

24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

RECEPTOR OPTICO WDM (MULTICANALIZACION POR LONGITUD DE ONDA). PROPUESTA SOBRE UN EXPERIMENTO DE LABORATORIO DOCENTE.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A : ARTURO ROBLES ROVALO



DIRECTOR DE TESIS: DR. SERGUEI KHOTIAINTSEV

2001357

CIUDAD UNIVERSIARIA

JULIO 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mis padres, que me han brindado más de lo necesario para lograrlo. Cuanto más metas alcanzo más grandes los veo.

A mi pequeña gran familia: Luz[†], Leonor, Anita[†], Juan y Mary, Chiquis y Rosendo; por su apoyo, aliento y cariño. Ante tal ejemplo de constancia y superación debes entregarlo todo.

A Luis, cuando la tradición se convierte en obligación sólo queda cumplir cabalmente.

"If you should suddenly feel the need for a lesson in humility,
try forecasting the future of Engineering"

Daniel Kleppner

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
Importancia	
Objetivos	
Justificación	

SISTEMA DE MULTICANALIZACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUDES DE ONDA.

I.1. Definición	5
I.2. Objetivos de la Multicanalización por División de Longitud de Onda	6
I.3. Componentes de un Sistema WDM	6
I.4. Descripción General	9
I.5. Evolución de los sistemas WDM	10
I.6. Cualidades de la Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM)	11
I.7. Conclusiones	12

II. EMISORES, MEDIO DE TRANSMISIÓN Y AMPLIFICACIÓN

II.1. Fuentes Ópticas	14
II.2. Fibras Ópticas	23
II.3. Amplificadores Ópticos para WDM	27
II.4. Amplificadores Escalables	33
II.5. Conclusiones	35

III. RECEPTORES PARA LOS SISTEMAS WDM

III.1. Filtros Ópticos	36
III.2. Rejillas de Bragg	36
III.3. Filtros que utilizan rejillas	38
III.4. Filtros Sintonizables	44
III.5. Receptores para Sistemas de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM)	49
III.6. Conclusiones	63

IV. PROPUESTA DE UN EXPERIMENTO DE RECEPTOR ÓPTICO WDM PARA LABORATORIO DOCENTE	
IV.1. Opciones fundamentales para la elaboración de la propuesta	65
IV.2. Elementos disponibles en el Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería	68
IV.3. Elementos disponibles en el mercado de los dispositivos ópticos	78
IV.4. Propuestas utilizando los elementos estudiados	81
IV.4.1. Propuesta del experimento utilizando Prismas y Lentes	81
IV.4.2. Propuesta del experimento utilizando un acoplador X de fibra óptica	83
IV.4.3. Resultados de la comparación de las propuestas	85
IV.5. Descripción del experimento definitivo	86
IV.6. Propuesta sobre un experimento de laboratorio docente sobre un sistema WDM para el Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la UNAM	98
IV.7. Conclusiones	109
V. CALCULOS Y EVALUACIÓN DEL EXPERIMENTO	
V.1. Evaluación de las pérdidas del experimento	111
V.1.1. Pérdidas debidas a la conexión	111
V.1.2. Acoplamiento Emisor-fibra	112
V.2. Optimización del acoplamiento emisor-fibra	118
V.3. Evaluación de las pérdidas de la fuente 1 (LED rojo)	119
V.4. Evaluación de las pérdidas de la fuente 2 (LED azul)	125
V.5. Conclusiones	131
CONCLUSIONES GENERALES	133
REFERENCIAS	137
GLOSARIO	140
ANEXO A. RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA	142
ANEXO B. LENTES DELGADAS Y SISTEMAS DE LENTES	149
ANEXO C. ÁNGULO SÓLIDO	158
ANEXO D. DOCUMENTACIÓN TÉCNICA DE LOS ELEMENTOS	160

MULTICANALIZACION POR DIVISION DE LONGITUD DE ONDA

La demanda de comunicación entre varios usuarios en lugares distintos, la explosión de Internet, y la necesidad de transportar grandes cantidades de datos e imágenes en tiempo real a largas distancias han hecho necesario que los portadores de información perfeccionen el desempeño y la flexibilidad de las redes de fibra óptica.

Adicionalmente a esta explosión en la demanda de ancho de banda; varios proveedores de servicios se enfrentaron al problema de que la capacidad de su fibra óptica estaba a punto de saturarse. Para mediados de los 90's la industria reportó que el tendido existente de fibra óptica se encontraba a un 80 por ciento de su capacidad total y se proyectó que para el 2000 llegaría al 100 por ciento. Por otro lado, se tuvo que enfrentar el reto de desarrollar e integrar diversas tecnologías con una misma infraestructura. De esta manera, a principios de los 90's algunos portadores decidieron adoptar la tecnología WDM (Wavelength Division Multiplexing) para incrementar la capacidad de sus redes de 2.5 Gbits/s hasta más de 40 Gbits/s sin la necesidad de instalar fibra adicional.

Hoy en día, WDM es la técnica óptica más prometedora en cuanto ancho de banda, ya que ofrece mayor capacidad que cualquier técnica anterior. Además, WDM incrementa la capacidad de transmisión sobre fibra óptica de una manera simple, sin generar costos excesivos y permite además ofrecer servicios de e-mail, video y multimedia en IP o ATM y voz en SONET o SDH administrando un gran ancho de banda único que puede ser transportado sobre la capa óptica

Actualmente, la técnica WDM es de gran interés tanto para la industria como para los investigadores e ingenieros relacionados con el desarrollo tecnológico en el campo de las telecomunicaciones, ya que permite incrementar la capacidad de transmisión total en los sistemas de fibra óptica, brinda la oportunidad de implementar una red en pasos sucesivos logrando una expansión flexible de los sistemas de telecomunicaciones y optimiza el costo de construcción e implementación de la red utilizando la infraestructura existente.

La demanda exponencial de servicios y de ancho de banda ha llevado a los proveedores de servicios a implementar redes robustas de gran capacidad. No obstante su desarrollo es muy reciente y todavía no se explota al máximo, WDM es la tecnología que ofrece mayor ancho de banda llegando a transportar datos con velocidades de varios Terabits por segundo

El presente trabajo tiene por objeto desarrollar un experimento para el laboratorio docente que permita a los alumnos de Ingeniería en Telecomunicaciones conocer y comprender el principio básico de la técnica de Multicanalización, así como los elementos que lo conforman.

Para los ingenieros en telecomunicaciones es vital conocer las tecnologías de punta, su funcionamiento, los elementos que la conforman, además de sus ventajas y desventajas. Por otro lado, los ingenieros especializados en telecomunicaciones deben tener los conocimientos necesarios y mantenerse actualizados en cuanto a los avances que se presentan en la industria para poder tomar decisiones fundamentales en su campo laboral.

En el Capítulo 1 se brinda una descripción general de los sistemas de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM). Adicionalmente se explican sus principios de funcionamiento y los elementos y tecnologías en los que se basa la técnica. Por otro lado, se hace una recopilación de los avances vertiginosos de estos sistemas en el campo de las comunicaciones de banda ancha. Se pretende que el lector adquiera una visión general del sistema, entienda su funcionamiento y su alcance. Se resalta el potencial y la importancia de esta técnica en la tarea de aumentar la capacidad de transmisión de las redes ópticas.

Previo a los sistemas WDM, los transmisores de longitudes de onda no eran indispensables, la longitud de onda absoluta era especificada vagamente para que estuviera cercana a la dispersión mínima de la fibra. Actualmente, los transmisores para WDM deben proveer estabilidad y selectividad de la longitud de onda transmitida para prevenir filtraciones en las longitudes de onda (canales) adyacentes sobre todo, cuando se trata de incrementar la densidad de canales. De igual forma, las fibras utilizadas en WDM deben cumplir ciertas características, en la actualidad existen métodos para corregir las limitantes de la fibra evitando la dispersión y la atenuación en la fibra. Además de las fuentes y las fibras ópticas la Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) esta ampliamente ligada con la amplificación óptica ya que el haz de luz que lleva la información debe ser amplificado. Un amplificador óptico puede amplificar varias señales (canales) con diferentes longitudes de onda simultáneamente. En el Capítulo 2 se presenta un análisis las fuentes, fibras y amplificadores ópticos. Elementos indispensables para el correcto funcionamiento de los sistemas WDM. Los elementos analizados en el Capítulo 2 deben ser analizados ya que son un complemento necesario para el estudio de los receptores ópticos para Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM).

En el Capítulo 3 se realiza una descripción detallada de los receptores utilizados en los sistemas de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) así como los elementos que se utilizan en su fabricación. Un elemento que ha venido a revolucionar tanto las comunicaciones ópticas como los dispositivos electroópticos son los filtros ópticos, los cuales además de un vasto potencial son indispensables para la construcción de prácticamente todos los elementos involucrados en los sistemas WDM. Dentro del campo de los filtros ópticos se encuentran las rejillas de Bragg una tecnología tan poderosa como la propia técnica de WDM que a pesar de su reciente descubrimiento (mediados de los 80's) ha tenido gran campo de aplicación. El potencial de las rejillas es comparado por los especialistas con el que tuvo el microprocesador para la electrónica. Las rejillas han permitido a la técnica de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) multiplicar su capacidad. El Capítulo 3 tiene como objeto analizar, conocer y comparar los distintos sistemas de recepción y demultiplexación de las señales utilizadas en los sistemas WDM con el propósito de elaborar un experimento básico y sencillo de implementar para el laboratorio docente de la Facultad.

La técnica de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) es una técnica moderna y revolucionaria que en los últimos cinco años ha tenido gran auge dentro de las comunicaciones ópticas y que pronto serán la principal tecnología utilizada para transportar grandes cantidades de datos a grandes distancias e incluso tendrán gran aplicación en las redes locales de gran capacidad. En el Capítulo 4 se expone una propuesta para demostrar el principio de trabajo de un Receptor Óptico para la Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) utilizando los elementos disponibles en el Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones. Adicionalmente, se da un reporte detallado de las actividades experimentales efectuadas en el desarrollo de la propuesta así como las direcciones tomadas en la resolución de problemas. Se menciona el análisis que se realizó para la elección del experimento final exponiendo la utilidad de este; además de todas las similitudes logradas con un sistema de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM). Del mismo modo, se describe el experimento final mediante una Propuesta de Practica para Laboratorio Docente en el formato adecuado

Finalmente, en el Capítulo 5 se evalúan los resultados con base en los cálculos teóricos sobre el desempeño del dispositivo propuesto e implementado. Así mismo se presentan alternativas que permiten optimizar el funcionamiento y la eficiencia del experimento

El Sistema de medidas radiométricas y fotométricas, el ángulo sólido y los sistema de lentes asi como las especificaciones de los dispositivos utilizados en el experimento propuesto se incluyen en los anexos. De igual forma, la bibliografía consultada se incluye al final de esta obra.

MULTICANALIZACION POR DIVISION DE LONGITUD DE ONDA

WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING

CAPITULO I

La multiplexación por división de longitud de onda WDM permite incrementar la capacidad de una transmisión óptica utilizando simultáneamente varias longitudes de onda. Por lo tanto, el ancho de banda óptico es explotado eficientemente multiplexando varias señales ópticas con diferentes longitudes de onda en una sola fibra. Cada canal es un tubo de luz separado, que puede soportar cierta tasa de transmisión. Las señales son separadas por longitud de onda en el lado del receptor. En otras palabras cada longitud de onda lleva un mensaje diferente y son transmitidas sobre una sola fibra usando láseres de diferentes longitudes de onda (colores)

Un sistema WDM se basa en el principio básico de que es posible acoplar varias fuentes emitiendo diferentes longitudes de onda $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$, en una misma fibra óptica. Después de haber sido transmitidas sobre la fibra, las señales $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ pueden ser separada y dirigidas a los diferentes detectores.

El conjunto de canales ópticos es "transparente" al formato de la señal. Es decir, pueden ser transmitidas señales sincronas, asíncronas o analógicas por el mismo medio sin necesidad de darle una estructura específica lo cual permite a los portadores integrar la tecnología WDM fácilmente con el equipo existente en su red.

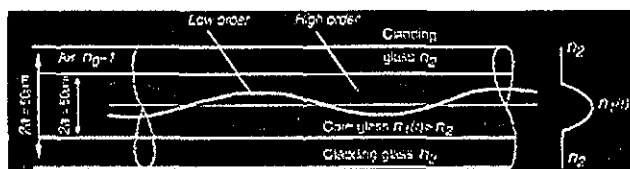


Figura 1.1 Esquema de las señales ópticas en una fibra óptica

1.1. DEFINICIÓN

La Multiplexación por División de Longitud de Onda (Wavelength Division Multiplexing) es una técnica de transmisión sobre fibra óptica que emplea longitudes de onda para transmitir datos, ya sea bits en paralelo o caracteres en serie

La técnica de multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing) permite enviar varias señales ópticas (canales o haz de luz) por la misma fibra. Cada mensaje tiene un color (longitud de onda) diferente y todos viajan por el mismo medio al mismo tiempo.

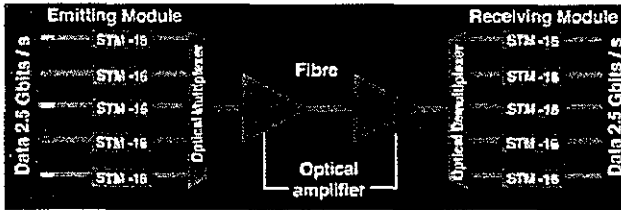


Figura 1.2 Esquema general de un Sistema WDM

1.2. OBJETIVOS DE LA MULTICANALIZACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA

Incrementar la capacidad de transmisión total en los sistemas de fibra óptica de larga distancia. Permitir el encaminamiento de longitudes de onda que mejora notoriamente la capacidad de conexión. Brindar la opción de implementar una red en pasos sucesivos. Optimizar el costo de construcción de una red.

1.3. COMPONENTES DE UN SISTEMA WDM

Las redes ópticas WDM utilizan varios componentes distintos dependiendo de su función, capacidad y tipo. Las redes WDM modernas de gran capacidad integran varios dispositivos adicionales. Sin embargo, básicamente todas poseen los siguientes elementos en común.

1.3.1. Transmisor Óptico

Previo a los sistemas WDM, los transmisores de longitudes de onda no eran indispensables, la longitud de onda absoluta era especificada vagamente para que estuviera cercana a la dispersión mínima de la fibra. Actualmente, los transmisores para WDM deben proveer estabilidad y selectividad de longitud de onda transmitida para prevenir filtraciones en las longitudes de onda (canales) adyacentes sobre todo, cuando se trata de incrementar la densidad de canales.

Adicionalmente, el espectro de un transmisor debe ajustarse exactamente en el canal óptico asignado. Si el ancho de banda del láser es significativamente amplio al ser modulado, la potencia podría salir del ancho de banda del multiplexor lo cual produciría cambios en el desempeño del sistema ya que

las frecuencias laterales (parasitas) del sistema serían rechazadas, limitando la eficiencia espectral del sistema.

1.3.2. Multiplexor óptico de longitudes de onda

En un sistema WDM, el componente a la entrada debe inyectar las señales de diferentes fuentes en la fibra con pérdidas mínimas. Este dispositivo se denomina **Multiplexor**.

La forma más simple de un multiplexor son los acopladores ópticos independientes de la longitud de onda. Actualmente, debido a las pérdidas de potencia y el ruido de los transmisores, se utilizan multiplexores dependientes de la longitud de onda con lo que se logra incrementar la eficiencia espectral. Los multiplexores WDM deben cumplir con las mismas especificaciones que un demultiplexor óptico.

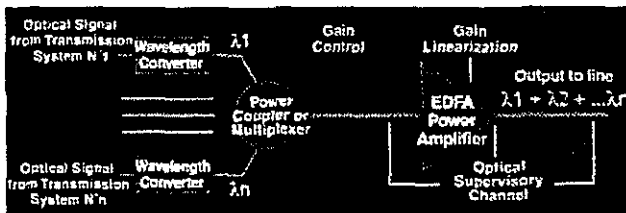


Figura 1.3 Multiplexor WDM

1.3.3. Demultiplexor óptico de longitudes de onda

Los demultiplexores ópticos separan las señales de los canales WDM con un mínimo de crosstalk y las direcciona hacia receptores individuales. Cuando se tienen pocos canales y tasa de datos baja la demultiplexación es relativamente fácil utilizando un divisor de potencia seguido de un filtro pasobanda para cada canal filtrado logrando pérdidas aceptables. Sin embargo cuando se desea mayor eficiencia los diseños de los filtros deben ser más sofisticados, con características planas de potencia en la banda y frecuencias de corte muy definidas. La atenuación en las frecuencias de los extremos (*de corte*) debe ser suficiente para evitar crosstalk con canales externos al sistema. El diseño de los filtros debe proveer características de fase cuasi-lineales, de otra manera se convertirían en un elemento de dispersión por sí mismos.

Las características de atenuación de un filtro cambian dependiendo de la densidad y capacidad de los canales de un sistema.

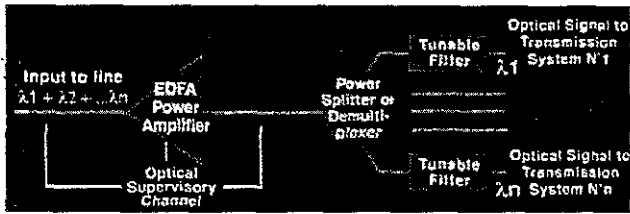


Figura 1.4 Demultiplexor WDM

1.3.4. Amplificadores Ópticos

WDM esta ampliamente ligada con la amplificación óptica ya que el haz de luz que lleva la información debe ser amplificado. Un amplificador óptico puede amplificar varias señales (canales) con diferentes longitudes de onda simultáneamente.

