2 conectores acoplados).

Valores Típicos

En el caso de la tecnología CWDM, no sé encontraron valores confiables y definitivos de los parámetros del equipo; es por ello que se recurrió a investigar equipos utilizados en dicha tecnología y utilizar dichos valores para realizar los cálculos.

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

Para velocidades de transmisión de 2.5 Gb/s se encontraron varios equipos como los referidos en [3] que funcionan en el intervalo de 1270 nm a 1610 nm y están diseñados para aplicaciones típicas de hasta 80 km; los parámetros extraídos se muestran a continuación:

CWDM con una velocidad de transmisión de 2.5 Gb/s:

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Potencia media de salida de canal máxima	dBm	5
Potencia media de salida de canal mínima	dBm	0
Sensibilidad del receptor mínima	dBm	-28

Cuadro 3.9.- parámetros utilizados para CWDM a 2.5 Gb/s.

En el caso de utilizar velocidades de transmisión de 10 Gb/s, tampoco se encontraron valores de los parámetros en recomendaciones o estándares, es por ello que también se recurrió a investigar equipos utilizados como el mostrado en [4], que trabaja en el intervalo de 1270 nm a 1610 nm y que se especifica que tiene 14 dB de presupuesto de potencia mínimo (ver Capítulo 3.4). Los parámetros de interés para este trabajo, son los siguientes:

CWDM con una velocidad de transmisión de 10 Gb/s:

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Potencia media de salida de canal máxima	dBm	3
Potencia media de salida de canal mínima	dBm	-1
Sensibilidad del receptor mínima	dBm	-15

Cuadro 3.10.- parámetros utilizados para CWDM a 10 Gb/s.

En el caso de los Multiplexores y Demultiplexores para ambas tecnologías: CWDM y DWDM; tampoco fue posible encontrar alguna norma o estándar que mencionara la atenuación que provocarían al sistema; dicho parámetro es muy importante en la elaboración de los presupuestos de potencia.

Para DWDM se encontró el Mux/Demux descrito en [5], cuya capacidad es de 42 canales ya sea en la banda C y/o L de acuerdo a [14], que se adecua perfectamente a las configuraciones consideradas en este trabajo. Los parámetros de interés se muestran a continuación:

Mux/Demux para DWDM

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Número máximo de canales	--	42
Espaciamiento intercanal	GHz	100
Pérdida típica por inserción	dB	3

Cuadro 3.11.- parámetros utilizados en el Mux/Demux para DWDM.

En el caso de CWDM, el Mux/Demux de la referencia [6], tiene la capacidad de soportar hasta 16 canales de acuerdo a [13] ya sea en la banda C y/o L de acuerdo a [14], que se adecua perfectamente a las configuraciones consideradas en este trabajo. Los parámetros de interés se muestran a continuación:

Mux/Demux para CWDM

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Número máximo de canales	--	16
Pérdida por inserción de canal	dB	3.5

Cuadro 3.12.- parámetros utilizados en el Mux/Demux para CWDM.

3.3.- EFECTO DE LA DISPERSIÓN

Partamos de la siguiente expresión general que proporciona el factor de ensanchamiento para pulsos de entrada Gaussianos provenientes de una fuente Gaussiana [1] [7]:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left[\left(1 + \frac{C\beta_2 L}{2\sigma_0^2} \right)^2 + (1 + V_\omega^2) \left(\frac{\beta_2 L}{2\sigma_0^2} \right)^2 + \frac{1}{2} (1 + C^2 + V_\omega^2) \left(\frac{\beta_3 L}{4\sigma_0^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Tal expresión contempla la dispersión de la fibra, la pendiente de la dispersión, la desviación de la frecuencia central de las fuentes luminosas (Chirp) y la anchura del impulso de entrada y del espectro de la fuente [7].

Donde:

σ = ensanchamiento del pulso debido a su propagación en la fibra.

σ_0 = ancho temporal RMS del pulso de entrada.

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

$C =$ Chirp

$\beta_2 =$ parámetro GVD.

$L =$ Longitud de la fibra.

$V_\omega \equiv 2\sigma_\omega\sigma_0$

$\sigma_\omega =$ ancho espectral RMS de la fuente.

$\beta_3 = \frac{d\beta_2}{d\omega}$ pendiente de la dispersión (dispersión de segundo orden).

Para efectos prácticos de este trabajo, en la ecuación (3) se desprecia tanto el Chirp como la dispersión de segundo orden; es decir:

$$C = 0$$

$$\beta_3 = 0$$

Dando como resultado:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left[1 + (1 + V_\omega^2) \left(\frac{\beta_2 L}{2\sigma_0^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

Sustituyendo el factor V_ω y reordenando la expresión, tenemos:

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} = \left[1 + \left(\frac{\beta_2 L}{2\sigma_0^2} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_\omega \beta_2 L}{\sigma_0} \right)^2 \right] = \left[1 + \left(\frac{\beta_2 L}{\sigma_0} \right)^2 \left(\frac{1}{4\sigma_0^2} + \sigma_\omega^2 \right) \right] \quad (3.2)$$

Sustituyendo la expresión (2.8) en (3.2) para tener la expresión en función de parámetros más comúnmente utilizados:

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} = \left[1 + \left(\frac{D\lambda^2 L}{2\pi c \sigma_0} \right)^2 \left(\frac{1}{4\sigma_0^2} + \sigma_\omega^2 \right) \right] \quad (3.2')$$

Despejando σ de la expresión anterior:

$$\sigma^2 = \left[\sigma_0^2 + \left(\frac{D\lambda^2 L}{2\pi c} \right)^2 \left(\frac{1}{4\sigma_0^2} + \sigma_\omega^2 \right) \right] \quad (3.3)$$

Por lo tanto, el ensanchamiento del pulso se puede expresar como:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + \sigma_D^2 \quad (3.4)$$

Donde [7]:

$$\sigma_D^2 = \left(\frac{D\lambda^2 L}{2\pi c} \right)^2 \left(\frac{1}{4\sigma_0^2} + \sigma_\omega^2 \right) \quad (3.5)$$

Por otra parte, dado que se están considerando pulsos sin Chirp; los pulsos de entrada tienen una duración que es una fracción del periodo de bit ($T_b = \frac{1}{B}$). La Expresión (3.6) indica que N veces la anchura rms del pulso de entrada debe caber en el periodo de bit reducido por el ciclo de trabajo ($f < 1$) [7]:

$$N\sigma_0 = \frac{f}{B} \quad (3.6)$$

Donde:

N = factor de forma.

f = ciclo de trabajo.

B = bit rate.

El tipo de modulación normalmente utilizada en los sistemas de transmisión, como los que aquí analizamos es NRZ⁶ de acuerdo a las recomendaciones [8] y [9].

Se puede suponer que $N = 4$ lo que significaría que la anchura completa rms del pulso de entrada cabe dos veces en el periodo de bit [7], es decir:

$$4\sigma_0 = T_b$$

Donde σ_0 se relaciona con la anchura espectral (FWHM⁷) mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_0 = \frac{T_{FWHM}}{2.3548}$$

Así pues, sustituyendo (3.6) en (3.5), tenemos que:

$$\sigma_D^2 = \left(\frac{D\lambda^2 L}{c} \right)^2 \left(\left(\frac{NB}{4\pi f} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_\omega}{2\pi} \right)^2 \right) \quad (3.7)$$

Para el tipo de modulación utilizada y las consideraciones mencionadas:

$$f = 1$$

$$N = 4$$

⁶ Non Return to Zero.

⁷ Full Width Half Maximum.

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

Sustituyendo dichos valores en la ecuación (3.7), llegamos a la siguiente expresión:

$$\sigma_D^2 = \left(\frac{D\lambda^2 L}{c} \right)^2 \left(\left(\frac{B}{\pi} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_\omega}{2\pi} \right)^2 \right) \quad (3.7')$$

Como se aprecia en la ecuación (3.7'), cuando se tienen altas velocidades de transmisión y se emplean fuentes con anchos espectrales angostos, por simplicidad se puede despreciar σ_ω , dando como resultado:

$$\sigma_D^2 = \left(\frac{D\lambda^2 LB}{c\pi} \right)^2 \quad (3.8)$$

Para un valor específico de penalización de potencia⁸ y de la tasa de bits erróneos (BER), hay un límite aceptable para la dispersión que es cuando el ensanchamiento máximo es igual a una cierta fracción ε del periodo de bit, es decir:

$$\sigma_{D\max} = \frac{\varepsilon}{B} \quad (3.9)$$

Sustituyendo (3.9) en (3.8):

$$\left(\frac{\varepsilon}{B} \right)^2 = \left(\frac{D\lambda^2 LB}{c\pi} \right)^2 \quad (3.10)$$

Despejando la longitud (L) de la expresión anterior, se llega a:

$$L = \frac{\varepsilon c \pi}{B^2 |D| \lambda^2} \quad (3.11)$$

que es la expresión utilizada para calcular la longitud de los enlaces limitada por la dispersión para una ε dada.

3.3.1.- PENALIZACIÓN POR DISPERSIÓN

Como se ha dicho anteriormente, tanto la atenuación como la dispersión afectan el desempeño del sistema, en particular, el ensanchamiento de los pulsos luminosos a causa de la dispersión puede ocasionar que estos se traslapen, aumentando así el BER, por lo que habrá que compensar este

⁸ Ver Capítulo 3.3.1.

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

deterioro de la señal con una cantidad adicional de potencia llamada "penalización de potencia" [10] [11] que se determina mediante [7]:

$$P[\text{dB}] = 5 \log(1 + 2\pi \varepsilon^2)$$

Donde:

ε = fracción del periodo de bit que limita el ensanchamiento del pulso (ver sección anterior).

En el Cuadro 3.13 se indica los valores de ε para varias penalizaciones de potencia; siendo los valores recomendados de 1 o 2 dB según la referencia [12].

PENALIZACIÓN DE POTENCIA [dB]	ε
0.5	0.203
1	0.305
2	0.491

Cuadro 3.13.- Penalizaciones de potencia.

3.4.- PRESUPUESTOS DE POTENCIA

La finalidad de elaborar los presupuestos de potencia es garantizar que la potencia necesaria llegue al receptor para mantener confiable el enlace de telecomunicaciones [1]. El presupuesto de potencia se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P_p = P_{tra} - P_{rec} - P_{perd} - P_{marg}$$

Donde:

P_{tra} = potencia del transmisor

P_{rec} = sensibilidad del receptor

P_{perd} = potencia pérdida en conectores, empalmes, etc.

P_{marg} = margen de seguridad

La intención de agregar un margen de seguridad es asignar cierta cantidad de potencia para prever empalmes o conexiones deficientes, envejecimiento del equipo o cualquier imprevisto en general, siendo el valor típico de dicho margen de seguridad 3 dB [13].

Como en cualquier sistema de telecomunicaciones, las conexiones en los sistemas ópticos son necesarias para unir sus distintos componentes; existen varios tipos:

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

La unión permanente entre dos segmentos de fibra óptica es conocida como empalme; la calidad del empalme está caracterizada por las pérdidas de inserción y de reflexión. Este puede ser mecánico o de fusión y aunque actualmente todos los empalmes tienen pérdidas muy bajas, los de fusión se distinguen por sus pérdidas mínimas [11].

Los conectores son usados para unir el cable de fibra óptica a los distintos componentes como transmisor o receptor o para realizar uniones temporales. Existen muchos tipos de conectores, algunos de los más utilizados se muestran a continuación [14]:



ST es el conector más popular en redes multimodo como lo son la mayoría de las utilizadas en edificios y campus.



FC/PC ha sido uno de los conectores más populares para fibras monomodo por muchos años pero esta siendo remplazado por los SC's y LC's.



SC es un conector de rápida inserción, ampliamente utilizado en sistemas monomodo por su alto desempeño.



LC es un nuevo conector de pequeñas dimensiones y con un terminado sencillo que presenta buen desempeño altamente favorecido para fibra monomodo.

Figura 3.2.- Diferentes tipos de conectores.

Todos los conectores presentan ciertas características que los identifican. En el Cuadro 3.14 se resumen algunas de estas características siendo la más

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

importante para el presente trabajo la pérdida de inserción ya que es un dato que se utilizó al elaborar los presupuestos de potencia.

TIPOS DE CONECTORES

CONECTOR	PÉRDIDAS DE INSERCIÓN	TIPO DE FIBRA	APLICACIONES
FC	0.50 – 1.00 dB	SM, MM	Comunicaciones de datos, Telecomunicaciones
LC	0.15 dB (SM), 0.10 dB (MM)	SM, MM	Interconexiones de alta densidad
SC	0.20 – 0.45 dB	SM, MM	Comunicaciones de datos
SC Dúplex	0.20 – 0.45 dB	SM, MM	Comunicaciones de datos
ST	Típ. 0.40 dB (SM), Típ. 0.50 dB (MM)	SM, MM	Edificios, Seguridad

Cuadro 3.14.- Conectores comúnmente utilizados.

En los enlaces de esta red se utilizarán paneles de distribución (patch panels) para concentrar todos los puntos de la red de manera ordenada. Un patch panel, además, permite reconfigurar la red de manera simple y económica, mediante una nueva interconexión de los segmentos que componen el mallado.

Los paneles de distribución, como el mostrado en la Figura 3.3 proporcionan un espacio centralizado para probar, monitorear, acomodar y distribuir las distintas fibras ópticas de los cables utilizados en la red. El panel recibe la fibra óptica en alguno de sus puertos e internamente mediante un segmento corto de fibra (patch cord) la dirige a otro puerto de salida [15].

Los puertos están disponibles en varios tipos de conectores; dado el número de conexiones para cada enlace (2 en total) y de acuerdo al estándar consultado y referido anteriormente⁹, se utilizó un valor de 1.5 dB por pérdidas de inserción del panel.

⁹ Consultar el estándar EIA/TIA 568 B.3 for fiber optics [20].



Figura 3.3.- Panel de distribución de fibra óptica.

Presupuestos de potencia para CWDM

En resumen, para realizar los presupuestos de potencia en CWDM se tomó en cuenta lo siguiente:

- ✓ El valor de los coeficientes tanto de atenuación como de dispersión se obtuvieron de la recomendación G.695 de la ITU-T (ambos son valores máximos).
- ✓ La sensibilidad del receptor así como la potencia del láser se tomó de valores típicos (para un alcance de 80 km).
- ✓ Los conectores utilizados son del tipo SC cuyas pérdidas por inserción son de 0.2 dB (valor típico).
- ✓ Las pérdidas de los patch panels se obtuvieron del estándar EIA/TIA 568 B.3 for fiber optics. Las pérdidas del Multiplexor y del Demultiplexor se tomaron de equipos utilizados comúnmente.
- ✓ Los valores de los empalmes de fusión se tomaron del estándar EIA/TIA 568 B.3 for fiber optics.

Presupuestos de potencia para DWDM

Resumiendo, para obtener los presupuestos de potencia en DWDM, se consideró que:

- ✓ El valor de los coeficientes tanto de atenuación como de dispersión se obtuvieron de las ecuaciones y tablas incluidas en la recomendación G.655 de la ITU-T (se consideró el valor promedio).
- ✓ La sensibilidad así como la potencia del láser se obtuvo de los cuadros 8.2 y 8.4 de la recomendación G.698.1 de la ITU-T (para un alcance de 80 km).

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

- ✓ Los conectores utilizados son del tipo SC cuyas pérdidas por inserción son de 0.2 dB (valor típico).
- ✓ Las pérdidas consideradas en el Multiplexor y en el Demultiplexor son valores de equipos comerciales.
- ✓ Las pérdidas de los patch panels se obtuvieron del estándar EIA/TIA 568 B.3 for fiber optics. Los valores de los empalmes de fusión se tomaron del estándar EIA/TIA 568 B.3 for fiber optics.

En el Cuadro 3.15 se resumen los parámetros utilizados en la elaboración de los presupuestos de potencia para las configuraciones de la tecnologías WDM bajo análisis:

RESUMEN DE LOS PARÁMETROS

ELEMENTO	PARAMETRO	VALOR UTILIZADO	REFERENCIA
Transmisor/Receptor CWDM a 2.5 Gb/s	Potencia óptica	2.5 dBm	Equipo [3]
	Sensibilidad del receptor	-28 dBm	Equipo [3]
Transmisor/Receptor CWDM a 10 Gb/s	Potencia óptica	2.5 dBm	Equipo [4]
	Sensibilidad del receptor	-15 dBm	Equipo [4]
Mux/Demux CWDM (16 canales)	Pérdida de inserción	2.5 dB	Equipo [6]
Transmisor/Receptor DWDM a 2.5 Gb/s	Potencia óptica	2 dBm	ITU-T [8]
	Sensibilidad del receptor	-28 dBm	ITU-T [8]
Transmisor/Receptor DWDM a 10 Gb/s	Potencia óptica	5.5 dBm	ITU-T [8]
	Sensibilidad del receptor	-24 dBm	ITU-T [8]
Mux/Demux DWDM (40 canales)	Pérdida de inserción	3 dB	Equipo [5]
Empalme de fusión	Pérdida de inserción	0.1 dB	EIA/TIA [20]
Patch panel	Pérdida de inserción	1.5 dB	Equipo, EIA/TIA [15] [20]

Cuadro 3.15.- Valores de los parámetros utilizados en los equipos WDM.