Los sistemas WDM principalmente, se basan en las características de los amplificadores ópticos de fibra óptica dopada que compensan las pérdidas de potencia de la señal durante su trayectoria. Las características que determinan el desempeño de los amplificadores son: ancho de banda, ganancia, ganancia plana, potencia de salida, y figura de ruido. Para incrementar el ancho de banda óptico se están utilizando amplificadores dopados con múltiples elementos que proporcionan mayor ancho de banda. De cualquier modo, el aplanamiento de la ganancia se complica conforme se aumentan los canales, así como de las pérdidas que debe compensar, proporcionales a la distancia. Para mantener una relación señal a ruido adecuada en los canales, la potencia por canal debe mantenerse alta y constante, especialmente en enlaces a larga distancia con amplificadores en cascada. Por lo tanto, la potencia de salida de un amplificador debe aumentar conforme el ancho de banda y la densidad de canales, requiriendo múltiples bombas láser.

Los amplificadores ópticos más utilizados en la actualidad por WDM son amplificadores dopados con Erblio EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifiers) que incrementan la intensidad de múltiples canales ópticos por medio de una bomba láser. Los EDFA's son más baratos que los repetidores electrónicos convencionales. Son utilizados para amplificar señales entre 1520 y 1550 nm (se pueden escalar a otras longitudes de onda) y pueden ser colocados en tres diferentes partes dentro del sistema de WDM: después del transmisor actuando como acelerador, en línea, y antes del detector actuando como pre-amplificador, cada uno especializado dependiendo de la aplicación. Cuando una bomba láser se utiliza para energizar el Erblio con una longitud de onda específica, el Erblio actúa como un medio que amplifica la señal incidente.

I.3.5 Fibra Óptica

La fibra óptica generalmente es considerada como un medio de transmisión perfecto con ancho de banda ilimitado. Comparado con las líneas de cobre esto es verdad, pero en la práctica la fibra óptica puede ser un elemento limitante en la capacidad del sistema, especialmente en largas distancias, ya que estas limitantes se incrementan con la longitud de la fibra.

Las pérdidas de la fibra, afortunadamente, son independientes de la modulación de un canal (lo que sí sucede en el cobre). No obstante, las ventanas con pérdidas mínimas de la fibra son limitadas por lo tanto se deben utilizar amplificadores de mayor ganancia.

La dispersión de la fibra es una limitante crítica de la tasa de bits por canal. La dispersión puede ser compensada utilizando fibras especiales, tratando de construir fibras que tengan un ancho de banda amplio dentro de la zona de dispersión cero, o utilizando filtros con características compensatorias.

I.3.6. Otros dispositivos de un sistema óptico WDM

Para lograr un sistema totalmente óptico y trabajar en la capa óptica, WDM debe ser capaz de proveer acceso óptico al tráfico de varios nodos sobre la red. Esto se logra gracias a las unidades de derivación óptica Add/Drop (Optical Wavelength Add Drop) OWAD, donde las longitudes de onda (portadoras) son agregadas o segregadas desde o hacia una fibra. Combinado con las unidades derivadoras OWAD y el sistema WDM, el conector óptico Optical cross-connect (OXC) da la capacidad de crear una red flexible, robusta y eficiente con administración completa del ancho de banda.

I.4. DESCRIPCIÓN GENERAL

WDM permite incrementar la capacidad de una transmisión óptica utilizando simultáneamente varias longitudes de onda. Por lo tanto, el ancho de banda óptico es explotado eficientemente multiplexando varias señales ópticas con diferentes longitudes de onda en una sola fibra

El número de canales que pueden transmitirse en un sistema WDM depende principalmente de tres factores: el espacio entre canales, el ancho de banda óptico total del sistema y el ancho de banda de modulación individual de las señales ópticas

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) estableció estándares para el espacio entre canales, los cuales indican una frecuencia base de 193.1 terahertz y un espacio entre canales de 100 gigahertz, es decir, 1550 nm con separación de 0.8 nm. En sistemas comerciales los espacios más comunes entre canales son de 400, 200, 100, 50 y 25 GHz, es decir, 3.2, 1.6, 0.8, 0.4 y 0.2 nm respectivamente

El ancho de banda óptico total depende del tipo de sistema que se maneje. Para redes en las que no es necesaria una amplificación de las señales, los límites principales son la atenuación y la dispersión de las señales a lo largo de la fibra. Para este tipo de sistemas se maneja un ancho de banda entre los 1200 y 1650 nm, en el que estos dos factores son relativamente bajos. Para sistemas de mayores distancias, el límite en el ancho de banda del sistema depende del ancho de banda de los *amplificadores ópticos*. Los *amplificadores más utilizados EDFA's* presentan su mayor ganancia en la banda-C que va de 1525 a 1570 nm, pero prácticamente los amplificadores trabajan en un rango central que va de 1530 a 1560 nm.

El ancho de banda de la señal modulada es la última limitante en el número de canales que pueden transmitirse. Un láser para WDM posee un ancho de banda espectral de apenas pocos GHz, pero al modular la señal se suman otras componentes de frecuencia a la misma, lo que provoca un ensanchamiento en el espectro, lo que representa un incremento en el ancho de banda. La tasa de modulación por canal varía entre 2.5Gbits/seg hasta 10 Gbits/seg.

1.5. EVOLUCIÓN DE SISTEMAS WDM

Sistema	Año	Tipo de fibra	Longitud de onda (μm)	Canales WDM	Tasa de bits/canal	Tasa de bits/fibra	Canales de voz por fibra	Espacio /regeneradores
FT3	1980	MM	0.82	1	45 Mb/s	45 Mb/s	672	7 Km
FT3C	1983	MM	0.82	1	90 Mb/s	90 Mb/s	1344	7 Km
FTG-417	1985	SM	1.3	1	417 Mb/s	417 Mb/s	6048	50 Km
FTG-17	1987	SM	1.3	1	1.7 Gb/s	1.7 Gb/s	24192	50 Km
FTG-17 WDM	1989	SM	1.3/1.55	2	1.7Gb/s	3.4 Gb/s	48384	50 Km
FT-2000	1992	SM	1.3	1	2.5Gb/s	2.5 Gb/s	32256	50 Km
FT-2000 WDM	-	SM	1.3/1.55	2	2.5Gb/s	5 Gb/s	64120	50 Km
NGLN	1993	SM	1.55	8	2.5Gb/s	20 Gb/s	258000	360 Km
NGLN II	1997	SM	1.55	16	2.5Gb/s	40 Gb/s	516000	360 Km
WaveStar 400G	1999	SM	1.55	80 40	2.5Gb/s 10 Gb/s	200 Gb/s 400 Gb/s	2580000 5160000	640 Km 640 Km

A principios de 1996, simultáneamente se presentaron tres experimentos que reportaron un rompimiento en la barrera de los tera-bits por segundo, lanzando a la tecnología de la luz en la nueva "tera-era" Este rompimiento fue demostrado por Fujitsu, Bell Labs y NTT. Es interesante observar las diferencias entre estas tres aproximaciones, ya que todas utilizaron técnicas de WDM. Fujitsu utilizó 150 Km de Fibra mono modo convencional con compensación de la dispersión y realizó una transmisión de 55 canales WDM con una tasa de 20 Gb/s cada uno. Bell Labs utilizó 55 Km. de fibra con dispersión **no-cero** y transmitió 25 canales WDM que fueron multiplexados mediante polarización a 50 canales independientes con una tasa de 20 Gb/s cada uno. NTT utilizó 40 km. de fibra DS y transmitió 10 canales WDM con una tasa de 100 Gb/s cada uno.

L6. CUALIDADES DE LA MULTIPLEXACIÓN POR LONGITUD DE ONDA (WDM)

Para el caso de transmisiones con capacidad mayor a 10 Gbits/s, dos técnicas de multiplexaje compiten en el mercado. Una de ellas es el Multiplexaje por División del Tiempo (TDM) y la otra es WDM.

Sin embargo, con los sistemas TDM, son necesarios regeneradores para cada longitud de onda y tasa de transmisión específicas lo que significaba cambiar todos los regeneradores cada vez que se quiere mejorar la tasa de transmisión. En cambio en el sistema WDM se utilizan amplificadores y regeneradores sin necesidad de convertir la señal óptica en eléctrica, regenerarla y reconvertirla manejando un mayor rango de longitudes de onda y de tasas de transmisión. Además se puede utilizar la capacidad total del tendido de fibra existente.

En resumen, optimizar una transmisión aplicando TDM requiere cambiar todos los transmisores y receptores, adaptándolos para una mayor tasa de transmisión. En contraste, mejorar la tasa de transmisión utilizando WDM puede ser realizada poco a poco, agregando progresivamente nuevas longitudes de onda y se pueden seguir usando los transmisores y receptores existentes. Esta característica ofrece el mejor precio cuando se trata de mejorar una red óptica por que no hay necesidad de cambiar los amplificadores en línea.

Otra diferencia entre TDM y WDM es que la segunda es mas tolerante a las imperfecciones de la fibra. En cualquier fibra, un pulso se volverá más ancho después de cierta distancia provocada por la dispersión cromática y de polarización de la fibra. En consecuencia, se hace imposible transmitir 10 Gbits/s en una sola señal (canal) por que se encimaría. Pero si se utiliza WDM se pueden emplear varias señales de 2.5 Gbits/s con lo que se logran velocidades mucho mayores a 10 Gbits/s

El avance reciente de los sistemas de transmisión WDM punto a punto es enorme. La capacidad de una sola fibra óptica llega a ser de cientos de gigabits por segundo. Sin embargo, si cada terminal debe realizar procesamiento electrónico la cantidad de equipo sería demasiado grande. Al introducir un mecanismo de nodos bypass en la capa óptica se logra una reducción notable en la cantidad de equipo electrónico y un incremento en la capacidad de transporte de la red. Adicionalmente, se ha ido avanzando en las tecnologías fotónicas que en conjunto permitirán crear backbones de ancho de banda robusto.

1.7 CONCLUSIONES

Hemos sido testigos del crecimiento tan acelerado que han sufrido las comunicaciones ópticas. Inicialmente, se utilizaban únicamente en enlaces de larga distancia. Posteriormente se encontró su gran eficiencia para distancias más cortas en el área de videobroadcasting. Actualmente las aplicaciones de las comunicaciones ópticas se presentan para redes de alta capacidad de larga distancia e inclusive para redes de área local.

Las redes ópticas son la columna vertebral (backbone) que respalda y soporta a las tecnologías existentes y emergentes con capacidad de ancho de banda casi ilimitado. Las Redes totalmente ópticas conformadas por conectores ópticos Cross-connect, multiplexores ópticos programables add/drop, y los conmutadores ópticos ofrecen una infraestructura uniforme capaz de satisfacer las necesidades de comunicación actuales y futuras. Mover trillones de bits de información de manera transparente, eficiente y económica permitirá a los portadores maximizar su infraestructura existente y afrontar la demanda de capacidad de las próximas décadas.

La tecnología de (WDM) Multicanalización por División de Longitud de Onda es una de las tecnologías más prometedoras, atractivas y poderosas para las redes robustas de banda ancha. La tasa de bits que se transmite actualmente aumenta día con día y la tecnología WDM es la mejor opción para incrementar la capacidad sin un costo excesivo. Esta tecnología permite a los portadores establecer una infraestructura que puede crecer como se desea (grow-as-you-go), es decir tiene la flexibilidad de aumentar su capacidad en cualquier parte de sus redes. Ninguna otra tecnología ofrece esta ventaja.

Previo a los sistemas WDM, los transmisores de longitudes de onda no eran indispensables. la longitud de onda absoluta era especificada vagamente para que estuviera cercana a la dispersión mínima de la fibra. Actualmente, los transmisores para WDM deben proveer estabilidad y selectividad de longitud de onda transmitida para prevenir filtraciones en las longitudes de onda (canales) adyacentes sobre todo, cuando se trata de incrementar la densidad de canales.

La fibra óptica generalmente es considerada como un medio de transmisión perfecto con ancho de banda ilimitado. Comparado con las líneas de cobre esto es verdad, pero en la práctica la fibra óptica puede ser un elemento limitante en la capacidad del sistema, especialmente en largas distancias, ya que estas limitantes se incrementan con la longitud de la fibra. Por ello, las fibras utilizadas en WDM deben cumplir ciertas características. En la actualidad existen métodos para corregir las limitantes de la fibra evitando la dispersión y la atenuación en la fibra. Además, por medio de filtros y amplificadores se pueden realizar correcciones para mejorar la transmisión.

Los sistemas WDM, se basan principalmente en las características de los amplificadores ópticos de fibra óptica dopada que compensan las pérdidas de potencia de la señal durante su trayectoria. Las características que determinan el desempeño de los amplificadores son: ancho de banda, ganancia, ganancia plana, potencia de salida, y figura de ruido. En el siguiente capítulo se muestran las características principales de las fuentes ópticas, así como el medio de transmisión de las señales enviadas y la amplificación de éstas.

EMISORES, MEDIO DE TRANSMISIÓN Y AMPLIFICACIÓN

CAPITULO II

II.1. FUENTES ÓPTICAS

Las fuentes ópticas son transductores que generan una onda portadora óptica que será modulada por las señales eléctricas procedentes de un equipo analógico o digital, mientras que los detectores transforman señales ópticas procedentes de una fibra en eléctricas para su ataque a un equipo terminal o intermedio. *Las fuentes han de emitir luz a una longitud de onda concordante con una de las ventanas de baja atenuación en la fibra además de cumplir otros requisitos no menos importantes.*

- Alta potencia de salida y pureza espectral
- Admitir en su interior la modulación a la velocidad de transmisión del sistema
- Alta fiabilidad con los cambios de temperatura.

Las fuentes que se emplean en la tecnología óptica son de dos tipos: diodos electro luminiscentes (LED) y diodos láser (LD). La radiación de cualquiera de estos dos tipos de diodos se consigue inyectando huecos o electrones en una unión p-n con fuerte polarización directa.

Supongamos que tenemos un conjunto de átomos, como por ejemplo, en un sólido, gas o líquido. Recordemos que cada átomo posee una cierta cantidad de energía interna y cada uno tiende a mantener su configuración energética más baja. Se dice que este es el *estado base* de ese tipo particular de átomo. Además, cada átomo puede existir en configuraciones específicas bien definidas, que corresponden a energías mayores que las del estado base. Cualquiera de estos se llaman *estados excitados*. Con una fuente de luz convencional, la energía se bombea hacia los átomos que están reaccionando, en este caso los ubicados dentro del filamento. Estos se “levantan” por consiguiente a estados excitados. Cada uno puede entonces volver a caer *espontáneamente*, es decir, *sin inducción externa, al estado base emitiendo la energía absorbida en la forma de un fotón* dirigido al azar. Los átomos en este tipo de fuente irradian esencialmente de manera independiente. Los fotones en el flujo emitido no tienen ninguna relación de fase particular unos con otros y la luz es incoherente, es decir, varía en fase de punto a punto y de momento a momento

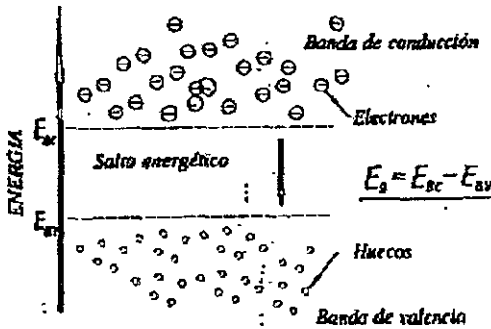


Figura E.1 Bandas de energía en una unión p-n

En el caso de los LED, se presenta la emisión espontánea bajo la acción de un campo eléctrico, tal emisión se produce en forma totalmente aleatoria. Vale la pena insistir en el hecho de que las diferentes ondas que la componen no están en fase debido a que cada emisión es independiente de cualquier otra en su generación; esto lleva consigo que unas anulen total o parcialmente a otras, y que la potencia de salida se vea reducida con respecto a la que tendría de no ocurrir estos fenómenos de interferencia.

Por el contrario el láser se caracteriza porque su emisión es siempre coherente, es decir, los trenes de ondas que emergen de él están siempre en fase, independientemente de cual sea el ancho espectral de la emisión.

Normalmente, la distribución de los diferentes estados energéticos de los electrones a una cierta temperatura tiene un carácter probabilístico y responde a una curva como la que se muestra en la figura E 2, en la que los niveles bajos de energía se encuentran más concurridos que los de alta energía por la tendencia de la naturaleza a mantener todos los cuerpos en el mínimo nivel posible

Einstein afirmó que cuando un fotón incide sobre un átomo pueden ocurrir dos cosas

- a) Si su nivel de energía es bajo, la absorción del fotón lo eleva y puede separar un electrón dando lugar a la creación de un par electrón-hueco, lo que constituye el principio de funcionamiento de los fotodetectores. Lo más probable es, por tanto, que cuando un fotón incida sobre uno de estos electrones eleve su nivel energético y el fotón quede "destruido", estamos ante el caso normal de un material que absorbe luz cuando ésta lo atraviesa

b) Lo anterior no excluye pensar que, aun con pequeña probabilidad, pueda ocurrir el caso contrario, esto es, que un fotón que incida sobre uno de los pocos electrones de alta energía le obligue a pasar a un estado de menor excitación, lo que es *relativamente fácil si este electrón se encuentra en estado metaestable*. Ello implicaría la emisión de un nuevo fotón.

Sin embargo, para que ocurra cualquiera de las dos posibilidades mencionadas, debe cumplirse que la frecuencia del fotón incidente sea exactamente igual al cociente entre el salto energético ΔE del electrón (valor fijo para cada material) y la constante de Planck (h):

$$f = \Delta E / h$$

Cuando se da esta condición, y solo entonces, el nuevo fotón tiene la misma frecuencia, fase y polarización que el incidente, es decir, que la radiación estimulada es totalmente coherente con la onda electromagnética que la provocó, o sea, el nuevo fotón surgido a consecuencia de la *emisión estimulada*, no difiere en absoluto del que lo provocó, estaríamos ante un fenómeno de amplificación de la luz.