3.5.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agrawal, G.P. *Fiber-Optic Communication Systems*, Second Edition. Jhon Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [2] Gutiérrez Castrejón, R. *Hacia un sistema de telecomunicaciones completamente óptico*. Instituto de Ingeniería, UNAM, 2005.
- [3] *2.5 Gbps SFP Transceiver*.
EOLS-1624-CW, Specification Sheet. 2007.
<http://www.eoptolink.com>

2.67Gbps 1270~1610nm CWDM DFB Transceiver.
AB-SFP-OC48, Specification Sheet.
<http://www.aibaotech.com>
- [4] *CWDM XFP Series*.
EOLX-1696-X, Specification Sheet. 2009.
<http://www.eoptolink.com>
- [5] *DWDM Mux/Demux Component for 100 GHz*.
G4-100 DWDM, Specification Sheet. Rev. 10/04
<http://www.confluentphotonics.com>
- [6] *LambdaDriver® Passive Optical Modules WDM & Optical Transport CWDM Mux/Dmux*, Specification Sheet. 2008.
<http://www.mrv.com>
- [7] ITU-T Supplement 39, "Optical system design and engineering considerations," February 2006.
- [8] ITU-T Recommendation G.698.1, "Multichannel DWDM applications with single channel optical interfaces," December 2006.
- [9] ITU-T Recommendation G.695, "Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications," December 2006.
- [10] Franz, J.H. and Jain V.K. *Optical Communications Components and Systems*. Narosa Publishing House, 2000.
- [11] Mynbaev, D. K. and Lowell L. Scheiner. *Fiber-Optic Communications Technology*. Prentice Hall, 2001.
- [12] Ramaswami, R. and Kumar N. Sivarajan. *Optical Networks: A Practical Perspective*, Second Edition. Academic Press, 2002.

Capítulo 3.- DISEÑO PRELIMINAR DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

- [13] Calculating Fiber Loss and Distances: A Technology Overview.
<http://chapters.scte.org/cascade/Calculating%20Fiber%20Loss.pdf>
- [14] *Fiber Optic Termination.*
http://www.radioptica.com/Fibra/tipos_conectores_opticos.asp
- [15] *Horizontal Installation Practices For Fiber Optic Cabling Systems.*
www.levitontelcom.com
- [16] ITU-T Recommendation G.652, "*Characteristics of a single-mode optical fibre and cable,*" June 2005.
- [17] ITU-T Recommendation G.655, "*Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable,*" March 2006.
- [18] ITU-T Recommendation G.694.2, "*Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid,*" December 2002.
- [19] ITU-T Recommendation G.694.1, "*Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid,*" June 2002.
- [20] EIA/TIA 568 B.3 for fiber optics

4.- ANÁLISIS DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

La topología física de la Delta Metropolitana es la mostrada en la Figura 4. Se eligió de entre otras posibles, ya que es la que presenta en general similitud en la longitud de todos los enlaces, no se depende exclusivamente de una sola línea del metro para asegura la conectividad en tramos largos y además se extiende sobre una mayor área. Esto último es útil por sí en el futuro se desean incorporar a la red otras instituciones o dependencias cercanas a la Delta Metropolitana.



Figura 4.- Topología detallada de la Delta Metropolitana.

Capítulo 4.- ANÁLISIS DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

El análisis efectuado se realizó bajo condiciones de "peor escenario", ya que se siguieron normas y recomendaciones que proporcionan los valores menos favorables (en algunos casos, los valores límite) de los parámetros involucrados en los componentes del sistema; bajo este escenario, se garantiza el funcionamiento de los enlaces en caso de resultar factibles bajo las consideraciones tomadas a lo largo del Capítulo 3.

En el siguiente cuadro se resumen las características más importantes de la topología mostrada, considerando el tramo que va desde la estación del metro más cercana a los respectivos centros de cómputo (distancia conocida en los sistemas de telecomunicaciones como "última milla"):

DISTANCIAS POR ENLACE CONSIDERANDO LA ÚLTIMA MILLA

ENLACE	DISTANCIA [km]	EMPALMES POR FUSIÓN	PATCH PANELS
UNAM – UAM-I	39.325	21	2
UNAM - CINVESTAV	32.544	20	1
UAM-I - CINVESTAV	36.588	20	2

Cuadro 4.- Detalles de la topología elegida incluida la última milla.

Consideraciones:

- Tanto en la última milla de cada extremo de los enlaces como en los cambios de línea dentro del metro se consideró una distancia de transmisión de 2.5 km.
- Aún cuando no se muestran por practicidad en la figura 4, en cada estación hay un empalme sencillo por fusión.
- El patch panel de la estación Centro Médico está colocado sobre la línea 3, el de Santa Anita sobre la línea 4 y el de la estación Consulado puede estar en la línea 4 o en la 5.

PRESUPUESTOS DE POTENCIA

Los presupuestos de potencia que se muestran a continuación, se elaboraron tomando las consideraciones descritas en los Capítulos 3.3.1 y 3.4 tanto para la tecnología CWDM como para la tecnología DWDM y para canales de 2.5 Gb/s o de 10 Gb/s, además de las especificaciones propias de cada enlace como lo es su longitud (incluyendo la última milla), el número de empalmes de fusión y el número de paneles de distribución o patch panels.

En el caso de la tecnología CWDM, no es común el uso de canales con velocidades de transmisión de 10 Gb/s, consecuentemente, los equipos de este tipo no son muy comerciales. Aunque se incluyó esta configuración como

Capítulo 4.- ANÁLISIS DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

parte del análisis de este trabajo, con las especificaciones con la que se realizaron los presupuestos de potencia se llegó a la conclusión de que no se puede tomar en cuenta para la elección de la configuración a implementar como se puede observar en las tablas comparativas que se muestran más adelante.

Sin embargo, resultó interesante incluir dicha configuración en el análisis realizado para determinar la factibilidad de su implementación en caso de ser necesario y para comparar los resultados obtenidos con los de las otras configuraciones. A continuación se presentan resultados para los tres enlaces que conforman la red.

ENLACE UNAM – UAM-I

Para el enlace entre la UNAM y la UAM-I utilizando la tecnología CWDM con todos los canales a 2.5 Gb/s, se tiene el siguiente presupuesto de potencia:

ENLACE UNAM - UAM-I CWDM (2.5 Gb/s)		
	Pérdida/Ganancia	Presupuesto
Sensitividad		28
Demux	-3.50	24.50
Conectores	-0.40	24.10
Empalmes	-2.10	22.00
Mux	-3.50	18.50
Láser	2.50	21.00
Patch panels	-3.00	18.00
Última milla	0.00	18.00
Penalización por dispersión (max.)	-1.00	17.00
Margen	-3.00	14.00
	Total [dB]	14.00

Conectores	2
Pérdidas c/u	0.2
Empalmes	21
Pérdidas c/u	0.1
Patch panels	2
Pérdidas c/u	1.5

Cuadro 4.1.- Presupuesto de potencia UNAM – UAM-I para CWDM a 2.5 Gb/s.

Capítulo 4.- ANÁLISIS DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

Para el enlace entre la UNAM y la UAM-I utilizando la tecnología CWDM con todos los canales a 10 Gb/s, se tiene el siguiente presupuesto de potencia:

ENLACE UNAM - UAM-I CWDM (10 Gb/s)				
	Pérdida/Ganancia	Presupuesto		
Sensitividad		15	Conectores	2
Demux	-3.50	11.50	Pérdidas c/u	0.2
Conectores	-0.40	11.10		
Empalmes	-2.10	9.00	Empalmes	21
Mux	-3.50	5.50	Pérdidas c/u	0.1
Láser	2.50	8.00		
Patch panels	-3.00	5.00	Patch panels	2
Última milla	0.00	5.00	Pérdidas c/u	1.5
Penalización por dispersión (max.)	-1.00	4.00		
Margen	-3.00	1.00		
	Total [dB]	1.00		

Cuadro 4.2.- Presupuesto de potencia UNAM – UAM-I para CWDM a 10 Gb/s.

Para el enlace entre la UNAM y la UAM-I utilizando la tecnología DWDM con todos los canales a 2.5 Gb/s, se tiene el siguiente presupuesto de potencia:

ENLACE UNAM - UAM-I DWDM (2.5 Gb/s)				
	Pérdida/Ganancia	Presupuesto		
Sensitividad		28.00	Conectores	2
Demux	-3.00	25.00	Pérdidas c/u	0.2
Conectores	-0.40	24.60		
Empalmes	-2.10	22.50	Empalmes	21
Mux	-3.00	19.50	Pérdidas c/u	0.1
Láser	2.00	21.50		
Patch panels	-3.00	18.50	Patch panels	2
Última milla	0.00	18.50	Pérdidas c/u	1.5
Penalización por dispersión (max.)	-1.00	17.50		
Margen	-3.00	14.50		
	Total [dB]	14.50		

Cuadro 4.3.- Presupuesto de potencia UNAM – UAM-I para DWDM a 2.5 Gb/s.

Capítulo 4.- ANÁLISIS DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

Para el enlace entre la UNAM y la UAM-I utilizando la tecnología DWDM con todos los canales a 10 Gb/s, se tiene el siguiente presupuesto de potencia:

ENLACE UNAM - UAM-I DWDM (10 Gb/s)				
	Pérdida/Ganancia	Presupuesto		
Sensitividad		24.00	Conectores	2
Demux	-3.00	21.00	Pérdidas c/u	0.2
Conectores	-0.40	20.60		
Empalmes	-2.10	18.50	Empalmes	21
Mux	-3.00	15.50	Pérdidas c/u	0.1
Láser	5.50	21.00		
Patch panels	-3.00	18.00	Patch panels	2
Última milla	0.00	18.00	Pérdidas c/u	1.5
Penalización por dispersión (max.)	-1.00	17.00		
Margen	-3.00	14.00		
	Total [dB]	14.00		

Cuadro 4.4.- Presupuesto de potencia UNAM – UAM-I para DWDM a 10 Gb/s.

ENLACE UNAM – CINVESTAV

Para el enlace entre la UNAM y el CINVESTAV utilizando la tecnología CWDM con todos los canales a 2.5 Gb/s, se tiene el siguiente presupuesto de potencia:

ENLACE UNAM - CINVESTAV CWDM (2.5 Gb/s)				
	Pérdida/Ganancia	Presupuesto		
Sensitividad		28	Conectores	2
Demux	-3.50	24.50	Pérdidas c/u	0.2
Conectores	-0.40	24.10		
Empalmes	-2.00	22.10	Empalmes	20
Mux	-3.50	18.60	Pérdidas c/u	0.1
Láser	2.50	21.10		
Patch panels	-1.50	19.60	Patch panels	1
Última milla	0.00	19.60	Pérdidas c/u	1.5
Penalización por dispersión (max.)	-1.00	18.60		
Margen	-3.00	15.60		
	Total [dB]	15.60		

Cuadro 4.5.- Presupuesto de potencia UNAM – CINVESTAV para CWDM a 2.5 Gb/s.

Capítulo 4.- ANÁLISIS DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

Para el enlace entre la UNAM y el CINVESTAV utilizando la tecnología CWDM con todos los canales a 10 Gb/s, se tiene el siguiente presupuesto de potencia:

ENLACE UNAM - CINVESTAV CWDM (10 Gb/s)		
	Pérdida/Ganancia	Presupuesto
Sensitividad		15
Demux	-3.50	11.50
Conectores	-0.40	11.10
Empalmes	-2.00	9.10
Mux	-3.50	5.60
Láser	2.50	8.10
Patch panels	-1.50	6.60
Última milla	0.00	6.60
Penalización por dispersión (max.)	-1.00	5.60
Margen	-3.00	2.60
Total [dB]		2.60

Conectores	2
Pérdidas c/u	0.2
Empalmes	20
Pérdidas c/u	0.1
Patch panels	1
Pérdidas c/u	1.5

Cuadro 4.6.- Presupuesto de potencia UNAM – CINVESTAV para CWDM a 10 Gb/s.

Para el enlace entre la UNAM y el CINVESTAV utilizando la tecnología DWDM con todos los canales a 2.5 Gb/s, se tiene el siguiente presupuesto de potencia:

ENLACE UNAM - CINVESTAV DWDM (2.5 Gb/s)		
	Pérdida/Ganancia	Presupuesto
Sensitividad		28.00
Demux	-3.00	25.00
Conectores	-0.40	24.60
Empalmes	-2.00	22.60
Mux	-3.00	19.60
Láser	2.00	21.60
Patch panels	-1.50	20.10
Última milla	0.00	20.10
Penalización por dispersión (max.)	-1.00	19.10
Margen	-3.00	16.10
Total [dB]		16.10

Conectores	2
Pérdidas c/u	0.2
Empalmes	20
Pérdidas c/u	0.1
Patch panels	1
Pérdidas c/u	1.5

Cuadro 4.7.- Presupuesto de potencia UNAM – CINVESTAV para DWDM a 2.5 Gb/s.

Capítulo 4.- ANÁLISIS DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

Para el enlace entre la UNAM y el CINVESTAV utilizando la tecnología DWDM con todos los canales a 10 Gb/s, se tiene el siguiente presupuesto de potencia:

ENLACE UNAM - CINVESTAV DWDM (10 Gb/s)				
	Pérdida/Ganancia	Presupuesto		
Sensitividad		24.00	Conectores	2
Demux	-3.00	21.00	Pérdidas c/u	0.2
Conectores	-0.40	20.60		
Empalmes	-2.00	18.60	Empalmes	20
Mux	-3.00	15.60	Pérdidas c/u	0.1
Láser	5.50	21.10		
Patch panels	-1.50	19.60	Patch panels	1
Última milla	0.00	19.60	Pérdidas c/u	1.5
Penalización por dispersión (max.)	-1.00	18.60		
Margen	-3.00	15.60		
	Total [dB]	15.60		

Cuadro 4.8.- Presupuesto de potencia UNAM – CINVESTAV para DWDM a 10 Gb/s.

ENLACE UAM-I – CINVESTAV

Para el enlace entre la UAM-I y el CINVESTAV utilizando la tecnología CWDM con todos los canales a 2.5 Gb/s, se tiene el siguiente presupuesto de potencia:

ENLACE UAM-I - CINVESTAV CWDM (2.5 Gb/s)				
	Pérdida/Ganancia	Presupuesto		
Sensitividad		28	Conectores	2
Demux	-3.50	24.50	Pérdidas c/u	0.2
Conectores	-0.40	24.10		
Empalmes	-2.00	22.10	Empalmes	20
Mux	-3.50	18.60	Pérdidas c/u	0.1
Láser	2.50	21.10		
Patch panels	-3.00	18.10	Patch panels	2
Última milla	0.00	18.10	Pérdidas c/u	1.5
Penalización por dispersión (max.)	-1.00	17.10		
Margen	-3.00	14.10		
	Total [dB]	14.10		

Cuadro 4.9.- Presupuesto de potencia UAM-I – CINVESTAV para CWDM a 2.5 Gb/s.

Capítulo 4.- ANÁLISIS DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

Para el enlace entre la UAM-I y el CINVESTAV utilizando la tecnología CWDM con todos los canales a 10 Gb/s, se tiene el siguiente presupuesto de potencia:

ENLACE UAM-I - CINVESTAV CWDM (10 Gb/s)				
	Pérdida/Ganancia	Presupuesto		
Sensitividad		15	Conectores	2
Demux	-3.50	11.50	Pérdidas c/u	0.2
Conectores	-0.40	11.10		
Empalmes	-2.00	9.10	Empalmes	20
Mux	-3.50	5.60	Pérdidas c/u	0.1
Láser	2.50	8.10		
Patch panels	-3.00	5.10	Patch panels	2
Última milla	0.00	5.10	Pérdidas c/u	1.5
Penalización por dispersión (max.)	-1.00	4.10		
Margen	-3.00	1.10		
	Total [dB]	1.10		

Cuadro 4.10.- Presupuesto de potencia UAM-I – CINVESTAV para CWDM a 10 Gb/s.

Para el enlace entre la UAM-I y el CINVESTAV utilizando la tecnología DWDM con todos los canales a 2.5 Gb/s, se tiene el siguiente presupuesto de potencia:

ENLACE UAM-I - CINVESTAV DWDM (2.5 Gb/s)				
	Pérdida/Ganancia	Presupuesto		
Sensitividad		28.00	Conectores	2
Demux	-3.00	25.00	Pérdidas c/u	0.2
Conectores	-0.40	24.60		
Empalmes	-2.00	22.60	Empalmes	20
Mux	-3.00	19.60	Pérdidas c/u	0.1
Láser	2.00	21.60		
Patch panels	-3.00	18.60	Patch panels	2
Última milla	0.00	18.60	Pérdidas c/u	1.5
Penalización por dispersión (max.)	-1.00	17.60		
Margen	-3.00	14.60		
	Total [dB]	14.60		

Cuadro 4.11.- Presupuesto de potencia UAM-I – CINVESTAV para DWDM a 2.5 Gb/s.

Capítulo 4.- ANÁLISIS DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

Para el enlace entre la UAM-I y el CINVESTAV utilizando la tecnología DWDM con todos los canales a 10 Gb/s, se tiene el siguiente presupuesto de potencia:

ENLACE UAM-I - CINVESTAV DWDM (10 Gb/s)		
	Pérdida/Ganancia	Presupuesto
Sensitividad		24.00
Demux	-3.00	21.00
Conectores	-0.40	20.60
Empalmes	-2.00	18.60
Mux	-3.00	15.60
Láser	5.50	21.10
Patch panels	-3.00	18.10
Última milla	0.00	18.10
Penalización por dispersión (max.)	-1.00	17.10
Margen	-3.00	14.10
	Total [dB]	14.10

Conectores	2
Pérdidas c/u	0.2
Empalmes	20
Pérdidas c/u	0.1
Patch panels	2
Pérdidas c/u	1.5

Cuadro 4.12.- Presupuesto de potencia UAM-I – CINVESTAV para DWDM a 10 Gb/s.