Un caso particular del inciso b lo constituyen, aquellos cuerpos cuyos átomos se encuentran excitados por la acción de un campo eléctrico y de modo espontáneo —sin la acción de fotones exteriores— produce radiación, al caer esos electrones desde su posición metaestable a la de mínima energía: es el caso del LED

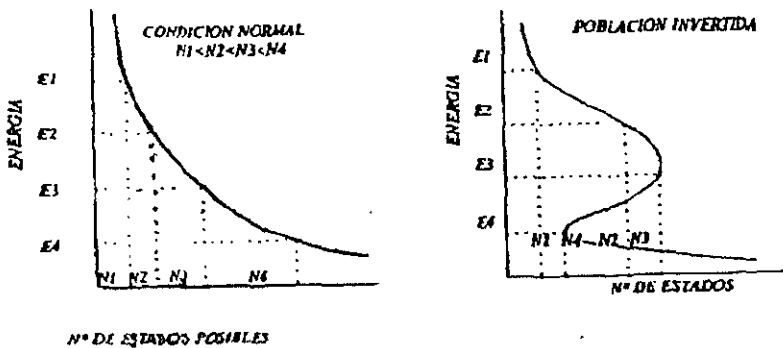


Figura 1.2 Distribución de los estados energéticos en condiciones normal y de excitación

La probabilidad de que la emisión estimulada ocurra se puede aumentar incrementando el número de electrones excitados: es decir, haciendo que el número N_2 de electrones de alta energía, que originalmente era más pequeño que el N_1 de baja energía, supere a éste, lo que se conoce como *inversión de población*

Cuando se somete el cuerpo a una fuerte excitación (bombeo del medio amplificador) se crean las condiciones para que una parte de esos electrones ascienda a un nivel de energía superior, compensando la disminución de energía de aquellos que ya han emitido un fotón.

Pero también cabe pensar si es posible, que este amplificador de luz se automantenga mediante una realimentación positiva, o sea, se convierta en un oscilador.

En efecto: ha de conseguirse que los fotones producidos aparezcan para su utilización como fuente de luz, pero al mismo tiempo debe reservarse una parte de ellos para realimentar el proceso de radiación forzada. Si la distancia entre las caras extremas del eje de propagación es un número entero de semilongitudes de onda de la radiación emitida (figura E.3), aquellos fotones que no escapen y sufran sucesivas reflexiones estarán en fase con los incidentes y podrán crear nuevos fotones. Cuando la ganancia neta de un fotón que recorre un circuito completo se hace igual a la unidad, la reacción en cadena se hace crítica y se produce el *efecto láser*. La corriente necesaria para que el proceso se automantenga es la llamada *corriente de umbral*, por debajo de la cual se extingue y se comporta como un LED.

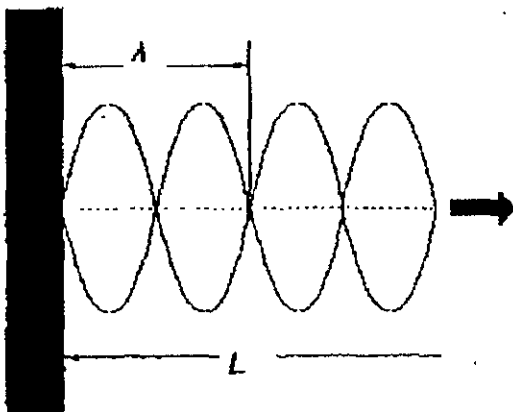


Figura E. 3 Longitud de la cavidad resonante

Para poder subsistir en la cavidad resonante, la luz debe producir interferencias constructivas, lo que implica que la longitud de la cavidad debe ser igual a un múltiplo entero de veces la media longitud de onda de la luz. La longitud de onda de la luz es igual a λ/n en un medio de indice n . Se tiene entonces la relación:

$$L = m \frac{\lambda}{2n}$$

donde L es la longitud de la cavidad y m es el orden de los modos que pueden existir en la cavidad.

Las condiciones, por tanto, para que se produzca el efecto láser son:

- Existencia de una fuente de bombeo del diodo.
- Corriente superior de umbral.
- Dimensiones adecuadas de la cavidad resonante.

La alta densidad de portadores en la capa activa genera una gran cantidad de calor que es preciso evacuar, lo que se consigue eligiendo para el sustrato materiales de alta conductividad termica

Actualmente se fabrican láseres para 850 nm y otros para 1300-1550 nm.

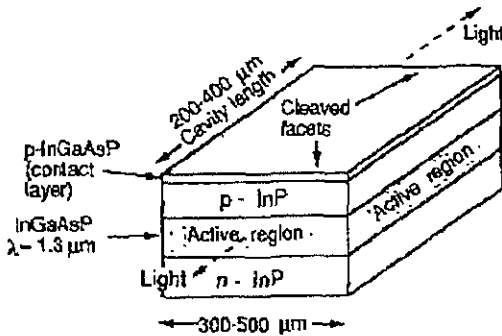


Figura E.4 Esquema típico de un láser de emisión de borde

II.1.1. Tipos de Láseres

Láseres de doble heteroestructura (DH). Pueden operar de modo continuo, aunque con baja potencia. La emisión se lleva a cabo en el mismo plano de la zona activa; el efecto guía de ondas confina el campo a la región activa y refuerza la emisión a través de una pared de tallado semiespecular. Presentan una raya espectral central correspondiente al modo principal de emisión y otras laterales, de tres a diez con menor amplitud. Son los LD llamados Fabry-Perot.

Existen otros tipos de LD para comunicaciones más evolucionados, entre los que se encuentran:

II.1.1.1. Láseres Monomodo

Son interesantes cuando las condiciones impuestas por la dispersión son muy críticas, por lo que se debe reducir al máximo la anchura espectral, tendiendo a conseguir un solo modo en la cavidad de escasa anchura que puede llegar hasta 10^{-20} nm, equivalente a 100 KHz. Se consiguen de varias formas:

Con láseres de cavidades externas que contienen elementos selectivos de longitud de onda. Su inconveniente es su gran volumen.

Láseres de cavidad tallada acoplada, formados por dos láseres separados, pero estrechamente acoplados. Tienen características inestables de funcionamiento.

II.1.1.2. Láseres de Realimentación Distribuida (DFB)

Llevan incorporados elementos selectivos de longitud de onda, consistentes en un acanalado periódico que separa dos de las capas de la estructura del láser, lo que provoca una variación periódica del índice de refracción. Al variar el índice, se refleja una parte de la potencia óptica, con lo que se ven favorecidas unas longitudes de onda con respecto a otras. Aquellas que interfieren de modo que estén en fase, se verán reforzadas y escaparán de la zona activa. Las anchuras espectrales conseguidas con estos láseres son inferiores a 0.1 nm y la raya central presenta diferencias de nivel de 20 DB con las laterales. Resultan excelentes en sistemas donde la dispersión es el factor limitativo del producto velocidad*anchura de banda.

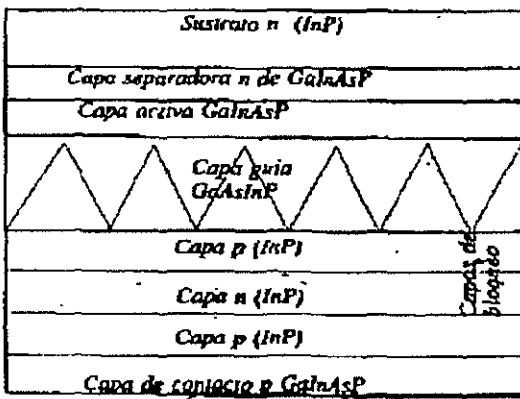


Figura E. 5 Diodo láser tipo DFB

II.1.1.3 Láseres BH

Se fabrican actualmente láseres BH o de heteroestructura enterrada, en los que la capa activa de InGaAsP se entierra en material de InP cuya banda prohibida es mayor. El InP se dopa de modo que la zona activa quede intercalada entre InP de los tipos p y n. La emisión se puede llevar a cabo con salida tipo Fabry-Pérot o por el sistema de realimentación distribuida DFB, disponiendo de un refrigerador Peltier interno. Pueden funcionar en toda la gama de velocidades de transmisión hasta 550 Mb/s sin necesidad de refrigeración si se trata de distancias cortas. Sólo una pequeña parte incorporan funciones electrónicas en su interior, tales como el circuito controlador del láser.

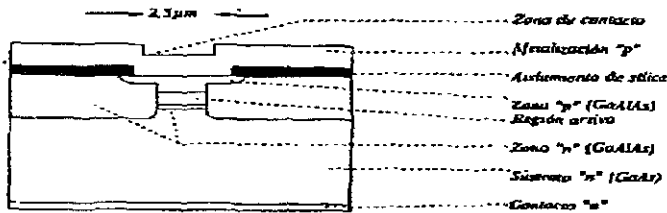


Figura E 6 Láser de heteroestructura enterrada

Por la rapidez de la emisión estimulada, los láseres pueden ser modulados a velocidades más altas que los LED. Otra característica importante del láser es la dependencia de la potencia de emisión con la temperatura, lo que obliga a incorporar en el módulo transmisor circuitos de control de la corriente de polarización, o bien mantener el láser en un ambiente térmicamente estable.

En cuanto al espectro de emisión debe mencionarse que puede variar desplazándose a mayores longitudes de onda al aumentar la temperatura

La vida útil del láser que en principio era de algunas horas, ya es igual a la de un LED. El inconveniente es que su precio es más alto, aunque es de esperar siga la tendencia a la baja comenzada a raíz de los avances en el campo de la optoelectrónica.

Los diodos Láser se usan en sistemas con:

Potencia óptica de salida alta.

Fibras monomodo o multimodo

Alta velocidad de modulación, y por tanto, grandes capacidades de transmisión.

II.1.2. Láseres Sintonizables

Para permitir la explotación de nuevas y versátiles longitudes de onda, fue necesario el desarrollo de nuevas tecnologías. Las fuentes y receptores ópticos que operan a una longitud de onda fija no son adecuadas para permitir que WDM evolucionara de una simple tecnología de transmisión a una red transparente totalmente óptica.

Las características que se buscan en los elementos sintonizables incluyen:

- ✓ Velocidad rápida de sintonización, del orden de los microsegundos y preferentemente nanosegundos).
- ✓ Amplio rango de sintonía (30-40 nm. Para sistemas que utilizan amplificadores de erbio)
- ✓ Bajo consumo de potencia
- ✓ Bajo costo

La rapidez de sintonización es un factor muy importante. Por ejemplo, redes WDM basadas en conmutación de circuitos requieren tiempos de microsegundos, mientras que las redes WDM basadas en conmutación de paquetes requieren tiempos de nanosegundos. Existen varios mecanismos para la realización de fuente ópticas sintonizables

Existen tres tipos de fuentes sintonizables muy utilizadas en el inicio de redes WDM las cuales incluyen: Láseres sintonizables mecánicamente, Láseres sintonizables por mecanismos acusto-ópticos y electro-ópticos, y finalmente Láseres sintonizables por inyección de corriente. Actualmente existen dos desarrollos que han ayudado en gran medida a lograr las altas tasas de transmisión y un gran número de canales en una red WDM.

II.1.2.1. Láseres Sintonizables Mecánicamente

Utilizan una cavidad externa Fabry-Perot (FP) en la que el espacio entre los semi-espejos que forman la cavidad es sintonizada mecánicamente. Se utilizan actuadores y controladores electromecánicos. El rango de sintonía es prácticamente el rango del semiconductor activo del láser. El tiempo de sincronía es muy largo, es del orden de los milisegundos, por lo que sólo pueden utilizarse en redes de conmutación de circuitos, en la que se establece una conexión sintonizando el láser a una longitud de onda dada y ésta se mantiene durante la conexión.

II.1.2.2. Láseres sintonizables por mecanismos acusto-ópticos y electro-ópticos

Se despliega un filtro sintonizable externo en el que se emplea el efecto acusto-óptico o electro-óptico (onda de sonido o corriente / campo eléctrico) para cambiar el índice de refracción de la cavidad externa. El cambio en el índice provoca que solamente pase la luz con determinada longitud de onda. El tiempo de sintonía se limita por el tiempo que toma a la cavidad cambiar de longitud de onda a la luz. Los láseres sintonizados por efectos acusto-ópticos tienen un tiempo de sintonía del orden de decenas de microsegundos. El rango de sintonía se limita por el rango de longitudes de onda que pueden ser seleccionadas por el filtro. Los láseres sintonizados por efectos electro-ópticos tienen tiempos de sintonía cercanos a los nanosegundos, por lo que se pueden aplicar a redes de conmutación de paquetes.

II.1.2.3. Láseres sintonizables por inyección de corriente

Este tipo de láseres emplean una rejilla de difracción compuesta de induces de refracción alternados, colocadas en la región de efecto láser, por ejemplo, los láseres de realimentación distribuida (DFB). La inyección de corriente cambia entonces el índice de refracción en la rejilla y permite la sintonización. Si la rejilla se desplaza fuera de la región del efecto láser, al láser se le llama láser Bragg de reflector distribuido (DBR – Distributed Bragg Reflector). Tienen un tiempo de sintonía menor a los 10 ns. Se han alcanzado hasta 0.5 ns en el tiempo de conmutación.

II.2 FIBRAS OPTICAS

La transmisión por fibra óptica ha crecido de la nada en apenas 15 años. Ofrece un ancho de banda prácticamente infinito. Comparado con otros medios de transmisión usuales, la fibra puede ofrecer anchos de banda de mas de 1 THz (1 000 GHz), el espectro radioelectrico contiene unos 100 GHz (3KHz-100 GHz), el cable coaxial es de 500 MHz y el par trenzado es capaz de unos 100 MHz. Las señales transmitidas por este medio pueden llegar mucho más lejos sin necesidad de amplificadores (20 veces más).

La fibra óptica es un filamento de cristal de alta pureza construido de dos cilindros concéntricos de diferente índice de refracción que mediante fenómenos ópticos de reflexión y refracción de la luz transporta información mediante señales luminosas. Generalmente esta luz es de tipo infrarrojo y no es visible al ojo humano. La modulación de esta luz permite transmitir información tal como lo hacen los medios eléctricos

La estructura de la fibra óptica es relativamente sencilla, aunque la mayor complejidad radica en su fabricación. La fibra óptica está compuesta por dos capas, una denominada Núcleo (Core) y la otra denominada Recubrimiento (Clad). El extra delgado hilo de vidrio está cubierto por una capa plástica que le brinda la protección necesaria, aunque normalmente un gran conjunto de fibras se unen entre sí para obtener mayor seguridad.

II.2.1 Cualidades de la fibra

La fibra presenta múltiples ventajas:

- ✓ **Tamaño reducido:** El diámetro de una fibra es generalmente pequeño, 125 micras, aún con su cubierta de plástico no sobrepasa las 250 micras, por lo que optimiza las canalizaciones existentes realizadas para cables coaxiales o de multipar.
- ✓ **Ligeras:** El peso de un carrete de cable de fibras ópticas no es ni la décima parte de uno de cable coaxial.
- ✓ **Flexible:** Por su tamaño y construcción su radio de curvatura mínimo es del orden de los 3 milímetros.
- ✓ **Libre de Corrosión:** Son pocos los agentes que atacan al cristal de silicio químicamente muy estable.
- ✓ **Baja Atenuación:** La fibra óptica alcanza atenuaciones menores a 0.15 dB/Km. comparada con los 19dB/Km del cable coaxial.

- ✓ Gran Ancho de Banda: Puede manejar anchos de banda de 1 a 10 Ghz/Km o hasta varias decenas de GHz dependiendo del tipo de fibra utilizado y podría llegar en teoría hasta 50 Tbps.
- ✓ Inmune a Interferencias Electromagnéticas. las fibras ópticas son dieléctricas por lo que no hay inducción debida a interferencias externos o descargas eléctricas
- ✓ Diafonía Insignificante: Al transportar luz, difícilmente existe el fenómeno de Next como entre cables de cobre.
- ✓ No Generan Chispas: Al transportar luz es imposible la generación de cortos circuitos
- ✓ Seguridad: Las señales luminosas difícilmente pueden ser detectadas y mucho menos intervenidas a menos que se cuente con equipos ópticos muy sofisticados

II.2.2 Empleo de las fibras ópticas en WDM

Las fibras ópticas transportan los bits de una señal digital como estados de luz "encendido" y "apagado" Un láser genera ésta luz en el lado del transmisor y para detectar la luz se utiliza un fotodiodo. La luz viaja dentro de la fibra (es guiada a través de la fibra) y permanece en ella gracias a las propiedades refractivas y reflectivas de su recubrimiento. Las fibras ópticas mas simples, *de índice escalonado*, están formadas por dos capas cilíndricas, el núcleo y el recubrimiento, con diferentes índices de refracción. También tienen una cubierta externa de protección de un material distinto. Entre el núcleo y el recubrimiento existe una diferencia del índice de refracción que causa la reflexión de los haces de luz en éste punto, guiándolos a lo largo de la fibra. El diámetro de éstas fibras es lo suficientemente ancho para permitir diferentes patrones o *modos* de luz y todos ellos se reflejan con diferentes ángulos en el recubrimiento provocando que los haces de luz lleguen a destiempo del lado del receptor. La señal recibida llega más ancha ocasionando un gran problema en transmisiones de gran tamaño.

El avance de las fibras llevó al desarrollo de fibras con mayor cantidad de índices de refracción, *de índice graduado*, que mejoran ligeramente el desempeño en transmisiones de gran tamaño. Finalmente se logró la manufactura de fibras lo suficientemente delgadas para que solo exista un *patrón o modo*, fibras *monomodo*, eliminando drásticamente la dispersión modal permitiendo mayores velocidades de transmisión.