En resumen, los presupuestos de potencia obtenidos en cada una de las configuraciones consideradas en este análisis, se muestran a continuación agrupadas por enlace y por configuración:

PRESUPUESTOS DE POTENCIA

CONFIGURACIÓN	UNAM - UAM-I [dB]	UNAM - CINVESTAV [dB]	UAM-I - CINVESTAV [dB]
CWDM 2.5 Gb/s	14.00	15.60 dB	14.10
CWDM 10 Gb/s	1.00	2.60	1.10
DWDM 2.5 Gb/s	14.50	16.10	14.60
DWDM 10 Gb/s	14.00	15.60	14.10

Cuadro 4.13.- Resumen de los presupuestos de potencia obtenidos.

En el cuadro anterior puede apreciarse que el enlace más comprometido por los presupuestos de potencia es el de UNAM –UAM-I debido a que es el que tiene la mayor distancia, el mayor número de empalmes y además tiene 2 patch panels.

Dicho enlace es representativo ya que cualquier configuración que sea factible de implementar en él, funcionará en los demás enlaces.

Por otra parte, se observa que los presupuestos de potencia para DWDM cambian ligeramente al pasar de 2.5 Gb/s a 10 Gb/s, no así, el caso de CWDM donde el cambio es drástico debido a que actualmente los equipos de 10 Gb/s están diseñados para corto alcance (la sensibilidad es mucho mayor).

El enlace con mayores presupuestos de potencia es el de la UNAM al CINVESTAV ya que corresponde al enlace más corto (su trayectoria sólo tiene un cambio de línea dentro del metro) y además, tiene únicamente un patch panel a diferencia de los demás enlaces que tienen 2.

4.1.- TABLAS COMPARATIVAS

Las configuraciones en las que se centró el análisis son las que se describieron en el Cuadro 3 tanto para velocidades de transmisión de 2.5 Gb/s como de 10 Gb/s y cuyos valores de los parámetros involucrados se desglosaron a lo largo del Capítulo 3.2 y que se resumen en el Cuadro 3.15.

Las tablas presentadas a continuación contienen los resultados del análisis para cada enlace; en ellas se indica el número de canales de acuerdo a la configuración estudiada y los valores de los coeficientes de dispersión y de atenuación para los canales en los extremos del intervalo de longitudes de onda.

En dichas tablas también se muestra el alcance requerido para cada uno de los enlaces, mismo que se determinó con base en documentos proporcionados por personal del Metro; de la misma manera, se señala el alcance de los dos canales que delimitan el intervalo de longitudes de onda en función de las limitaciones impuestas por la dispersión y por la atenuación de la fibra.

Los coeficientes de atenuación son los reportados tanto en [1] como en [2] para las fibras G.655 y G.652 respectivamente.

Los valores del coeficiente de dispersión se obtuvieron de [2] para la fibra G.652 y de las graficas de las Figuras 3 y 3.1 (dependiendo la categoría de la fibra) para la fibra G.655, cuyas ecuaciones se encuentran en la recomendación [1].

El alcance limitado por la dispersión se calculó mediante la Fórmula (3.11) para una ϵ de 0.305 lo que corresponde a una penalización por dispersión de 1 dB (ver Capítulo 3.3.1).

Las limitaciones impuestas por la atenuación se determinaron a partir de los presupuestos de potencia de cada configuración y del coeficiente de

atenuación de la fibra en la longitud de onda del canal analizado, con ayuda de la siguiente fórmula [3]:

$$L = \frac{P_p}{A}$$

P_p = presupuesto de potencia.

A = coeficiente de atenuación.

De esta manera, el alcance del enlace lo determina la menor de las distancias, ya sea la que este limitada por la dispersión o la que este limitada por la atenuación para cada uno de los extremos del intervalo de longitudes de onda de la configuración estudiada.

A continuación se muestran las topologías de cada uno de los enlaces con su respectiva tabla comparativa:

La topología del enlace UNAM – UAM-I es la mostrada en la Figura 4.1.

ENLACE UNAM – UAM-I

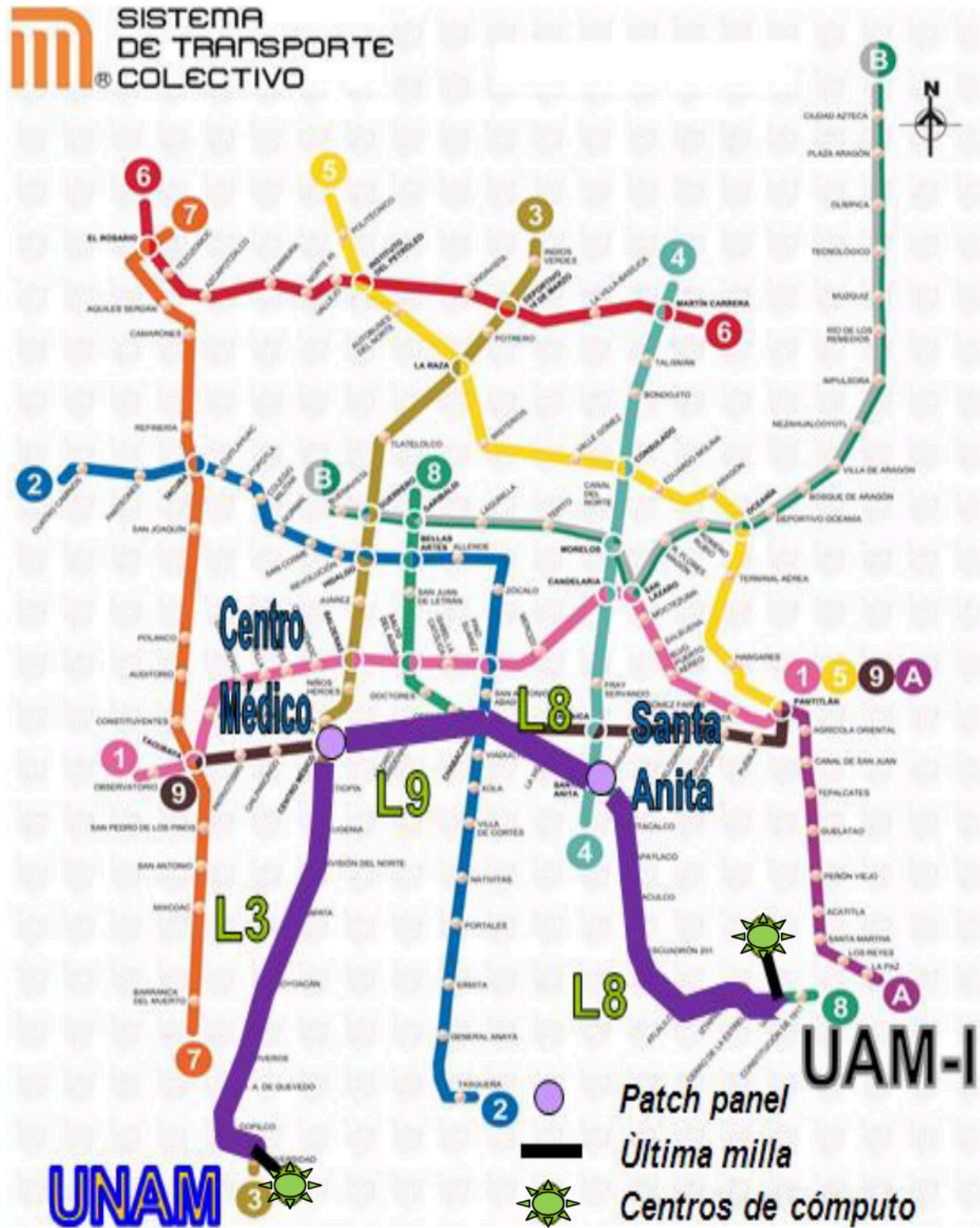


Figura 4.1.- Topología del enlace UNAM – UAM-I.