II.2.3 Fibras Monomodo

Las fibras monomodo son las preferidas para largas distancias y cableado submarino. Su gran capacidad de transmisión de datos y mínima necesidad de repetidores (uno cada 100 Kms) son sus mejores cualidades. Sin embargo, se requieren costosos dispositivos de gran calidad a fin de lograr

rayos con una sola longitud de onda evitando la dispersión cromática. La teoría modal aplicada en una fibra de índice escalonado demuestra que esta fibra no puede transportar más que un solo modo cuando la frecuencia normalizada v de la fibra inferior o igual a 2.405

La condición para que sólo haya un modo (*fibra monomodo*):

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} a(n_1 - n_2)^2 \leq 2.405$$

para que una fibra sea monomodo a una longitud de onda determinada, se puede actuar ya sea sobre la dimensión a del radio del núcleo, o sobre la diferencia relativa de índice Δ

Como ya se mencionó la frecuencia de corte es $v = 2.405$ lo que corresponde a una longitud de onda λ_c .

$$\lambda_c = \frac{2\pi a^2 n_1^2 - n_2^2}{2.405}$$

Gracias a las fibras modernas disponibles en el mercado de las telecomunicaciones, es posible transmitir información a través de un gran espectro.

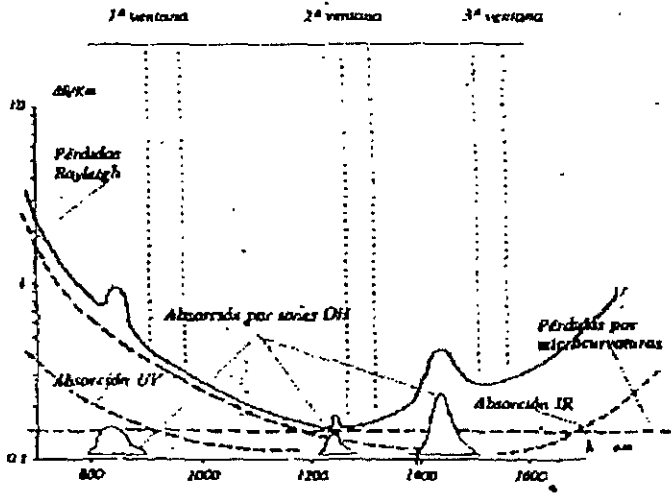


Figura 1.1 Atenuación en una fibra

Algunos de los más recientes desarrollos con fibra óptica han demostrado que:

Se pueden obtener fibras monomodo con pérdidas mínimas de alrededor de 0.16 dB/km a 1.55 μm .

Con la técnica de la preforma por depósito interno MCVD (Modified Chemical Vapour Deposition) se pueden fabricar fibras ópticas monomodo para transmisión de larga distancia y tasas de transmisión elevadas (100 a 200 Km con 10 GHz·Km) y dispersión menor de 1 ps/(nm·km) entre 1.34 y 1.58 μm .

Con las estructuras de recubrimiento múltiple se puede obtener una dispersión mínima de unos cuantos ps/(nm·km) entre 1.3 y 1.7 μm , y pérdidas menores a 0.45 dB/km a 1.6 μm y 0.55 dB/km a 1.3 μm .

Finalmente, con las fibras de recubrimiento inclinado se han obtenido atenuaciones similares con dispersión de 14 ps/(nm·km) a 1.5 μm en sistemas que manejan dos longitudes de onda: 1.3 y 1.5 μm .

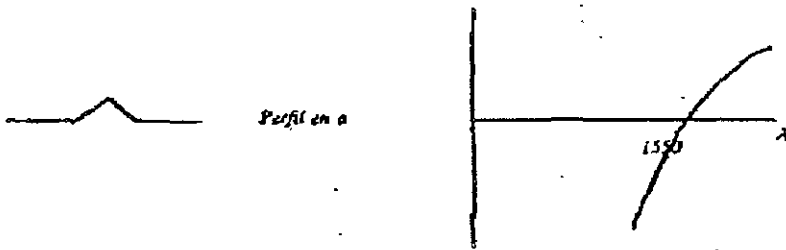


Figura T.2 Variación de la dispersión con el perfil

II.3. AMPLIFICADORES ÓPTICOS PARA WDM

En los Sistemas de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) se ha trabajado con distintos amplificadores ópticos. Sin embargo, existen algunos como el Fabry Perot que no se adaptan simultáneamente a la amplificación de varias longitudes de onda aunque se pueden utilizar para amplificar alguna longitud de onda determinada. Los amplificadores de onda viajera *Travelling Wavelength Amplifiers (TWAS)* permiten amplificar un rango más amplio de longitudes de onda. Se han construido amplificadores totalmente ópticos con ayuda de los efectos de Raman o Brillouin en una fibra monomodo.

II.3.1. Amplificadores Raman

El fenómeno de esparramiento Raman, así como el de Brillouin, convierte una pequeña porción de una frecuencia incidente en otras frecuencias. Este efecto puede ser estimulado y utilizado para transferir energía de una bomba láser hacia una señal débil. En el efecto Raman, el corrimiento de Stokes y el ancho de banda de la ganancia son mucho más grandes que en el efecto Brillouin. Sin embargo, el problema del crosstalk entre canales es particularmente complejo aunque se ha logrado disminuir aumentando el espaciamiento entre canales y utilizando suficiente potencia con una longitud de onda de bombeo apropiada.

De cualquier manera, hoy en día la solución más popular en las aplicaciones comerciales es la amplificación con fibra óptica monomodo dopada con tierras raras.

II.3.2. Amplificadores Ópticos dopados con Tierras Raras

En estos dispositivos, la señal que será amplificada y el haz de la bomba óptica se superponen. La bomba excita los iones dopados de tierras raras como el erbio, prascodimio o el neodimio, elevándolos a niveles más altos de energía donde la amplificación se lleva a cabo por emisión estimulada.

El Erbio por sus cualidades de amplificación es el más utilizado ya que permite amplificar eficazmente un rango de frecuencias entre 1520 y 1550 nm.

Las principales ventajas de los amplificadores de fibra dopada con Erbio *Erbium-Doped Fiber Amplifiers (EDFA)* son: permiten un excelente acoplamiento debido a que el amplificador es una fibra monomodo, son insensibles a la polarización de la luz, presentan baja sensibilidad a la temperatura, ganancia alta sin distorsión en transmisiones altas, amplificación simultánea de señales.

de Multicanalización por Longitud de Onda WDM en rangos de más de 30 nm, además de ser inmune al crosstalk a lo largo de los canales de WDM.

Sin embargo, también presentan desventajas: es necesaria una bomba láser, difícil de integrarse con otros componentes, se limitan solo a una ventana $1540 \text{ nm} \pm 30 \text{ nm}$. Por último, la mayoría deben tener un ecualizador de ganancia sintonizable para la amplificación múltiple.

Los EDFA's son usados frecuente y sistemáticamente en la multiplexación en redes ópticas, ya que, no obstante sus limitaciones, sus ventajas las superan.

Cabe resaltar que la ganancia de un amplificador de fibra dopada no es plana. Por lo tanto, para sistemas de larga distancia donde se utilizan varios amplificadores en cascada, una pequeña diferencia de ganancia en cada amplificador resultaría en grandes diferencias entre los canales WDM, lo que hace necesario el uso de ecualizadores de ganancia.

II.3.3. Aplicaciones de los Amplificadores de fibra dopada con Erblio en los sistemas WDM

Los amplificadores de Erblio EDFA's son utilizados en las redes para: incrementar la potencia transmitida (amplificador impulsor), amplificar señales transmitidas para compensar las pérdidas ocurridas en la fibra (amplificador en línea), o amplificar señales antes del receptor (preamplificador).

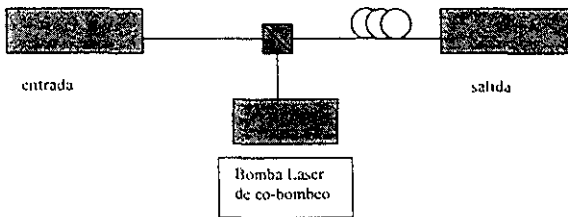


Figura A1 La fibra dopada con Erblio en un EDFA de etapa única es bombeada por láseres de 980-nm y/o 1480-nm, y la luz es acoplada después en una señal de 1550-nm

La fibra es bombeada ópticamente por láseres de 980 y/o 1480 nm, esta luz es acoplada en la señal de 1550nm de la fibra por medio de un multiplexor óptico. Las longitudes de onda bombeadas son absorbidas por los iones de Erblio incrustados en el silicio, elevándolos a un estado de excitación. La amplificación ocurre cuando, estimulado por un fotón de la señal de 1550nm, un ion excitado de Erblio regresa a su estado basal, produciendo un segundo fotón, idéntico al de la señal de 1550nm.

Los parámetros fundamentales de un EDFA son su potencia de salida (típicamente medida en dBm) y su figura de ruido (cuantificada en dB). La potencia de salida esta determinada principalmente por la potencia de la bomba y las pérdidas internas del amplificador.

La figura de ruido se define como el cociente entre la relación señal a ruido a la entrada y la relación señal a ruido a la salida.

Un amplificador de una etapa o de etapa sencilla tiene una o dos bombas láser pero puede tener más si se necesita mayor potencia. Cuando la radiación de la bomba se propaga en la misma dirección de la señal de 1550 nm., es un amplificador co-bombeado; un amplificador contra-bombeado es la parte inversa es decir que el bombeo láser se propaga en dirección contraria a la señal de 1550 nm. En el caso de una bomba láser, co-bompear a 980 nm minimiza la figura de ruido (ideal para un pre-amplificador) mientras que una arquitectura de contra-bombeo a 1480 nm mejora la potencia de salida aunque aumenta la figura de ruido (ideal para un amplificador repetidor).

II.3.4. Amplificador de Etapa Única Mejorado

El diseño de un amplificador de etapa única puede ser mejorado. Un aislador puede utilizarse a la entrada o a la salida para prevenir que emisiones de la bomba láser o emisiones espontáneas amplificadas (ASE) de la fibra dopada con erbio se filtren en la transmisión. Se pueden agregar derivadores ópticos para proporcionar información acerca del espectro de la señal a la entrada y salida. La re-alimentación puede ser utilizada para controlar la potencia de salida, monitorear su desempeño, o simplemente para las alarmas de disparo. Adicionalmente, se puede colocar un monitor de reflexiones a la salida para observar las señales ópticas que regresan debido a la reflexión.

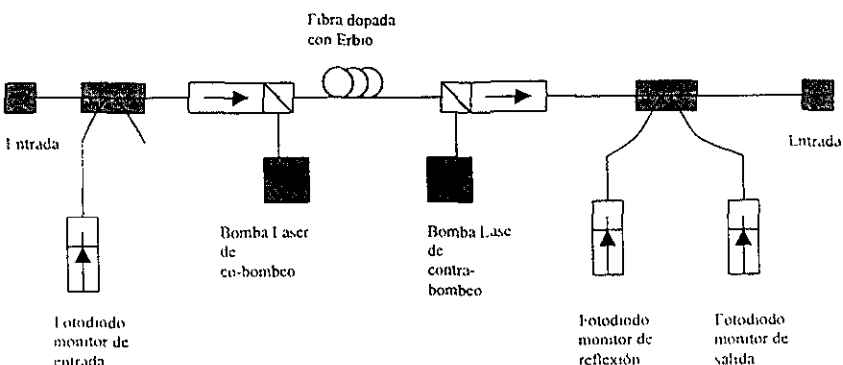


Figura A2 En un EDFA de etapa única mejorado, la potencia del amplificador de entrada aumenta, existe un descenso de ganancia en el medio, y el nivel de salida se comienza a saturar

Los amplificadores de etapa única son apropiados para una gran variedad de aplicaciones como amplificadores de un solo canal, amplificadores para WDM sencillo, y cuando se buscan amplificadores de bajo costo. Utilizando bombas láser de alto poder esquemas combinados de bombas láser se puede obtener una potencia de salida de 20 dBm. Sin embargo, los amplificadores de etapa única no cumplen con todas las arquitecturas empleadas en telecomunicaciones, lo que conlleva a la aplicación de EDFAs multietapa.

II.3.5. Amplificadores Multi-etapa

A menos que se especifique, la salida de un EDFA tiene el mismo espectro de ganancia que la fibra dopada con Er y, por lo tanto, la ganancia por canal puede variar por algunos dB's en función de la longitud de onda a través de la banda de transmisión. Algunos diseños diseñados para transmitir 16 canales con una separación de 200 GHz requieren solo la banda C roja (1540-1563 nm), donde la respuesta del erbio es prácticamente plana. Sin embargo, cuando se requiere aumentar el número de canales, se deben utilizar la banda C completa (1528-1563nm) y la banda L (1570-1610 nm).

En este rango de longitudes de onda la ganancia en el espectro del Erblio varía considerablemente. Este desequilibrio afecta los sistemas de larga distancia que tienen varios EDFA's en cascada. La solución más común es la inserción de filtros para atenuar las longitudes de onda con mayor potencia ecualizando la señal. Típicamente, los filtros para aplanar la ganancia introducen pérdidas de hasta 8 dB en algunas longitudes de onda. La tecnología más popular para la atenuación son los filtros de película delgada y las rejillas en la fibra. En un amplificador de etapa única, el aplanamiento de ganancias puede ocurrir en la salida, perdiendo potencia de salida y desperdiciando potencia de la bomba, o alterando el espectro que entró al amplificador, con la desventaja que la transmisión a largas distancias ya atenuó la señal antes de cualquier amplificación.

II.3.6. Arquitecturas Mejoradas.

En los sistemas WDM, los amplificadores ópticos pueden necesitar un acceso a media etapa por medio de un dispositivo externo entre las etapas del amplificador para monitorear, agregar/segregar, y compensar dispersión. Ya que se introducen pérdidas de hasta 10 dB en la ruta de amplificación, el diseño debe ser mejorado para evitar estas pérdidas. Estas mejoras obviamente no pueden ser implementadas en un amplificador de etapa única.

Cuando se necesitan múltiples bombas, la configuración más común es una bomba láser de 980 nm co-bombeando en la primera etapa del amplificador y una de 1480 bombeando en contrasentido en la segunda. Generalmente, un elemento de pérdidas significativas como filtros de aplanamiento de

ganancia ó módulos add/drop se encuentra entre las etapas. El acceso inter-etapas puede ser antes o después del aplanamiento de ganancia o entre las etapas adicionales.

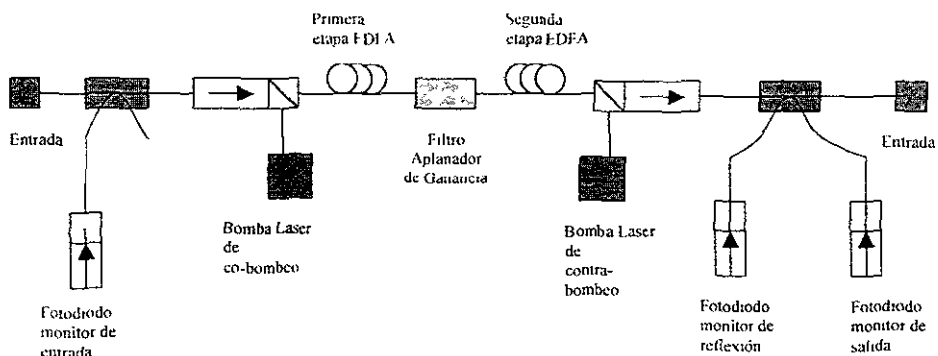


Figura A3 Los amplificadores multi-etapas pueden tener puntos de acceso en medio de las etapas donde la señal es alimentada en un dispositivo externo. El espectro de ganancia de un amplificador multi-etapa con o sin filtros aplanadores de ganancia muestran que la ganancia de equalización es posible.

II.3.7. Componentes de los Amplificadores EDFA

Un EDFA esta formado por componentes pasivos, fibra dopada con Erblio, y bombas láser. Los componentes pasivos se eligen de acuerdo a sus especificaciones ópticas, la fibra dopada con erblio debe reunir los requisitos de ganancia, potencia y figura de ruido. Por ultimo, las bombas láser son el elemento principal en el precio y desempeño de un amplificador óptico. La disponibilidad de bombas de dos longitudes de onda ofrece una gran libertad para el diseño de los amplificadores EDFA.

COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE BOMBAS LASER DE 980 nm y 1480 nm		
PARAMETROS DE DISEÑO	980 nm	1480 nm
Figura de Ruido mínima	< 4 dB	5.5 dB
Tasa de potencia máxima con fibra acoplada	300 mW	240 mW
Eficiencia en Conversión Óptica	33 %	50 %
Precio de la tasa de potencia en la fibra	9-15 \$/mW	5-12 \$/mW
Precio de bombeo láser para 1550 nm dBm	27-15 \$/A	10-24 \$/A
Eficiencia del chip láser	0.9 W/A	0.4 W/A
Eficiencia del conector con fibra acoplada	40 %	14 %
Banda de absorción del Erblio en el silicio de -3dB	976-984 nm	> 1450 nm

Los láseres de 980nm son más atractivos ya que ofrecen amplificación de bajo ruido, en tanto que los láseres de 1480 son más baratos. Aunque las bombas de 980 nm son más potentes, una de 1480 puede brindar mayor amplificación ya que se pierde menos energía convirtiendo un fotón de 1480 nm en uno de 1550 nm.

Además, el espectro de absorción plana del erbio cercano a los 1480 nm generalmente elimina la necesidad de estabilizar las señales, mientras que las bombas láser de 980 nm para EDFA's más avanzadas deben estabilizarse con rejillas de Bragg externas para evitar deformaciones en las longitudes de onda menores. Por otra parte, los láseres de 980 nm tienen mayor eficiencia lo que permite reducir el consumo de energía y la generación de calor, que son parámetros críticos en ambientes de oficina central, comunes en las arquitecturas de las redes ópticas metropolitanas.

II.3.8. Amplificación RAMAN aplicada en sistemas modernos

Uno de los nuevos desarrollos es la implementación de la amplificación Raman en los sistemas de comunicaciones ópticas. La amplificación Raman se logra por medio de un efecto no lineal en la fibra de transmisión que proporciona ganancia adicional sin degradación por ruido significativa. Por ejemplo para obtener ganancia en la banda de 1550 nm, se debe bombear a ~1455 nm. Debido a que la amplificación Raman es un efecto de segundo orden se requiere una potencia de bombeo de entre 500 a 700 mW. Para lograrlo se pueden utilizar dos métodos: láseres con diodos de polarización combinada similares a las bombas convencionales de 1480 nm o un láser elaborado con fibras de dispersión corrida.

En las redes ópticas, la amplificación Raman puede ser utilizada como medio único de amplificación o combinado con EDFA's. Los sistemas del futuro preferirán la amplificación Raman para brindar ganancia adicional y reducir, pero no eliminar, el uso de EDFAs.

II.3.9. Nuevas Bandas y Ecuilibración de Ganancia

La tendencia de los amplificadores ópticos es la ecualización de ganancia. Para lograrlo, se han desarrollado varias tecnologías y la idea principal es un control dinámico del nivel de intensidad de cada canal para corregir las desigualdades de ganancia y pérdida en la red, lo cual es particularmente importante cuando se aumenta la tasa de transmisión o el número de canales. Un requisito indispensable en estos sistemas es contar con una respuesta rápida del amplificador para que los canales agregados o segregados no introduzcan distorsión en otras longitudes de onda (canales).

Además, con la creciente demanda de ancho de banda, los amplificadores deben de operar en nuevas ventanas. La ventana de transmisión de la de banda L - de 1570 a 1610 nm - ha abierto nuevas posibilidades en el número de canales. Actualmente, ya existen amplificadores EDFA's que funcionan en esta banda. Los nuevos sistemas tendrán mayor número de ventanas de transmisión que permitan transmisiones a grandes distancia a través de todo el espectro de la fibra

II.4. AMPLIFICADORES ESCALABLES PARA SISTEMAS WDM

Una fibra óptica monomodo tiene aproximadamente 300 nm de ancho de banda disponible, entre las ventanas de las bandas S, C y L, regiones donde se registra la menor atenuación. La velocidad de la señal (que es la tasa de bits) depende de la dispersión y de los límites no-lineales de la fibra. La fibra óptica de dispersión corrida con dispersión cero *Non-Dispersion-Shifted fibre* (NDSF) tiene dispersión cero en 1310 nm., pero la atenuación es mayor que en la región de los 1550 nm, dada la disponibilidad de la nueva fibra de dispersión corrida sin dispersión cero en la ventana de los 1550 nm. *Non-Zero-Dispersion-Shifted fibre* (NZDSF) y de los amplificadores EDFA, la región de 1550 nm, es la ventana ideal para la tecnología WDM. La fibra NZ-DSF minimiza el efecto de mezcla de cuatro ondas, pero, todavía se debe manejar la dispersión de un gran ancho de banda que no se puede corregir con un Modulo de Compensación de la Dispersión (DCM) ya que la cantidad de dispersión en cada longitud de onda es diferente.

En vista de que el factor más significativo que se debe considerar en el diseño e implementación de la tecnología WDM es la escalabilidad los sistemas deben de tener el potencial de crecer en el momento requerido.

Para cubrir el ancho de banda completo con una velocidad de transmisión alta, se requiere una mayor ganancia o reducir la longitud de la fibra para compensar la pérdida de la señal. Adicionalmente, el número de canales es proporcional a la ganancia del amplificador óptico. Como la transmisión de WDM cada vez tiene un espaciamiento en frecuencia más estrecho y mayor cantidad de canales se debe manejar la dispersión, el efecto de mezcla de cuatro ondas, y la regulación de potencia de los canales además de funciones de multiplexión Add/Drop. Es por esto, que se desarrollaron amplificadores ópticos escalables

Un amplificador óptico escalable tiene dos componentes principales: Filtros de Banda Angosta (NBF) y Amplificadores de Banda Angosta (NBA). Los NBF's seleccionan el ancho de banda momentáneamente requerido ya sea por capacidad o por sistema como SONET, ATM o IP. El ancho de banda es apartado por el NBF sin pérdidas. El NBA solamente incrementa las señales del ancho de banda seleccionado. Estos amplificadores ópticos pueden ser utilizados como impulsor,

como amplificadores en línea, y como pre-amplificadores. Este dispositivo es escalable y puede conectarse en cascada con varias configuraciones, en serie o en paralelo. El arreglo de cascada en paralelo ofrece escalabilidad lo cual permite reducir costos. En estos casos la capacidad se aumenta cuando existe una necesidad real sin necesidad de grandes inversiones en expansiones de capacidad que no serán utilizadas inmediatamente. Estos dispositivos son compatibles con amplificadores de Banda L, Amplificadores Raman de la Banda S, y amplificadores de semiconductores. Cada segmento del ancho de banda puede ser manipulado por un amplificador óptico.

Un arreglo de amplificadores ópticos escalable maneja la dispersión sobre una banda angosta, lo cual permite incrementar la distancia de transmisión y mayor inmunidad a los efectos no-lineales. La capacidad de modulación de los amplificadores ópticos ofrece control sobre la ganancia en el ancho de banda lo que los hace atractivos para los sistemas que manejan grupos de señales provenientes de varios lugares y que llegan a diferentes destinos. Con los NBA's se pueden compensar las pérdidas que pueden experimentar las señales agregadas y segregadas en los componentes OADM.

Los amplificadores se componen de un Modulo de Ganancia Óptica (OGM) y un controlador de ganancia (OGD) Un OGM esencialmente es un bloque de ganancia con componentes pasivos incluyendo NBF y fibra dopada con Erbio. Los amplificadores ópticos utilizan filtros especializados para obtener mejor desempeño de ganancia y figura de ruido. El filtro de banda add/drop (BA/D) es el elemento de ensamble de un amplificador óptico de banda. Las características del filtro determinan la interferencia co-canal en un arreglo y la capacidad de concatenación. Con la integración de estos filtros BA/D, el OGM amplificara sólo cuatro canales consecutivos en vez de desperdiciar la potencia de la bomba en longitudes de onda que no necesitan amplificación. Canales adicionales, en el espectro de ganancia del Erbio, pueden ser agregados sin interrumpir el servicio en los canales activos. El controlador OGD contiene una bomba láser, dos fotodetectores y un circuito electrónico lo que le permite ofrecer control automático de la ganancia, corriente constante, y potencia de la bomba constante.

En un sistema de amplificadores ópticos típico de 40 canales, las señales de los 40 canales son amplificadas primero por un amplificador optico de banda ancha y después demultiplexada en canales individuales para compensar la dispersión de cada canal y para regular el nivel de potencia. Esto vuelve al sistema más complejo así como su operación e incrementa su costo. Un método para reducir la complejidad y el costo es la accesibilidad de banda angosta, que reúne la posibilidad de compensacion de dispersión y de regulacion de potencia en un sistema de banda angosta, ésta consiste en utilizar amplificadores opticos escalables. La simplificación del sistema reduce los

costos de operación. Un amplificador de banda escalable incorpora cuatro dispositivos en un solo modulo (demultiplexor, amplificador, atenuador óptico variable y multiplexor) comparado con los tradicionales que incorporan componentes discretos. El resultado es el ahorro de espacio así como el incremento en la funcionalidad y rentabilidad.

II.5. CONCLUSIONES

Los transmisores ópticos constituyen uno de los elementos fundamentales en las redes de comunicaciones ópticas, su componente básico es el conversor eléctrico-óptico que realiza la conversión de la señal eléctrica de datos en una señal óptica o haz lumínico adecuado para su propagación por la fibra óptica. Los sistemas comerciales emplean hasta 320 canales, cada una generada por una fuente específica para cada longitud de onda. Los transmisores para WDM deben proveer estabilidad y selectividad de la longitud de onda transmitida para prevenir filtraciones en las longitudes de onda (canales) adyacentes sobre todo, cuando se trata de incrementar la densidad de canales.

El equipo de transmisión que lleva a cabo la Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) en sistemas de alta capacidad se ha desarrollado ampliamente en los últimos años. Los sistemas WDM están aprovechando la gran cantidad de ancho de banda de las fibras ópticas y la disposición de los amplificadores ópticos de fibra dopada con erbio (EDFA). La disponibilidad de fibras ópticas monomodo y de dispersión corrida con dispersión cero fuera de las ventanas de transmisión han sido factores fundamentales para la evolución de los sistemas de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM). Adicionalmente, se han descubierto nuevas bandas (ventanas) de transmisión donde los Amplificadores Escalables y las nuevas tecnologías de amplificación han permitido multiplicar el número de canales disponibles. Sin embargo, como hemos mencionado el desarrollo de las tecnologías mencionadas hubiera sido imposible sin la implementación en su diseño de filtros de alto rendimiento y con gran selectividad.

Por otra parte, los demultiplexores y receptores ópticos son parte fundamental y complementaria de los sistemas WDM ya que deben ser igualmente selectivos para lograr un desempeño óptimo de las Redes Ópticas. En el siguiente Capitulo se realiza un análisis del funcionamiento de los filtros, demultiplexores y receptores ópticos así como de los elementos y tecnologías que se utilizan en su construcción.

RECEPTORES PARA LOS SISTEMAS DE MULTICANALIZACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA (WDM)

CAPITULO III

III.1 FILTROS ÓPTICOS

La Multicanalización por División de longitud de onda es la tecnología más efectiva en cuanto capacidad de crecimiento de comunicaciones de redes ópticas. Por conveniencia esta tecnología coloca varias longitudes de onda muy cercanas dentro de una fibra con lo que las redes pueden crecer fácilmente aumentando longitudes de onda sin necesidad de tender nueva fibra

El espaciamiento estándar entre los canales es de 50 o 100 GHz, que corresponde a 0.4 o 0.8 nm en la banda de los 1550nm. Para combinar (multiplexar) o separar (demultiplexar) estas señales espaciadas estrechamente en la fibra, se requieren filtros ópticos con características de aislamiento espectral extremadamente precisas.

Los sistemas de transmisión óptica requieren funciones de agregar-segregar canales en los cuales se debe seleccionar una longitud de onda de un amplio espectro de canales. Los filtros de Rejillas de Bragg tienen esta características.

III.2 REJILLAS DE BRAGG

Las rejillas de Bragg son un dispositivo que funciona como un filtro de reflexión selectivo de longitudes de onda debido a perturbaciones periódicas en el índice de refracción en el núcleo de la fibra. Este tipo de filtros puede producir un aislamiento óptico extremo utilizando más de 10,000 rejillas a lo largo del núcleo de la fibra. Por otro lado, las rejillas de Bragg tienen algunas desventajas como las pérdidas del extremo azul, los modos por reflexión lateral y la dependencia a la temperatura y a la presión. Estas desventajas deben controlarse o minimizarse si se quiere aplicar en sistemas DWDM, sin embargo gracias a la temperatura y a la presión se pueden controlar los filtros pasobanda basados en rejillas como los de/multiplexores Add/Drop (OADM)

El acanalado de las rejillas de Bragg se fabrica exponiendo el núcleo de la fibra a un patrón de interferencia UV o a una máscara de acanalado de fase. Esta exposición a UV cambia el índice de refracción en el vidrio de silicio dopado de germanio. La longitud de onda de la luz UV producida comúnmente con KrF (248nm) y láseres Ar⁺ (244 nm) coincide con la banda de absorción del vidrio de Germanio. La fotosensitividad del vidrio puede mejorarse con cargas de Hidrógeno o codopando boro con germanio en el núcleo de la fibra. En el caso de cargas de Hidrógeno, se han logrado índices de refracción con resolución de 1×10^{-2} .

III.2.1 La técnica del chirrido (CHIRP)

El chirrido es el sonido de tonos altos y variantes emitido por ciertas aves y murciélagos. Las rejillas pueden tener periodos no uniformes a lo largo de la fibra lo que se conoce como chirrido. El chirrido en las rejillas puede tener formas distintas. El periodo puede variar simétricamente, ya sea incrementando o decrementando el periodo alrededor de un punto en la mitad de las rejillas. El chirrido puede variar linealmente, puede ser cuadrático, o puede también dar saltos de periodo. Las rejillas pueden también tener un periodo que varíe aleatoriamente. El chirrido puede lograrse de varias maneras: exposición a rayos UV de intensidad variable en un patrón, variando el índice de refracción a lo largo de rejillas con periodo uniforme, alterando la constante de acoplamiento k de las rejillas como función de la posición, aplicando presión variable, etc.

Las rejillas de Bragg pueden ampliar su ancho de banda y controlar la dispersión cromática usando la técnica del chirrido en la cual el periodo de las rejillas varía a lo largo de la fibra. Gracias a que las rejillas de Bragg con la técnica del chirrido reflejan la luz de las diferentes longitudes de onda en diferentes direcciones pueden compensar la dispersión cromática de la línea óptica. Para las aplicaciones de WDM denso se requiere un aislamiento con alto desempeño. Para que las rejillas de Bragg logren las características de reflexión y tengan suficiente aislamiento, es necesario suprimir los modos laterales por reflexión.

III.2.2 Compensación de las pérdidas en el extremo azul

Las rejillas de Bragg con alta reflectividad presentan pérdidas indeseables en las bandas de transmisión en el extremo inferior de la banda (longitudes de onda cortas), este fenómeno se conoce como pérdidas del extremo azul. El efecto ocurre ya que, cuando las rejillas de Bragg se graban en una fibra monomodo, la rejilla se forma solo en el núcleo, y el campo del modo fundamental es más largo que el núcleo. La región con rejillas no puede cubrir todo el campo del modo fundamental, entonces se presenta la difracción en la superficie circundante entre el núcleo y el recubrimiento.

Las fibras con recubrimiento fotosensitivo pueden disminuir notablemente las pérdidas en el extremo azul.

III.2.3. Compensación de temperatura

La dependencia a la temperatura de la longitud de onda de las rejillas de Bragg en una fibra es típicamente de $\sim 100\text{nm} / 100^\circ\text{C}$ lo cual es demasiado para las aplicaciones de un sistema WDM. Para compensar esta dependencia se requiere un empaque especial.

La dependencia a la temperatura de las rejillas de Bragg para una fibra grabada sin compensación se puede calcular por:

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = 2\Lambda \left(\frac{dn}{dT} + n\alpha_f \right)$$

donde λ_B es la longitud de onda de Bragg, T es la temperatura, Λ es el periodo de las rejillas, n es el índice de refracción promedio, y α_f es el coeficiente de expansión térmico.

Para compensar la dependencia a la temperatura de la longitud de onda en las rejillas de Bragg, se utiliza un termino negativo (alrededor de -0.7) que resulta en:

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = 2\Lambda \left\{ \left(\frac{dn}{dT} + n\alpha_f + \left(\frac{d\xi}{dT} \right) \right) \right\}$$

donde ξ es la tensión longitudinal que le podemos agregar a la fibra con rejillas. Para producir la tensión, se colocan bloques de aluminio en cada extremo del tubo de vidrio de silicio con rejillas de Bragg. Debido a que el aluminio tiene un coeficiente de expansión mayor al del silicio, se produce una diferencia de presión con dependencia negativa a la temperatura.

El espectro de los filtros puede ser una o una serie de ventanas separada por bandas que son eliminadas por reflexión.

III.3 FILTROS QUE UTILIZAN REJILLAS

III.3.1 Rejillas de realimentación distribuida. (Distributed Feedback DFB Gratings)

Las rejillas de realimentación distribuida son probablemente el filtro paso banda más simple, utilizan defasamientos con la longitud de las rejillas. Es un filtro Fabry-Perot con una cavidad menor que una longitud de onda de la rejilla de Bragg. La posición y el tamaño del corrimiento de fase determinan la posición y las longitudes de onda de la banda de transmisión.

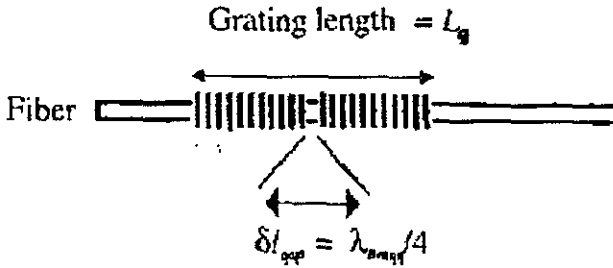


Figura F1. Rejillas de Bragg de realimentación distribuida. Un máximo de transmisión aparece en el centro de la banda de paso cuando la cavidad es justamente $\lambda/4$.

La estructura de realimentación distribuida se utiliza en los láseres semiconductores para que operen en una frecuencia única. Con un corrimiento de fase de $\lambda/4$ en un DFB se tiene una banda de paso en la mitad de la banda suprimida.

III.3.2. Filtro paso banda de Superestructura

Como es sabido si se coloca más de un defasador de $\lambda/4$ en las rejillas se obtendrán varios picos en la banda de paso. Este principio se utiliza para producir una superestructura de Rejillas, que trabaja con reflexión. El espectro de reflexión tiene varios picos estrechos de reflexión.

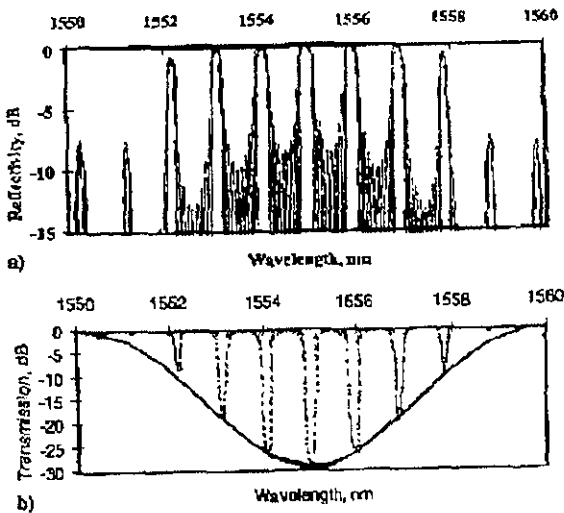


Figura F2 a) Espectro de reflectividad para un Filtro Paso Banda de Superestructura
b) Espectro de transmisión del mismo filtro

Se utiliza en láseres semiconductores para permitir la sintonización de láseres por pasos. Sin embargo, una máscara de fase por puntos puede producir resultados similares. Ya que una máscara de fase generalmente se fabrica grabando pequeñas rejillas juntas, si no están posicionadas correctamente se producen errores alrededor del campo de las rejillas. Estos errores de fase "aleatorios" producen múltiples corrimientos de fase en las rejillas, resultando en múltiples picos de reflexión, cada uno con un ancho de banda inversamente proporcional a la longitud de las rejillas y espaciados a intervalos de longitudes de onda inversamente proporcionales al tamaño del campo. Para aplicaciones de filtrado es necesario conseguir las características exactas.