ENLACE UNAM – UAM-I

TECNOLOGÍA	# CANALES	λ [nm]		Limitación por dispersión			Limitación por atenuación			Penalización por Dispersión [dB] 2.5 y 10 [Gb/s]	
		λ _{min}	λ _{max}	DISPERSIÓN [ps/(nm km)]	ALCANCE [km] 2.5 [Gb/s]	ALCANCE [km] 10 [Gb/s]	ATENUACIÓN [dB/km]	ALCANCE [km] 2.5 [Gb/s]	ALCANCE [km] 10 [Gb/s]		
CWDM sobre ITU-T G.652.D	16 espaciados a 20 nm (ITU-T G.694.2)	1311	1611	-1.85	14217.89	888.62	0.42	33.10	2.36	39.33	1
				21.09	825.93	51.62	0.28	49.47	3.53	39.33	1
DWDM sobre ITU-T G.652.D	40 espaciados a 100 GHz (ITU-T G.694.1)	1529.55	1560.61	16.25	1189.14	74.32	0.28	51.79	50.00	39.33	1
				18.06	1027.79	64.24	0.28	52.73	50.91	39.33	1
DWDM sobre ITU-G.655.D	40 espaciados a 100 GHz (ITU-T G.694.1)	1529.55	1560.61	3.37	5733.96	358.37	0.35	41.43	40.00	39.33	1
				5.06	3668.37	229.27	0.35	41.43	40.00	39.33	1
DWDM sobre ITU-G.655.E	40 espaciados a 100 GHz (ITU-T G.694.1)	1529.55	1560.61	6.51	2968.27	185.52	0.35	41.43	40.00	39.33	1
				8.18	2269.19	141.82	0.35	41.43	40.00	39.33	1
CWDM sobre ITU-G.655.D	6 espaciados a 20 nm (ITU-T G.694.2)	1460	1570	-0.45	47129.63	2945.60	0.35	40.00	2.86	39.33	1
				5.57	3292.74	205.80	0.35	40.00	2.86	39.33	1
DWDM (bandas S, C y L) sobre ITU-G.655.D	120 espaciados a 100 GHz (ITU-T G.694.1)	1491.5	1602.31	1.28	15876.54	992.28	0.35	41.43	40.00	39.33	1
				7.29	2415.41	150.96	0.4	36.25	35.00	39.33	1

Tabla 4.- Comparación de las diversas configuraciones.

Los valores en Gris, corresponden a configuraciones no muy comerciales, mientras que los cuadros marcados no cumplen con el alcance requerido.

La topología del enlace UNAM – CINVESTAV es la mostrada en la Figura 4.2.



Figura 4.2.- Topología del enlace UNAM – CINVESTAV.

ENLACE UNAM - CINVESTAV

TECNOLOGÍA	# CANALES	λ [nm]		Limitación por dispersión		Limitación por atenuación		Penalización por Dispersión [dB] 2.5 y 10 [Gb/s]			
		λ _{min}	λ _{max}	DISPERSIÓN [ps/(nm km)]	ALCANCE [km] 2.5 [Gb/s]	ATENUACIÓN [dB/km]	ALCANCE [km] 2.5 [Gb/s]				
CWDM sobre ITU-T G.652.D	16 espaciados a 20 nm (ITU-T G.694.2)	1311	1611	-1.85	14217.89	888.62	0.42	36.88	6.15	32.55	1
				21.09	825.93	51.62	0.28	55.12	9.19	32.55	1
DWDM sobre ITU-T G.652.D	40 espaciados a 100 GHz (ITU-T G.694.1)	1529.55	1560.61	16.25	1189.14	74.32	0.28	57.50	55.71	32.55	1
				18.06	1027.79	64.24	0.28	58.55	56.73	32.55	1
DWDM sobre ITU-G.655.D	40 espaciados a 100 GHz (ITU-T G.694.1)	1529.55	1560.61	3.37	5733.96	358.37	0.35	46.00	44.57	32.55	1
				5.06	3668.37	229.27	0.35	46.00	44.57	32.55	1
DWDM sobre ITU-G.655.E	40 espaciados a 100 GHz (ITU-T G.694.1)	1529.55	1560.61	6.51	2968.27	185.52	0.35	46.00	44.57	32.55	1
				8.18	2269.19	141.82	0.35	46.00	44.57	32.55	1
CWDM sobre ITU-G.655.D	6 espaciados a 20 nm (ITU-T G.694.2)	1460	1570	-0.45	47129.63	2945.60	0.35	44.57	7.43	32.55	1
				5.57	3292.74	205.80	0.35	44.57	7.43	32.55	1
DWDM (bandas S, C y L) sobre ITU-G.655.D	120 espaciados a 100 GHz (ITU-T G.694.1)	1491.5	1602.31	1.28	15876.54	992.28	0.35	46.00	44.57	32.55	1
				7.29	2415.41	150.96	0.4	40.25	39.00	32.55	1

Tabla 4.1.- Comparación de las diversas configuraciones.

Los valores en Gris, corresponden a configuraciones no muy comerciales, mientras que los cuadros marcados no cumplen con el alcance requerido.

La topología del enlace UAM-I – CINVESTAV es la mostrada en la Figura 4.3.



Figura 4.3.- Topología del enlace UAM-I – CINVESTAV.

ENLACE UAM-I - CINVESTAV

TECNOLOGÍA	# CANALES	λ [nm]		Limitación por dispersión			Limitación por atenuación			Penalización por Dispersión [dB] 2.5 y 10 [Gb/s]	
		λ _{min}	λ _{max}	DISPERSIÓN [ps/(nm km)]	ALCANCE [km] 2.5 [Gb/s]	10 [Gb/s]	ATENUACIÓN [dB/km]	ALCANCE [km] 2.5 [Gb/s]	10 [Gb/s]		ALCANCE REQUERIDO [km]
CWDM sobre ITU-T G.652.D	16 espaciados a 20 nm (ITU-T G.694.2)	1311	1611	-1.85	14217.89	888.62	0.42	33.33	2.60	36.59	1
				21.09	825.93	51.62	0.28	49.82	3.89	36.59	1
DWDM sobre ITU-T G.652.D	40 espaciados a 100 GHz (ITU-T G.694.1)	1529.55	1560.61	16.25	1189.14	74.32	0.28	52.14	50.36	36.59	1
				18.06	1027.79	64.24	0.28	53.09	51.27	36.59	1
DWDM sobre ITU-G.655.D	40 espaciados a 100 GHz (ITU-T G.694.1)	1529.55	1560.61	3.37	5733.96	358.37	0.35	41.71	40.29	36.59	1
				5.06	3668.37	229.27	0.35	41.71	40.29	36.59	1
DWDM sobre ITU-G.655.E	40 espaciados a 100 GHz (ITU-T G.694.1)	1529.55	1560.61	6.51	2968.27	185.52	0.35	41.71	40.29	36.59	1
				8.18	2269.19	141.82	0.35	41.71	40.29	36.59	1
CWDM sobre ITU-G.655.D	6 espaciados a 20 nm (ITU-T G.694.2)	1460	1570	-0.45	47129.63	2945.60	0.35	40.29	3.14	36.59	1
				5.57	3292.74	205.80	0.35	40.29	3.14	36.59	1
DWDM (bandas S, C y L) sobre ITU-G.655.D	120 espaciados a 100 GHz (ITU-T G.694.1)	1491.5	1602.31	1.28	15876.54	992.28	0.35	41.71	40.29	36.59	1
				7.29	2415.41	150.96	0.4	36.50	35.25	36.59	1

Tabla 4.2.- Comparación de las diversas configuraciones.

Los valores en Gris, corresponden a configuraciones no muy comerciales, mientras que los cuadros marcados no cumplen con el alcance requerido.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Las tablas comparativas muestran que el alcance de los enlaces esta restringido por la atenuación debido a la distancia propia de los enlaces, a los cambios de línea dentro del Metro, a la gran cantidad de empalmes, a los patch panels y a que se tomó el valor máximo de atenuación de acuerdo a las recomendaciones citadas a lo largo del Capítulo 3.2.

El número de empalmes obedece a la logística de trabajo de la instalación de la fibra óptica en los túneles del Metro, ya que sólo se puede laborar por periodos cortos de tiempo y no es posible dejar carretes de fibra o cualquier material en los túneles.

Como puede apreciarse en las tablas comparativas de todos los enlaces, la dispersión no representa ningún tipo de limitante en las configuraciones consideradas ya que las distancias de los enlaces son relativamente pequeñas, además no se está considerando el Chirp de los transmisores [4] (transmisores sin Chirp y con ancho espectral nulo) y las velocidades de transmisión no exceden los 10 Gb/s.

En el caso de las configuraciones que contemplan el uso de la fibra G.655, ella está especialmente diseñada para tener baja dispersión en las regiones utilizadas (banda C que se utiliza en DWDM) es por ello que las configuraciones que contemplan dicho tipo de fibra, tienen los más altos alcances limitados por dispersión y aún dentro de dicha fibra, la categoría D tiene más bajos valores de dispersión que la E [2].

Por otra parte, además se está asumiendo una penalización por dispersión de 1 dB (Algunas configuraciones permiten mayores penalizaciones pero en este caso, no es necesario incrementarlo y de hacerlo, se compromete demasiado el presupuesto de potencia). Las observaciones extraídas de las tablas se agrupan por enlace en la siguiente sección:

ENLACE UNAM – UAM-I

En principio no es factible implementar la tecnología CWDM con la configuración mencionada, sobre la fibra G.652.D debido a que la atenuación de la fibra es mayor para el canal de 1311 nm que para el de 1611 nm.