La figura F2 muestra el espectro de reflexión y transmisión logrado con una superestructura de rejillas.

III.3.3 Filtros Fabry Perot

Los filtros de fibra con rejillas con realimentación distribuida es el tipo más simple de Fabry-Perot (FP). Incrementando la cavidad entre las dos secciones de rejillas permite varios picos en la banda de paso. El ancho de banda y la reflectividad de las rejillas determina el rango del espectro y el *finesse* del filtro Fabry-Perot. Estos filtros trabajan similarmente a los interferómetros FP, excepto que las rejillas son de banda estrecha y son reflectores distribuidos. Con rejillas de chirrido se logra un mayor ancho de banda creando varios picos pasobanda. Controlando la longitud L de las rejillas y la separación δl se puede alterar fácilmente la banda de paso.

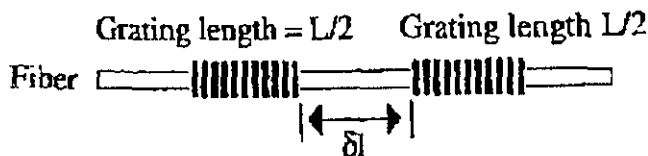


Figura F3 Esquema de un filtro Fabry-Perot. En la configuración más simple, las rejillas son idénticas, aunque se pueden utilizar rejillas distintas para un filtro pasobanda más complicado.

El débil rizo de la banda de paso de estos filtros que se logra empobreciendo el *finesse* es ideal en la transmisión WDM de solitons

III.3.4 Filtros basados en el Interferómetro Michelson

El interferómetro Michelson (MI) puede ser utilizado como un filtro pasobanda de longitudes de onda mezcladas. Mientras el acoplador divide la potencia de entrada equitativamente entre los dos

puertos, la luz es reflejada por una rejilla simple con 100% de reflexión (HR1) y es nuevamente dividida equitativamente entre los puertos 1 y 2. Por lo tanto, sólo el 25% de la luz se encuentra en la banda de paso del puerto 2. Este arreglo funciona efectivamente como un filtro pasobanda a pesar de sus pérdidas. De cualquier manera, existen métodos para eliminar las pérdidas por inserción en la fibra.

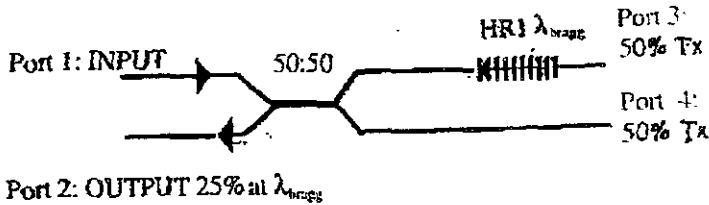


Figura F4. Acoplador de fibra con rejillas en un solo brazo. La salida en el puerto 2 tiene el 25% de la potencia del puerto 1. La señal transmitida en el canal correspondiente a λ_{Bragg} en el puerto 3 es la que se refleja y sale en el puerto 2.

Con dos rejillas idénticas, una en cada brazo del Interferómetro Michelson, el 100% de la luz reflejada puede ser ruteada en el puerto 2. La luz reflejada del brazo HR2 llega al puerto de entrada con un desfase de π con respecto a la luz del brazo HR1. La luz de HR1 y HR2 llega en fase a la salida del puerto 2, entonces el 100% de la luz de la longitud de onda de la rejilla de Bragg aparece en este puerto. La luz que pasa es dividida equitativamente en los puertos 3 y 4 tiene una pérdida de 3 dB. Sin embargo, la diferencia de fase entre las longitudes de onda reflejadas entrantes al acoplador debe ser corregida con respecto al haz total para ser ruteado al puerto 2.

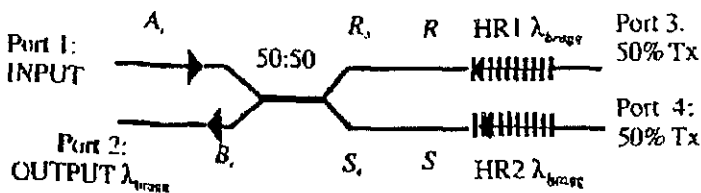


Figura F5. Filtro pasobanda basado en el interferómetro Michelson. Toda la entrada es dividida equitativamente por el acoplador en los puertos de salida 3 y 4. Las rejillas idénticas en cada brazo reflejan la luz de la longitud de onda λ_{Bragg} , y permite pasar el resto de las señales

III.3.5. Filtros basados en el Interferómetro Mach-Zender

El filtro basado en el Interferómetro Mach-Zender de rejillas duales (dual-grating Mach-Zender band-pass filter GMZI-BPF) supera la gran limitante de los filtros de Interferómetro Michelson recombinando la salida del acoplador evitando así la pérdida de 50% de la luz transmitida. Sin

embargo, se presentan pérdidas intrínsecas por esparcimiento (scatter), absorción y acoplamiento entrada / salida, aun así es posible utilizar rejillas cortas producidas por la diferencia del índice de modulación de las rejillas (aire y semiconductor).

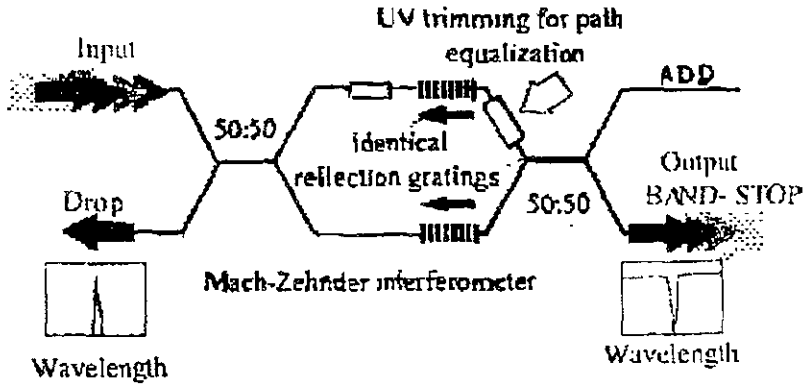


Figura F6. Interferómetro Mach-Zehnder utilizado como filtro paso banda. Ajustando la diferencia de fase del acoplador después de las rejillas, la salida puede ser direccionada a cualquiera de los puertos de salida del acoplador.

Aproximadamente 10% de la luz es reflejada en el puerto de entrada. El filtro MZI tiene la ventaja de ser extremadamente estable ante los efectos ambientales.

Se puede observar que este dispositivo puede ser utilizado como un multiplexor agregando en la longitud de onda segregada si la misma longitud de onda se inyecta en el brazo superior de la salida.

III.3.6 Multiplexores Ópticos Add/Drop basados en los Filtros de Interferómetro Mach-Zehnder

Cambiando la fase de uno de los brazos de MZI entre el acoplador y las rejillas se logra reutar la luz reflejada al puerto drop o a la entrada. Puede utilizarse cualquier método que altere la fase para conmutar el Multiplexor Add/Drop. Los parámetros que pueden ser alterados son la presión y la temperatura para alterar la diferencia de fase entre los brazos del Mach-Zehnder, o de la longitud de onda de la rejilla de Bragg. Para alterar el estado de la salida, la fase en un brazo puede ser sintonizada calentando 13° una fibra de 10 mm. Se puede conmutar el multiplexor Add/Drop por presión extendiendo $1/4\lambda_{\text{Bragg}}$ la fibra.

Sintonizar ambas rejillas simultáneamente ya sea por presión o por temperatura y mantener la estabilidad del interferómetro requiere de controles muy precisos.

El filtro basado en el interferómetro Mach-Zender GMZI-BPF puede ser utilizado como multiplexor Add/Drop (OADM). Si la fase de uno de los brazos puede ser controlada activamente como con un tensor piezoeléctrico, entonces una longitud de onda puede ser conmutada al puerto segregar (drop) o reflejada al puerto de entrada. La función de inserción puede realizarse de manera similar utilizando un segundo tensor piezoeléctrico en las rejillas de un brazo del MZI. Los puertos de agregar y segregar tienen salidas para monitorear el estado de la salida y para el control de los tensores piezoeléctricos que conmutan el GMZI-BPF utilizando lazos con fase encadenada. Una desventaja de este esquema es que siempre bloquea la transmisión del canal, si importar si es segregado o no, y debe ser reinsertada para su transmisión posterior.

III.3.7. Filtros de rejillas de Bragg dentro acopladores

En los últimos años se han utilizado los acopladores selectivos de longitudes de onda Co- y Contradireccionales. Existen varias maneras de utilizar las rejillas dentro acopladores como filtros. A continuación se describen tres tipos diferentes de acopladores, que incluyen rejillas para asistir (grating-assisted coupler, GAC), para frustrar (grating-frustrated coupler, GFC) y para reflejar (Bragg-reflecting coupler, BRG) la luz de determinada longitud de onda que reúna los requisitos de concordancia de fase.

El periodo de las perturbaciones del índice de refracción en acopladores codireccionales para asistir (GAC) entre dos fibras está determinado por la diferencia de la constante de propagación entre las dos guías. Esta diferencia generalmente es pequeña, por lo tanto, el periodo será largo.

A un acoplador normal que sea desintonizado por la dispersión de las rejillas y por lo tanto actúe como un acoplador en las longitudes de onda cercanas a la de Bragg, es conocido como acoplador para frustrar. Dos fibras con constantes de propagación idénticas intercambiarían potencia excepto en la longitud de onda frustrada. Las rejillas que están presentes en una fibra producen un reflector de Bragg en la longitud de onda frustrada. El extremo final de la fibra de entrada, aquel que no contiene rejillas, se convierte en el puerto segregar.

El acoplador reflectivo de Bragg (BRC) requiere de perturbaciones con un periodo corto, ya que es dependiente de la suma de magnitudes de las constantes de propagación de los dos modos. El dispositivo puede ser construido con dos rejillas en acopladores pulidos o con una sola en un acoplador fundido, ya que la perturbación debe estar en toda la sección transversal de la región del acoplador. El canal segregado es reflejado y ruteado al puerto 2 del acoplador.

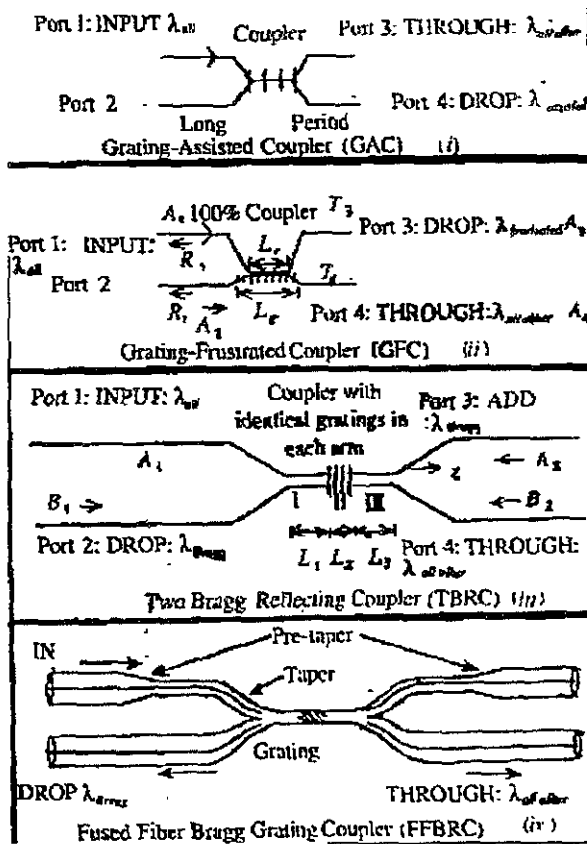


Figura F7. Filtros pasobanda utilizando rejillas dentro de acopladores.

III.4. FILTROS SINTONIZABLES

Dado que en un sistema WDM cada canal está relacionado con una longitud de onda distinta, la manipulación de los canales y particularmente la selección de cada canal requiere de una selección óptica de cada longitud de onda. Esto se logra mediante la utilización de distintos filtros dependiendo de la aplicación. Algunos parámetros importantes de los filtros incluyen pérdidas por inserción, ancho de banda, supresión de los lóbulos laterales, rango dinámico, velocidad de sintonía, mecanismos de control, tamaño y precio bajo. Existen varios tipos de filtros que cubren las características antes mencionadas. Por ejemplo, la Unión Internacional de Telecomunicaciones

(ITU – *International Telecommunication Union*) ha establecido estándares típicos para el espaciamiento entre canales de 0.8 nm (100 GHz), y en algunos sistemas 0.4 nm (50 GHz) de espaciamiento entre canales. Adicionalmente, un requerimiento de aislamiento de canales de -20 o -30 dB debe de cumplirse por los distintos filtros, y un rango de sintonía se requiere para cubrir todo el rango espectral de los amplificadores dopados con erbio (EDFA).

Generalmente, los filtros ópticos pueden dividirse de acuerdo a su aplicación en dos categorías principales:

- Baja velocidad de sintonía , con tiempos de sintonía de hasta pocos milisegundos, útiles para redes de conmutación de circuitos.
- Alta velocidad de sintonía, en el rango de los microsegundos y nanosegundos, útiles para redes de conmutación de paquetes y de células.

La primera categoría se basa principalmente en efectos mecánicos y de temperatura.

III.4.1. Filtros Fabry-Perot

El filtro Fabry-Perot (FP) trabaja bajo el principio de interferencia parcial de un haz de luz , en el que un rayo se divide y produce interferencia consigo mismo y produce picos y nulos en el dominio de la frecuencia. El filtro Fabry-Perot consiste de una cavidad resonante formada entre dos caras altamente reflejantes. Una cavidad FP, como resonador, puede caracterizarse por un factor Q el cual en óptica se conoce como *finesse*. El *finesse* mide la energía atrapada en la cavidad relativa a la pérdida de energía por ciclo. Cuanto mayor sea la *finesse*, más angosta sera el ancho de línea de resonancia. Otro parámetro importante es el rango espectral libre (FSR – free spectral range) del filtro FP, el cual determina el espacio (en longitudes de onda) después del cual las características del filtro se repiten periódicamente. Por lo tanto, el FSR junto con *el finesse* determinan el número máximo de canales WDM que pueden manejarse. Ajustando la posición de la cara reflectora puede sintonizarse el filtro, algunos parámetros típicos son un rango de sintonía de 500 nm Y un tiempo de sintonización de 1-10 ms

Para reducir el tamaño de estos filtros, se han propuesto filtros Fabry-Perot de fibra (FP-fiber Fabry-Perot). Estos filtros se forman mediante pequeños espacios entre dos fibras y caras, que están cubiertas con películas altamente reflectivas para formar las cavidades resonantes. El *finesse* de estos filtros puede alcanzar las 200 unidades, lo que implica varias decenas de canales y pérdidas menores a 5 dB Una selección entre 16 longitudes de onda espaciadas 2 nm se han demostrado con un etalon sólido sintonizable angularmente.

III.4.2. Dispositivos micro-mecánicos

La gran mayoría de los dispositivos para comunicaciones ópticas son generalmente bordes emisores o activos. Estos dispositivos son difíciles de fabricar y usualmente dependen de una polarización externa. Dispositivos de superficies activas sintonizables son útiles para fabricar dispositivos de bajo costo comercialmente. Otra ventaja es que se tiene un mejor acoplamiento con la fibra, y por lo tanto se tienen pérdidas menores. Los dispositivos micro-mecánicos se producen regularmente por tecnología de semiconductores, usualmente GaAs. El desplazamiento de un elemento óptico micro-mecánico forma el mecanismo sintonizable. El deslizamiento de tal elemento se logra por medio de una fuerza electrostática o bien por calor. En el área de filtros sintonizables, se han demostrado filtros FP cambiando el espacio existente entre los espejos.

III.4.3. Interferómetro Mach-Zehnder

La configuración del interferómetro Mach-Zehnder (MZ) se utiliza ampliamente en aplicaciones fotónicas. Un rayo incidente de luz se divide en dos caminos los cuales se recombinan después de una determinada distancia. Los campos combinados interferirán de acuerdo a la diferencia de fase entre los dos campos. Si los dos brazos del interferómetro son de la misma longitud, no habrá diferencia de fase entre los dos campos, y se interferirán constructivamente. Sin embargo, si se introduce un tiempo de retardo en un brazo, por medio de un modulador de fase, se producirá una diferencia de fase periódica dependiente de la frecuencia. Los campos se combinarán de acuerdo a la diferencia de fases. La intensidad de la salida es por lo tanto una función periódica de la frecuencia óptica, usualmente con un FSR bajo. Los moduladores y filtros MZ se fabrican generalmente a base de LiNdO_3 . La función de transferencia del filtro MZ generalmente no es lo suficientemente angosto para aplicaciones en WDM, por lo que se utilizan configuraciones en cascada para obtener respuestas más angostas. La sintonía de estos filtros se logra a través de efectos electroópticos aplicando un voltaje a uno de los brazos del interferómetro, haciendo que estos dispositivos sean relativamente rápidos. El problema que presentan estos arreglos es el de mantener en sintonía todos los filtros colocados en cascada. Una demostración realizada en 1998 de un arreglo de tres estados en cascada obtuvo las siguientes características: Selección de uno de ocho canales con separación de 0.4 nm, tiempo de conmutación de 50 ns, Pérdidas por inserción de 19 dB, e interferencia cocanal de -22 dB. Sin embargo, la función de transferencia sufre un bajo *finesse* debido a su forma cosenoidal inherente, por lo que se crean combinaciones de otras tecnologías con las configuraciones MZ. Algunos ejemplos incluyen switches con acopladores termo-eléctricos o termo-ópticos, así como filtros de rejillas de Bragg diseñados en varias configuraciones MZ.

III.4.4. Filtros sintonizables basados en el acoplamiento de modos.

Los filtros ópticos sintonizables pueden realizarse basándose en varios mecanismos de acoplamiento de modos utilizando efectos acusto-ópticos, electro-ópticos, o magneto-ópticos. El mecanismo de filtrado puede entenderse basándose en el formalismo del acoplamiento de modos. La luz incidente se prepara inicialmente en un solo modo de propagación, tal como el modo transversal eléctrico (TE). Posteriormente se aplica una perturbación provocando que el modo original se transforme en otro modo, tal como el modo transversal magnético (TM). Campos magnéticos, eléctricos o acústicos pueden utilizarse para provocar una perturbación periódica. Con estas perturbaciones, únicamente las ondas ópticas dentro de un rango angosto de longitudes de onda que satisfagan la condición del acoplamiento de modos que pueden pasar, obteniendo como resultado una salida altamente selectiva. El separar los dos distintos modos de propagación resulta en el filtrado de longitudes de onda. Esta separación puede lograrse mediante un separador de modos, como un polarizador. Los filtros sintonizables acusto-ópticos tienen un rango de sintonía del orden de 250 nm y un tiempo de sintonía del orden de 10 μ s. La velocidad de sintonía puede incrementarse utilizando el efecto un efecto eléctrico en lugar de uno acústico. Los filtros sintonizables electro-ópticos basados en cristales pueden sintonizarse en nanosegundos, sin embargo poseen un rango de sintonía de tan solo unos cuantos nanómetros.

III.4.5. Arreglos de Guías de Onda con Rejillas

Esta tecnología utiliza un arreglo integrado de guías de onda como rejilla. La luz que pasa a través de una rejilla producirá un patrón de interferencia, permitiendo que la luz se difracte solamente en ciertos ángulos. La distribución de la intensidad espacial es una función de la rejilla, la longitud de onda λ , y el ángulo de incidencia. De este modo, diferentes longitudes de onda se difractarán en distintos ángulos. Los arreglos de guías de onda con rejillas (AWG) permiten la construcción de rejillas miniaturas con tecnología litográfica con bajas pérdidas. La estructura de un multiplexor WDM se muestra en la figura F8. Una guía de onda cóncava con N entradas actúa como un acoplador en estrella, y distribuye la luz de todas las entradas igualmente en todas las guías de onda que forman el arreglo. Cada guía de onda tiene una diferencia de longitud de ΔL de la siguiente guía de onda, provocando una diferencia de fase entre los rayos que salen del arreglo y entran en un segundo acoplador en estrella. Los rayos defasados interferirán en el acoplador dando como resultado una separación de la luz de acuerdo a la frecuencia; de esta forma cada canal tendrá una salida distinta, de acuerdo a la longitud de onda y el puerto de entrada. Considere una señal WDM con ocho canales en un AWG en la entrada a_1 . Con un diseño apropiado, los canales serán separados y tendrán salidas distintas. Otra señal WDM entrando por un puerto de entrada distinto

alcanzara al arreglo con un ángulo diferente, provocando que los canales se difracten con ángulos diferentes a aquellos con los que entraron por el puerto 1. en consecuencia, tendrán distintas salidas, por lo que se evitara repetir la misma longitud de onda en cualquier salida. En general un canal λ_i entrando en el puerto a_j , saldrá por b_k , en donde $k=(8-(i+j))_{\text{mod}8}+1$.

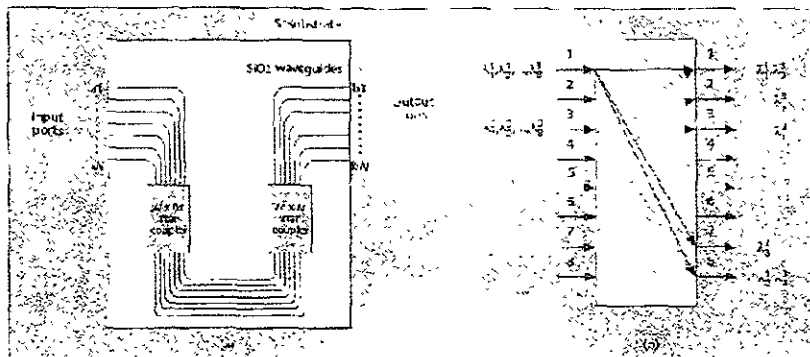


Figura F8. Arreglo de guías de Onda con rejillas: a) Multiplexor N x N, b) señal WDM de ocho canales.

III.4.6. Filtros Activos

Los diodos láseres semiconductores están hechos de una sección amplificadora y una cavidad resonante. Operando el láser por debajo de su punto de disparo produce un filtro efectivo con ganancia. Se han demostrado filtros activos utilizando láseres FP, DFB y DBR con buenos resultados. Algunas características de estos filtros son:

- Amplificación y filtrado simultáneo
- Ancho de banda angosto
- Opción de utilizarlos como demoduladores
- Sintonización eléctrica rápida

Los problemas de estos dispositivos son los requerimientos de temperatura y estabilización de corriente, emisión espontánea de ruido, dependencia de polarización, y un comportamiento no lineal provocado por la saturación de ganancia con potencia de entradas altas

III.5. RECEPTORES PARA SISTEMAS DE MULTICANALIZACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA (WDM)

El constante crecimiento en la demanda de ancho de banda para comunicaciones no puede ser cubierta por la infraestructura existente, que esta basada en gran parte en cobre y fibra óptica con una sola longitud de onda. Especialmente para los servicios futuros de Internet, donde datos de video y voz interactivos junto con archivos de gran tamaño deberán ser transportados a grandes distancias, el Acceso por división de longitud de onda (WDMA) es probablemente la técnica más poderosa disponible para lograr aprovechar el enorme ancho de banda de la fibra tendida en las redes ópticas existentes.

III.5.1. Tipos de Receptores utilizados en la Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM)

Existen básicamente dos medios físicos para lograr este acceso en un ambiente WDM. Uno es permitiendo que la emisión de longitudes de onda sea sintonizable en el transmisor y fijando las longitudes de onda recibidas en el receptor conocido como *esquema de transmisor sintonizable y receptor sintonizable fijo (TTFR)*. El otro esquema es justamente el inverso del TTFR, es decir la emisión de longitudes de onda se fija en el emisor y es seleccionable en el receptor conocido como *esquema de transmisor sintonizable fijo y receptor sintonizable (FTTR)*. Actualmente, el esquema FTTR es la opción preferida debido a los avances que existen en los láseres sintonizables, su bajo costo y amplio rango de sintonía.

III.5.2. Receptores Sintonizables

Básicamente, los receptores sintonizables pueden clasificarse en dos categorías. La primera en la cual el canal (longitud de onda) es continuamente seleccionado por un filtro óptico sintonizable de entre toda la entrada WDM, y las *señales del canal filtrado son recibidas por un fotodetector entregándolas al receptor electrónico.* (fig. R1a) Para tal caso se puede utilizar por ejemplo un filtro Fabry-Perot, consistente en dos espejos paralelos y altamente reflectivos separados por una capa variable de aire controlado piezoelectricamente.

La segunda clasificación consiste en un demultiplexor pasivo por el cual pasan todos los canales WDM entrantes, y al canal (longitud de onda) es seleccionado electrónicamente. Comparada con la selección óptica, la selección electrónica de canal puede lograrse con control digital por medio de switches electrónicos y el proceso de selección puede llevarse a cabo bastante rápido (en nanosegundos).

Este esquema puede ser utilizado para cubrir otras funciones necesarias en una red. La figura R1b muestra las variaciones del mismo esquema para: arreglo de receptor multilongitud de onda, transmisores sintonizables, arreglo de transmisores multi-longitud de onda y ruteadores de longitud de onda. Para el arreglo de receptores, los canales entrantes son separados por el demultiplexor, y las señales ópticas de cada canal son recibidas por un fotodetector seguido de un amplificador electrónico. Los fotodetectores están arreglados de tal forma que a cada receptor le corresponde un solo canal o longitud de onda. A diferencia del receptor sintonizado, no tiene selección de canal, y todos los canales son recibidos y amplificados. Evidentemente, un receptor multi-longitud de onda puede convertirse en un receptor sintonizable seleccionando el canal a nivel digital después de varias etapas de amplificación.

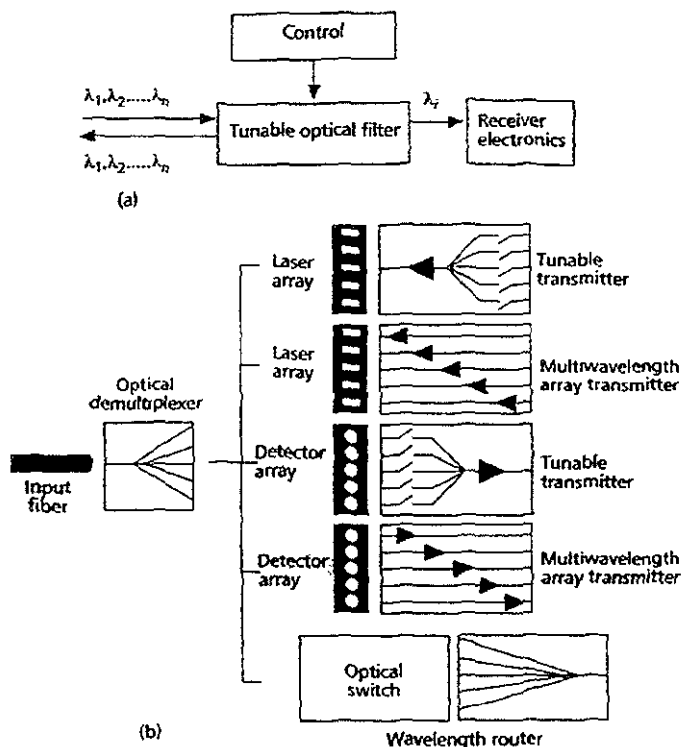


Figura R1. Dos configuraciones de receptores sintonizables para sistemas de multicanalización por división de longitud de onda a) Sintonización Óptica Activa; b) Demultiplexor Óptico Pasivo seguido de un fotoreceptor. El demultiplexor puede también entregar las señales a un arreglo de transmisores multi-longitud de onda, un transmisor sintonizable o un ruteador óptico de longitudes de onda.

Cuando los elementos del arreglo del receptor son reemplazados por amplificadores ópticos con ganancia y utilizando el multiplexor para proporcionar realimentación externa, pueden generarse transmisores sintonizables o transmisores multi-longitud de onda, dependiendo de si todos los arreglos de elementos están activos o sólo uno. Adicionalmente, el mismo demultiplexor puede ser la base de un ruteador óptico colocando bancos de switches ópticos colocados entre el multiplexor y el demultiplexor. En este caso, nos centraremos en los receptores WDM basados en un demultiplexor seguido por fotoreceptores electrónicos, cubriendo ambas categorías: los arreglos de receptores multi-longitud de onda y los receptores sintonizables.

III.5.3. Requerimientos de los Receptores para la Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM)

Los requerimientos de un receptor para WDM varían de acuerdo al tipo de sistema óptico en el que se van a utilizar. Para cualquier sistema de multi-longitud de onda, el receptor debe tener un ancho de banda mayor o igual al rango del espectro de los canales ópticos (longitudes de onda). Con los recientes desarrollos en remover los picos de absorción de la fibra alrededor de los 1.4 a 1.6 micrómetros, el rango del espectro de los receptores WDM es determinado por el ancho de banda utilizable en los amplificadores ópticos del sistema. Esto se debe a que los canales (longitudes de onda) amplificados fuera de la región de ganancia plana producen un desequilibrio entre las ganancias de los canales, y aún es más drástico cuando pasan a través de varios amplificadores EDFA's. El agregar y segregar canales varias veces en varias etapas de amplificadores EDFA's inevitablemente afectará la ganancia de amplificación, produciendo ganancias desiguales para cada canal.

En redes y enlaces de distancias cortas, el espaciamiento entre canales está limitado por el crosstalk entre canales, procedentes de varias fuentes, como puede ser la dispersión producida por los componentes ópticos. La presencia de crosstalk en un sistema degrada la relación señal a ruido en algunas longitudes de onda, y se necesita mayor potencia de la señal para mantener la misma tasa de bits erróneos en el receptor. Sin embargo, en sistemas de Multicanalización por División de Longitudes de Onda de larga distancia, existen varios factores en el degradamiento de la señal además del crosstalk. El efecto de la cuarta longitud de onda mezclada debido a la no-linealidad de la fibra puede degradar críticamente las señales ópticas, y la separación entre canales tiene que ser irregular para evitar traslapes de canales en el espectro con las señales mezcladas producidas.

El tiempo de sintonización requerido en seleccionar un canal depende básicamente en el tipo de red. En una red de conmutación de paquetes el tiempo de sintonización debe ser limitado a una pequeña

fracción del tiempo de cada paquete para mantener una velocidad razonable y eficiente. Para una red basada en tráfico orientado a conexión, el tiempo de sintonización es mucho más flexible.

Los receptores para WDM deben ser compactos, fáciles de controlar, independientes de la polarización, e insensibles a la temperatura. La independencia a la polarización es necesaria ya que las señales ópticas transmitidas predominantemente en una polarización pueden cambiar aleatoriamente de polarización al propagarse por el sistema.

III.5.4. Receptores que utilizan demultiplexores seguidos de fotodetectores

Los Receptores WDM que utilizan demultiplexores seguido por fotodetectores y amplificadores electrónicos pueden ser híbridos o monolíticos. Los receptores híbridos son aquellos en los que el demultiplexor no está integrado con los fotodetectores, y el demultiplexor está construido de un material drásticamente diferente al de los fotodetectores. Los monolíticos son aquellos en los que el demultiplexor y los fotodetectores están hechos en el mismo sustrato y en su caso, pueden incluirse los amplificadores electrónicos.

El receptor híbrido conjunta las ventajas de varias tecnologías para lograr un desempeño óptimo: las tres partes del receptor pueden construirse con diferentes materiales y tecnologías. El demultiplexor puede ser construido con sustrato de SiO_2 . Un demultiplexor de SiO_2 presenta pocas pérdidas por acoplamiento con la fibra debido a que sus dimensiones son similares. Los fotodetectores pueden ser construido de InGaAs sobre sustrato de InP. Aunque el receptor híbrido adopta lo mejor de cada tecnología, el receptor monolítico es una solución atractiva ya que todos los componentes pueden ser fabricados en una plataforma común de InP. El alineamiento de las guías de onda de salida del multiplexor y los detectores es automático, reduciendo las pérdidas por acoplamiento. El demultiplexor puede ser integrado con los amplificadores ópticos, moduladores ópticos, conmutadores ópticos, fotodetectores y receptores electrónicos. El tamaño total de un demultiplexor de InP es menor que aquellos de SiO_2 por el gran contraste en los índices de los materiales del primero, aunque este contraste incrementa el desacoplamiento entre la fibra y la guía de onda aumentando las pérdidas.

III.5.4.1. Fotodetectores para Comunicaciones Ópticas

Los receptores ópticos constituyen uno de los elementos fundamentales en las redes de comunicaciones ópticas; su componente básico es el conversor opto-eléctrico que realiza la conversión del haz lumínico propagado a través de la fibra óptica o señal óptica en una señal eléctrica de datos análoga la presente en la entrada del transmisor óptico

Los receptores ópticos constituyen uno de los elementos fundamentales en las redes de comunicaciones ópticas; su componente básico es el conversor opto-eléctrico que realiza la conversión del haz lumínico propagado a través de la fibra óptica o señal óptica en una señal eléctrica de datos análoga la presente en la entrada del transmisor óptico.

El conversor opto-eléctrico realiza el proceso de la fotodetección que consiste en la conversión de fotones en electrones. Este proceso se realiza mediante el conversor opto-eléctrico y una serie de circuitos adicionales encargados de mantener el nivel de ruido y el ancho de banda necesario para no distorsionar la información presente en la señal.

La señal eléctrica debe seguir las variaciones y transiciones de su homónima óptica, por lo que se hace necesaria la inclusión de un circuito de demodulación del haz lumínico modulado por el transmisor óptico.

La característica fundamental definitoria de un receptor óptico es su margen dinámico.

Se define el margen dinámico de un receptor óptico como el comprendido entre el valor de la mínima potencia óptica presente en la entrada del conversor opto-eléctrico que nos garantiza la obtención de la tasa de error de bit B.E.R. deseada y el valor de la máxima potencia óptica que es capaz de soportar el receptor óptico sin que se produzca variación alguna en la tasa de error de bit B.E.R. prefijada anteriormente. Se trata por tanto de un margen acotado entre dos valores de potencia óptica expresados ambos en unidades de potencia eléctrica dBm o μW y siempre para una B.E.R específica.

La segunda característica fundamental definitoria en un receptor óptico es su sensibilidad. Se define la sensibilidad de un receptor óptico como la mínima potencia óptica presente en la entrada del conversor opto-eléctrico necesaria para obtener una tasa de error de bit deseada. Se expresa en unidades de potencia eléctrica dBm o μW y siempre para una B.E.R específica.

Los elementos o etapas características de un receptor óptico permanecen siempre inalterables con las únicas salvedades del conversor opto-eléctrico con su circuito de polarización asociado y de la utilización en función del sistema de un demodulador para el caso de un sistema analógico o de un decodificador para el caso de un sistema digital.

III.5.4.1.1. Caracterización del Receptor

La caracterización del transmisor se realiza en base a las características que suministra el fabricante del mismo. Los datos necesarios para la caracterización del transmisor son los siguientes.

Cálculo del margen dinámico

El margen de recepción de los equipos que nos garantiza unos valores de la tasa de error de Bit B.E.R. está prefijado por el fabricante de equipo. Las dos cotas que determinan el margen de recepción son, respectivamente, el valor de sensibilidad mínima del receptor y el valor de sensibilidad máxima del mismo. Ambos valores se expresan en microwatts y su conversión a dBm, se realiza con la siguiente expresión matemática:

$$P(\text{dBm}) = \left[\frac{10 \log P(\mu\text{W})}{1000(\mu\text{W})} \right]$$

Ancho de banda del receptor

Este dato lo suministra directamente el fabricante del equipo, siempre se facilita en unidades eléctricas y tan solo habrá que cerciorarse de que las unidades del ancho de banda se exprese en MHz.