Como se mencionó, la configuración que incluye la tecnología CWDM a 10 Gb/s no se considera para la selección de la configuración a implementar en ningún enlace; en las tablas comparativas se puede apreciar que dista mucho de cubrir el alcance requerido debido a que si bien, las distancias de los enlaces

son relativamente pequeñas, con la cantidad de empalmes, patch panels y demás pérdidas de potencia en el equipo pasivo¹, ocasionan que el presupuesto de potencia disminuya.

Tampoco se puede utilizar la tecnología DWDM (con 120 canales sobre las bandas S, C y L) sobre la fibra G.655.D para ambas velocidades de transmisión consideradas; la razón es que la atenuación del canal alrededor de 1600 nm es más grande que la del canal en torno a los 1490 nm.

Las configuraciones que resultaron tener alcances iguales o mayores al alcance requerido son las que emplean las fibras G.652.D, G.655.D y G.655.E con la tecnología DWDM; así como utilizar CWDM con la fibra G.655.D con la desventaja de tener solamente canales a 2.5 Gb/s a diferencia de las configuraciones mencionadas.

Es importante mencionar que el alcance de la tecnología DWDM implementada sobre la fibra G.655 (categorías D y E) para canales de 10 Gb/s está muy cercano al alcance requerido, pero dado que se está trabajando bajo condiciones de "peor escenario" se consideraron como configuraciones factibles de realizar.

ENLACE UNAM – CINVESTAV

En este enlace, ninguna de las configuraciones consideradas presenta algún tipo de problema; tanto los alcances limitados por atenuación como los limitados por dispersión sobrepasan el alcance requerido con un amplio margen.

Lo anterior se debe a que es el enlace más corto, a la consecuente disminución en el número de empalmes de fusión y a que se ha planeado instalar sólo un patch panel en este enlace.

ENLACE UAM-I – CINVESTAV

Al igual que en el enlace UNAM – UAM-I, tampoco es viable utilizar la tecnología DWDM (con 120 canales) sobre la fibra G.655.D para ninguna de las dos velocidades de transmisión manejadas; las razones son las mismas que se expusieron para el enlace mencionado.

¹ Como los Multiplexores y Demultiplexores.

Por otra parte, el alcance resultante limitado por atenuación al utilizar la tecnología CWDM sobre la fibra G.652.D es insuficiente para longitudes cercanas al límite inferior (1311 nm), por lo que esta configuración no resulta factible; no así el caso de utilizar CWDM sobre la fibra G.655 donde el margen de alcance obtenido es más que suficiente.

En lo que respecta a la tecnología DWDM, las otras tres configuraciones que contemplan el uso de las fibras G.652.D, G.655.D y G.655.E se pueden implementar sin ningún tipo de limitante para ambas velocidades de transmisión consideradas.

4.3.- COMPARACIÓN DE EQUIPOS y PRUEBAS

Como en cualquier proyecto que involucre tecnologías novedosas, se solicitó a proveedores de equipos WDM interesados en el proyecto, que participaran en unas series de pruebas de manera que nos introdujeran a la tecnología WDM y al mismo tiempo nos mostraran las características y el funcionamiento de sus equipos.

Como parte de este trabajo de tesis, se anexa una tabla comparativa que contiene los parámetros de los equipos de las 2 empresas participantes en las series de pruebas así como los valores utilizados para el análisis de los enlaces del que trata este trabajo.

En el caso de los equipos de las empresas, los valores de los parámetros provienen tanto de algunas de las hojas de especificaciones de los equipos, como de varias de las pruebas realizadas. Dicha tabla comparativa se muestra a continuación:

Capítulo 4.- ANÁLISIS DE LOS ENLACES DE FIBRA ÓPTICA

TABLA COMPARATIVA DE LOS EQUIPOS

ELEMENTO	PARAMETRO	VALOR UTILIZADO	OPTELIAN	PADTEC
			Especif. Pruebas	Especif. Pruebas
CWDM 2.5 Gb/s	Potencia óptica [dBm]	2.5	Nota a --	-- --
	Sensibilidad del receptor [dBm]	-28	Nota a --	-- --
CWDM 10 Gb/s	Potencia optica [dBm]	2.5	Nota b --	-- --
	Sensibilidad del receptor [dBm]	-15	Nota b --	-- --
DWDM 2.5 Gb/s	Potencia óptica [dBm]	2	Nota c 2.78	-2 a 2 0.71
	Sensibilidad del receptor [dBm]	-28	Nota c --	<-28 -31.82
DWDM 10 Gb/s	Potencia óptica [dBm]	5.5	Nota d --	2 a 6 5.03
	Sensibilidad del receptor [dBm]	-24	Nota d --	<-27 -28.62
Mux CWDM	Pérdida de inserción [dB]	2.5	Nota e --	-- --
Demux CWDM	Pérdida de inserción [dB]	2.5	Nota e --	-- --
Mux DWDM	Pérdida de inserción [dB]	3	<3.75 ^f 3	<5 ^g --
Demux DWDM	Pérdida de inserción [dB]	3	<3.75 ^f 3	<5 ^g --

Los campos marcados como “-” se debe a que no se cuenta con ese dato o no se realizó la prueba correspondiente.

Notas:

- a) CWDM, 1270 nm a 1450 nm, Alcance 80 km.
Potencia del transmisor: 0 dBm a 5 dBm
Sensibilidad del receptor: -28 dBm a 2.67 Gb/s
CWDM, 1470 nm to 1610 nm
Potencia del transmisor: 0 dBm a 5 dBm
Sensibilidad del receptor a 2.5 Gb/s: -26 dBm para < 1460 nm.
-28 dbm para ≥ 1460 nm.
- b) CWDM, 1471nm a 1611nm, Alcance 40 km.
Potencia del transmisor (bandas C y S): 1 dBm a 4 dBm
Potencia del transmisor (banda L): 0.5 dBm a 3.5 dBm
Sensibilidad del receptor (bandas C y S): -16 dbm.
Sensibilidad del receptor (banda L): -15 dBm.
- c) DWDM, 1530.33 nm a 1561.42 nm, Alcance 100 km.
Potencia del transmisor: 2 dBm a 4 dBm
Sensibilidad del receptor a 2.67 Gb/s: -26 dBm para < 1520 nm
-28 dbm para ≥ 1520 nm
- d) DWDM, 1530.33 nm a 1561.42 nm, Alcance 80 km
Potencia del transmisor: -1 dBm a 3 dBm
Sensibilidad del receptor: -24 dBm.
- e) Estos equipos están disponibles en dos intervalos de longitudes de onda (1471 nm – 1611 nm con 1310nm) o (1271 nm – 1411 nm con 1550nm), el equipos utilizado tiene 8 canales y las perdidas de inserción van de 2.6 dB a 4.3 dB dependiendo del canal
- f) Para 40 canales en la banda C espaciados a 100 GHz de acuerdo a la recomendación de la ITU.
- g) Para 32 canales en la banda C con un espaciamiento intercanal de 50 GHz.

Los resultados obtenidos en las pruebas resultaron bastante buenos ya que muestran en la mayoría de los casos, que los valores de los parámetros utilizados para el análisis del presente trabajo son muy similares a los que manejan dichos equipos; además de que, en el caso de los transmisores de ambos proveedores se encontró que el ancho espectral de las fuentes es bastante angosto (alrededor de 0.16 nm) lo que da validez a las fórmulas empleadas (ver Capítulo 3.1).

Por otra parte, los valores registrados durante las pruebas están perfectamente dentro de los valores indicados en las hojas de especificaciones de los equipos. Dando esto en conjunto, fundamento sólido al análisis realizado y realza la importancia de este trabajo como un análisis preliminar del proyecto.

Evidentemente por falta de tiempo, por la dificultad que implica transportar todo el equipo WDM y debido a la gran cantidad de pruebas que se deseaban realizar, no fue posible probar todas las configuraciones que se incluyen en la tabla mostrada, pero sin duda, las pruebas que se realizaron fueron de gran ayuda para la posterior toma de decisiones al momento de adquirir los equipos para el proyecto.

4.4.- SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN

En principio, hay varias configuraciones que resultaron factibles para ambas velocidades de transmisión analizadas. Sin embargo, la elección de la configuración a utilizar también obedece a otros factores que no son de aspecto puramente técnico, como lo es el económico, las tendencias en dicha tecnología o dependiendo de los planes del proyecto para el futuro.

Dentro de las configuraciones consideradas, y dados los resultados obtenidos en el análisis; si se desea incrementar la velocidad de transmisión empleando la tecnología DWDM (40 canales) se recomienda utilizar la fibra G.655 categorías D y E ya que evitaría el tener que compensar la dispersión.

Por otro lado, si se opta por emplear la tecnología CWDM a 2.5 Gb/s es posible utilizar otra configuración donde se utilicen menos canales, dejando libres aquellos que presentan más alta atenuación (longitudes de onda cercanas a 1310); es decir la configuración empleada constaría de 12 canales, ubicándose ahora el primer canal en 1391 nm.

Lo mismo sucede al utilizar DWDM (120 canales) sobre la fibra G.655.D para 2.5 Gb/s y para 10Gb/s ya que el enlace se ve limitado para longitudes de onda cercanas a 1600 nm debido a la atenuación de la fibra. Sin embargo, dicha configuración funcionaría en la práctica ya que los valores del coeficiente de atenuación que especifica la recomendación correspondiente están muy por encima de los que tiene cualquier fibra moderna comercial.

Se tiene conocimiento de que el costo de la fibra G.652 es mucho menor que el de la G.655 por ser esta última más moderna y especialmente diseñada para su uso en DWDM; teniendo en mente lo anterior y con base en el análisis diseñado, la configuración que más se adecua a los requerimientos iniciales de

los enlaces es la que utiliza la tecnología DWDM sobre la fibra G.652.D tanto para canales de 2.5 Gb/s como para 10 Gb/s.

La fibra G.652.D tiene bajos valores del coeficiente de atenuación en la región de trabajo de la tecnología DWDM y su coeficiente de dispersión aunque es mucho más elevado que el de las fibras G.655 D y E, cumple satisfactoriamente con los alcances requeridos limitados por la dispersión en las condiciones mencionadas.

4.5.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] ITU-T Recommendation G.655, "*Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable,*" March 2006.
- [2] ITU-T Recommendation G.695, "*Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications,*" December 2006.
- [3] Mynbaev, D. K. and Lowell L. Scheiner. *Fiber-Optic Communications Technology.* Prentice Hall, 2001.
- [4] ITU-T Supplement 39, "*Optical system design and engineering considerations,*" February 2006.
- [5] *2.5 Gbps SFP Transceiver.*
EOLS-1624-CW, Specification Sheet. 2007.
<http://www.eoptolink.com>

2.67Gbps 1270~1610nm CWDM DFB Transceiver.
AB-SFP-OC48, Specification Sheet.
<http://www.aibaotech.com>
- [6] *CWDM XFP Series.*
EOLX-1696-X, Specification Sheet. 2009.
<http://www.eoptolink.com>
- [7] *DWDM Mux/Demux Component for 100 GHz.*
G4-100 DWDM, Specification Sheet. Rev. 10/04
<http://www.confluentphotonics.com>
- [8] *LambdaDriver® Passive Optical Modules WDM & Optical Transport*
CWDM Mux/Dmux, Specification Sheet. 2008.
<http://www.mrv.com>

- [9] Product Bulletin 3005-9500 Rev-01
LightGAIN MDX/ODM

- [10] Product Bulletin 3007-4300 Rev-01
LightGAIN Small Form Factor Pluggables

- [11] Product Bulletin 3004-7800 Rev-03
LightGAIN XFP Small Form Factor Pluggables

- [12] Product Bulletin 3004-0800 Rev-05
LightGAIN MDX-40

- [13] *HOMOLOGACIÓN DWDM*
Delta Metropolitana de Supercómputo
México – Padtec
Documento revisado en: 31/10/08

- [14] Thiele, H. J. and Marcus Nebeling. *Coarse Wavelength Division Multiplexing: Technologies and Applications*. CRC Press, 2007.

5.- CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis realizado a lo largo de este trabajo, se encontró que:

La capacidad de transmisión de los sistemas ópticos de telecomunicaciones es muy grande y se ve fuertemente incrementada con la utilización de tecnologías WDM es por ello que resulta idónea para los propósitos buscados en este trabajo.

La tecnología DWDM permite acomodar un mayor número de canales que CWDM para un rango de longitudes de onda determinado ya que tiene un espaciamiento mucho menor entre ellos.

El análisis realizado en este trabajo se hizo en conformidad con estándares y recomendaciones, de esta manera, los resultados mostrados representan el "peor escenario"¹; trabajando de esta manera se asegura el funcionamiento de los enlaces bajo las consideraciones hechas y con los equipos que cumplan las normas mencionadas.

Los enlaces ópticos de telecomunicaciones pueden estar limitados por la atenuación o por la dispersión. Todos los enlaces del presente trabajo están limitados por la atenuación debido a que se utilizan muchos empalmes (cuyo valor en la práctica dependerá de la calidad de estos) y algunos paneles de distribución.

La gran cantidad de empalmes obedece a la logística de instalación que se presenta en el STC Metro; los paneles de distribución en cambio, ordenan los enlaces y facilitarían su extensión para incorporar a otras instituciones y así acrecentar el valor de la propuesta que aquí se evalúa.

La distancia limitada por la dispersión se reduce 16 veces al pasar de 2.5 Gb/s a 10 Gb/s ya que de acuerdo con la fórmula (3.11), Bit Rate se encuentra como denominador elevado al cuadrado en la ecuación.

En principio se puede utilizar CWDM sobre la fibra G.655.D (6 canales), en el caso de utilizar la fibra G.652.D deberá reducirse el número de canales y dejar libres aquellos de longitudes de onda cercanas a 1310, es decir de ser 16 canales, ahora son 14.

Se puede emplear la tecnología DWDM sobre la fibra G.655.D y E (40 canales) resultando el alcance limitado por atenuación muy cercano al requerido.

¹ En algunos parámetros se utilizó el valor típico ya que su rango de valores es muy amplio.

En el caso de utilizar 120 canales sobre la categoría D los canales de longitudes de onda mayores (alrededor de 1600 nm) están condicionados por la alta atenuación de la fibra en esa región.

Sin embargo, si se opta por DWDM los resultados muestran que el utilizar la fibra G.652.D da un amplio margen de alcance por atenuación y las limitantes por dispersión están sobradas para los enlaces y las velocidades de transmisión manejadas².

De acuerdo a la investigación y análisis realizado que es sustentado en buena medida por las pruebas efectuadas y las especificaciones de los equipos proporcionadas por los fabricantes; se llega a la conclusión de que el uso de la tecnología WDM es factible para enlazar las tres instituciones participantes en el proyecto, por lo que en principio es técnicamente posible implementar el Grid, motivo de este proyecto.

En particular, la configuración más adecuada contempla el uso de la tecnología DWDM sobre la fibra G.652 en la banda C, lo que nos permitiría transmitir hasta 40 canales operando a una tasa de bits de 10 Gb/s, lo que significaría una capacidad total de transmisión por enlace de 0.4 Tb/s.

5.1.- TRABAJO FUTURO

En un proyecto de tal importancia y que emplea tecnología tan novedosa como lo es el relacionado con este trabajo, sin duda queda todavía mucho trabajo por hacer y como una continuación de este, se podrían considerar los siguientes puntos:

Realizar un análisis de costos de las configuraciones planteadas con base en cotizaciones de las empresas interesadas en el proyecto; esto aunado a el análisis técnico de este trabajo daría una visión global de la realización del proyecto y consecuentemente, daría muchas más herramientas para la toma de decisiones en el momento de su implementación.

Determinar la factibilidad de incluir dependencias interesadas en formar parte del Grid, para ello se podrían utilizar OADM's³ para establecer nuevas rutas en los canales de cada enlace y establecer comunicación directa entre dos dependencias, etc.; y en caso de ser necesario, establecer las características necesarias de la compensación requerida.

² En todos los casos, el sistema se puede compensar mediante amplificadores o compensadores de dispersión dependiendo de lo que sea necesario, pero lo deseable es no utilizarlos ya que tienen un alto costo y porque al igual que cualquier otro elemento, requieren mantenimiento.

³ Optical Add Drop Multiplexers.

En todos aquellos casos en los que se requiera compensar la dispersión, analizar la factibilidad tanto técnica como económica de utilizar fibra compensadora o módulos de compensación ya que la fibra compensadora parece una solución sencilla, pero posee una alta atenuación y dado que los enlaces de este análisis están limitados por la atenuación es preferible buscar otras opciones.

Para todas aquellas limitaciones por atenuación, la solución se torna más complicada ya que los amplificadores en general tienen costos elevados y en el caso ser necesarios, es deseable que la configuración elegida sea DWDM, ya que en CWDM es más difícil la amplificación porque tal tecnología trabaja en un intervalo mucho más grande de longitudes de onda.

Establecer rutas alternas en cada uno de los enlaces y determinar la factibilidad de implementar protección de rutas y el equipo necesario para ello, además de la compensación correspondiente si es que fuera necesario.

Aún más, se puede profundizar el análisis realizado en este trabajo y considerando que la tendencia es incrementar la capacidad de transmisión de los sistemas de telecomunicaciones se puede determinar si la configuración elegida soporta velocidades de transmisión de 40 Gb/s y 100 Gb/s y en caso contrario realizar la selección o compensación más adecuada.

Por otra parte, los equipos comerciales, utilizan varias técnicas de compensación de dispersión para aumentar el alcance de sus equipos como lo es el pre-Chirping; sería interesante ahondar en el tema y realizar simulaciones para determinar los alcances reales de estos equipos.