En el caso del Experimento propuesto para WDM se analizarán algunos de las características del analizador de espectros que puedan ser aplicables a un receptor WDM.

El analizador de espectros puede ser visto como un receptor en el cual existe un demultiplexor óptico que canaliza las diferentes longitudes de onda (componentes espectrales) hacia un arreglo de fotodetectores en el interior del analizador de espectros.

Un detector óptico produce un voltaje de salida que es, idealmente, proporcional a la potencia óptica de entrada. Es un "detector cuadrático", ya que la potencia, que es proporcional al cuadrado del voltaje, se convierte en un voltaje. Las variaciones en amplitud, o envolvente, de la señal óptica modulada pueden ser detectadas exactamente, este tipo de operación puede aplicarse para ambas detecciones coherentes y directas

El receptor de un sistema de comunicaciones ópticas incorpora uno o varios detectores ópticos que deben tener las siguientes cualidades

- Alta sensibilidad (debe ajustarse lo mejor posible a la longitud de onda de la fuente óptica)
- Ruido adicional mínimo
- Alta velocidad de respuesta
- Insensibilidad de sus características a condiciones externas
- Poco consumo de voltaje
- Tamaño reducido
- Bajo costo

III.5.4.1.2. Características de los fotodetectores

Algunas de las principales características de los fotodetectores son:

Respuesta Espectral La fotocorriente producida por un nivel dado de luz incidente varía con la longitud de onda de la luz. Esta relación entre la longitud de onda y su respuesta es conocida como la respuesta espectral, y se expresa numéricamente en términos de sensibilidad radiante, eficiencia cuántica, NEP, detectividad, etc.

Aplicable: debido a que abarca varios parámetros del Fotodetector y que esta ligado con la longitud de onda, se tomará como el principal parámetro para determinar la longitud de onda a la que están trabajando las fuentes de luz. Y las demás componentes espectrales se trataran como el ancho de banda de cada fuente con sus respectivos efectos mutuos.

Sensitividad Radiante o Resposensibilidad. Esta medida de sensibilidad es la relación de la energía radiante incidente en el dispositivo, expresada en Watts, con respecto a la corriente de salida en Amperes. Puede ser expresada como una sensibilidad absoluta (A/W), o como una sensibilidad relativa, normalizada con respecto a la sensibilidad pico que se tiene para una determinada longitud de onda cuyo valor pico usualmente se toma como 100.

Aplicable: Al igual que la respuesta espectral se determinaría cual es la longitud de onda donde se tiene mayor sensibilidad radiante. Y una vez determinado el 100% se podría determinar los voltajes de modulación así como el rango de decisión de la señal en el caso de ser digital. Además la sensibilidad radiante y la eficiencia cuántica determinan la capacidad de un fotodetector de detectar la luz a cierta longitud de onda.

Eficiencia Cuántica. Es la relación del número de fotones incidentes a los fotodetectores resultantes en la corriente de salida, sin tener en consideración los niveles de energía individuales de los fotones, resultando en una curva de respuesta espectral ligeramente diferente a la de sensibilidad radiante.

Aplicable: Al ser uno de los parámetros más importantes que determinan la habilidad de un fotodiodo para detectar la luz a cierta longitud de onda

NEP (Noise Equivalent Power - Energía de Ruido Equivalente). Es la cantidad de luz equivalente al nivel de ruido intrínseco del dispositivo. Es decir, el nivel de luz requerido para obtener una relación S/N de 1. El NEP es uno de los medios de expresar la respuesta espectral. En este contexto, se utiliza el valor de NEP a la longitud de onda donde se tiene la máxima respuesta

Como el nivel de ruido es proporcional a la raíz cuadrada del ancho de banda, el NEP se expresa en unidades de $W/Hz^{1/2}$.

$$NEP = \frac{\text{Corriente de ruido} (A / Hz^{1/2})}{\text{Sensibilidad Radiante Pico} (A/W)}$$

Aplicable: en vista de que es un medio para expresar la respuesta espectral. Además de que involucra uno de los principales elementos en el funcionamiento de un sistema de comunicaciones ópticas, la relación señal a ruido.

Detectividad. Es el inverso de NEP y se utiliza como una medida de la sensibilidad de detección de un dispositivo.

No Aplicable: de nueva cuenta solamente tiene que ver con la eficiencia del Fotodetector.

Corriente de Corto Circuito.

No aplicable

Corriente de Oscuridad (Id). La corriente de oscuridad es aquella corriente que fluye cuando se aplica un voltaje de polarización inversa al fotodiodo bajo condiciones de oscuridad

Aplicable: debido a que se debe tomar en cuenta la corriente de oscuridad para establecer nuestros valores mínimos así como el rango de trabajo de la señal, sobretodo para no tener problemas con los ceros de una transmisión digital.

Capacitancia de la unión (cj).

No aplicable

Tiempo de Subida (Tr). Es el tiempo requerido desde que se encuentra al 10% de su valor final hasta el 90% de su valor final de la señal de salida del Fotodetector. Es una medida de la respuesta de un fotodiodo al impulso de luz. El tiempo de levantamiento es una función de la longitud de onda de la luz incidente y frecuentemente es utilizada para los fotodiodos PIN.

Aplicable: en vista de que es el tiempo que tarda en responder nuestro fotodetector es de gran importancia para determinar la máxima velocidad de conmutación (tasa de transmisión) que podría soportar nuestro receptor

Máximo Voltaje Inverso

No aplicable

Se puede lograr un receptor híbrido de diferentes maneras:

III.5.4.2. Micro-óptica

Los demultiplexores Micro-ópticos se basan en la difracción y reflexión de las ondas ópticas en la mayor parte de los componentes. Dos de los multiplexores disponibles actualmente más utilizados son: el basado en filtro por interferencia y los de tipo de rejillas de reflexión. Como lo podemos observar en la Fig. R2a, los canales entrantes son colimados por unos lentes y pasan a través de varios filtros por interferencia en donde los canales serán separados. Una lente de fibra será utilizada para recolectar la longitud de onda filtrada a la salida de cada filtro de interferencia. Aunque este tipo de filtros tiene una inserción de pérdidas de -3 db y un crosstalk bajo de menos de -30dB, no puede ser escalado para soportar sistemas de Multicanalización por división de Longitudes de Onda Densos (DWDM) debido a que la inserción de pérdidas aumenta proporcionalmente con el número de canales, en la tabla R se muestran las propiedades de los multiplexores.

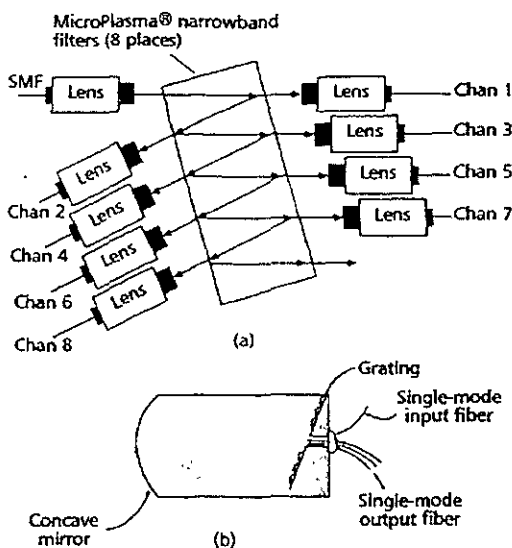


Figura R2. Tipos de Demultiplexores Micro-ópticos:
a) de filtros por interferencia y b) de rejillas de reflexión

La figura R2b muestra un diagrama del demultiplexor basado en rejillas de reflexión. Como se puede observar, el flujo óptico de las fibras entrantes experimenta la difracción en el espacio libre hasta llegar al espejo cóncavo. El espejo refleja y colima el haz expandido hacia una rejilla

reflectiva y dispersiva donde las longitudes de onda (canales) entrantes son separadas. La segunda reflexión del espejo cóncavo envía las longitudes de onda filtradas hacia diferentes fibras de salida. Estos dispositivos tienen un nivel excelente de crosstalk con una pérdida por reflexión y dispersión de 6 dB. Los demultiplexores comerciales incluyen enfriadores termoeléctricos para estabilizar la temperatura de los componentes. A pesar de que los dispositivos micro-ópticos muestran un excelente desempeño, requieren gran cuidado en cuanto al alineamiento óptico, además de que los procesos de manufactura automáticos son muy difíciles de lograr.

Tipo	Filtro por Interferenc	Rejillas		SiO ₂	InP	SiO ₂	InP
N	4 - 8	4 - 41	8	50,128	42	4 - 32	64
$\Delta\lambda$ (nm)	1.6	1 - 16	0.4	0.8-1	4	0.8-2.0	0.4
x-talk (dB)	< -30	< -30-50	< -25	< -30	< -7	< -22	~ 20
Inserción pérdidas(dB)	< 3-4	< 3	7.5	14	~ 14	7-9	15
Pérdidas Ret (Db)	> 40-55	30	?	?	?	40	?
Desviación (nm/C)	0.004	0.0012	-0.015	0.015	-0.1	0.015	-0.1
Dependencia de Polarizac	< 0.1 dB	95 %	?	4 - 7 dB	?	0.3 dB	~ 2 dB
Fabricantes / Centros de Inv	OCA	Jobin-Yvon	E-Tek	IBM	Bellcore	PIRI	NTT

Tabla R. Comparación del desempeño de varios tipos de demultiplexores de algunos proveedores y grupos de investigación

III.5.5. Demultiplexores de Fibras con Rejillas de Bragg

Las fibras con rejillas de Bragg (FBG) consisten en modular el índice óptico periódicamente a lo largo de la fibra óptica, para generar una reflexión distribuida de las señales ópticas de las longitudes de onda relacionadas con el periodo de las rejillas. Las rejillas de Bragg son versátiles por lo que son de gran utilidad en las redes ópticas, especialmente combinados con otros componentes ópticos y electrónicos. Las FBG pueden utilizarse para compensar la dispersión de la fibra, aplanar la ganancia de los EDFA's, supervisión y control, agregar y segregar canales, entre otras aplicaciones.

Las formas básicas de demultiplexación de longitudes de onda utilizando FBG se muestran en la figura R3. El demultiplexor de la figura R3a se compone de un interferómetro de fibra Mach Zender con fibras con rejillas de Bragg idénticas en los brazos del interferómetro. Las rejillas de Bragg con longitud de onda central λ_3 provocan que la longitud de onda entrante λ_3 salga por la fibra 2. Las $N-1$ longitudes de onda restantes saldrán por la fibra 4, mientras que la fibra 3 se puede utilizar para agregar un canal sobre λ_3 , o dejarlo vacío. Para demultiplexar los N canales de entrada, se requieren N etapas en cascada, donde la salida 4 de una primer etapa se conecte a la fibra 1 de entrada de la etapa sucesiva. Para un funcionamiento óptimo de un sistema de este tipo se requiere un acoplador perfecto de -3 dB. La figura R3b muestra otro esquema de demultiplexación de una sola etapa, con un FBG colocado entre dos circuladores. Similarmente a la fig. R3a, la fibra 1 es la entrada, la fibra 2 es para segregar canales, la fibra 4 es para agregarlos, y las restantes $N-1$ longitudes de onda salen por la fibra 3. Colocar rejillas de Bragg en una guía de onda de SiO_2 tiene muchas ventajas. No sólo se puede controlar con precisión la diferencia de longitud de trayectoria en los brazos del interferómetro, sino que el procesamiento de la guía de onda permite una producción masiva, lo que significa bajos costos potenciales en los componentes. Como los componentes son totalmente de fibra, el desempeño del multiplexor puede afectarse severamente con los cambios de temperatura, además de la presión y el desgaste provocados por el medio; aunque se puede resolver con un empaquetamiento avanzado de FBG con un corrimiento de $\sim 10^{-4}$ A/°C. Sin dicha compensación, el desplazamiento de longitudes de onda atenuaría sensiblemente la potencia de los canales, y provocaría crosstalk en las longitudes de onda vecinas

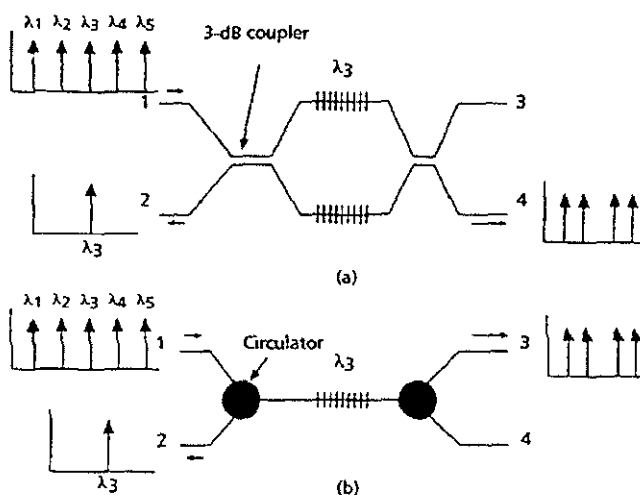


Figura R3. Dos configuraciones de demultiplexores utilizando fibras con Rejillas de Bragg

III.5.6. Rejillas Acanaladas y Arreglos de guías de onda con rejillas

Tanto las rejillas acanaladas como los arreglos de guías de onda con rejillas (AWG, también conocidas como PHASAR o ruteador de rejillas) son espectrómetros ópticos que operan de manera similar. Ambos multiplexores son equipos en los que los campos electromagnéticos de las longitudes de onda entrantes son imitados en las guías de onda de salida por elementos dispersivos. Para las rejillas acanaladas, el enfoque necesario y las funciones de dispersión se logran por los dientes de rejillas acanaladas verticales. Para los AWG, la dispersión se logra con arreglos de guías de onda donde cada elemento del arreglo tiene una diferencia de longitud de trayectoria equivalente a un múltiplo entero de la longitud de onda correspondiente a la longitud de onda central del multiplexor.

III.5.6.1. Rejillas Acanaladas

El principio de operación de las rejillas acanaladas es muy parecido al de los espectrómetros, sólo que la propagación de las ondas ópticas esta confinada a dos planos dimensionales por las estructuras de las guías de onda. En estos dispositivos los dientes de las rejillas están sobre la circunferencia de un círculo, mientras que las salidas están enfocadas a lo largo de otra circunferencia con la mitad del diámetro del primer círculo. Todas las longitudes de onda en la guía de onda incidente experimentan una expansión y alcanzan los dientes de las rejillas en la parte final de la región plana de la guía de onda. Las longitudes de onda primeramente son separadas por las rejillas dispersoras y luego guiadas a su correspondiente guía de onda de salida por medio de la reflexión de la misma rejilla curvada. La salida tipo abanico de las guías de onda debe corresponder al espaciamiento entre fotodetectores.

Las rejillas reflectivas se obtienen con los dientes en el SiO_2 externo gracias a la técnica de acanalado en seco, generando una interfase abrupta de aire en el material. La superficie de la rejilla debe ser cubierta con un recubrimiento altamente reflexivo para lograr la reflexión necesaria. El desempeño de las rejillas acanaladas se muestra también en la tabla R.

III.5.6.2. Arreglos de Guías de Onda con rejillas: AWG, PHASAR o ruteador de rejillas

Los Arreglos de Guías de Onda con rejillas (AWG) son dispositivos poderosos ya que, no sólo tienen la función de demultiplexar, sino que sus características de ruteo también permiten controlar y agregar-segregar longitudes de onda (canales), funciones indispensable en las redes con ruteo óptico. Recientemente los laboratorios de AT&T en conjunto con la Universidad Delf incursionaron en la aplicación de AWG como demultiplexores ópticos.

La figura R4 muestra el diseño de un arreglo de guías de onda con rejillas que consiste en varias guías de onda de entrada y salida, zonas de entrada y salida o regiones de propagación libre conectados por arreglos de guías.

Su principio de operación se basa en los retardos de fase que se producen en cada longitud de onda (canal). En la guía de onda de entrada, el haz con los diferentes canales es acoplado a la región de propagación libre de entrada, donde pueden difractarse libremente. El haz divergente incide al final de la zona de propagación libre y entra un arreglo de guías de onda, las cuales son más anchas en la entrada (tipo embudo) para mejorar la eficiencia en el acoplamiento. El arreglo de guías de onda introduce retardos de fase dependientes de la longitud de onda y proporciona una onda convergente en la zona de salida, donde se acopla a varias guías de onda. Se debe enfatizar que existirán permutas de canales en las guías de onda de salida si se utiliza otra guía de onda de entrada. Aunque existe varias opciones para eliminar la dependencia a la polarización, el desarrollado por los investigadores de NTT consistente en insertar un plato de media onda en el dispositivo es muy eficaz. Para eliminar la distorsión por temperatura, el AWG se estabiliza con un enfriador eléctrico. También existen AWG con respuesta plana en el espectro facilitando así el control de las longitudes de onda.

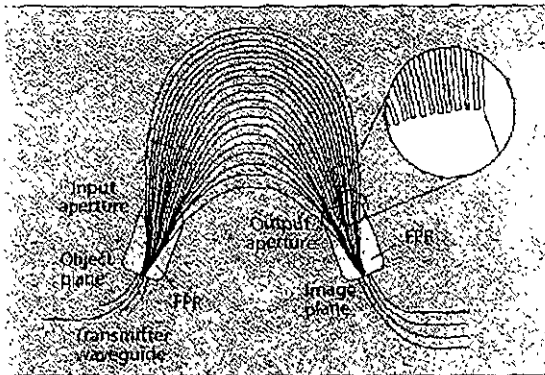


Figura R4. Esquema de un multiplexor por medio de un Arreglo de guías de onda con rejillas.

III.5.7. Receptor Híbrido Integrado

El método utilizado para un receptor híbrido integrado asume que los fotodetectores del demultiplexor, los fotodetectores, y otros receptores electrónicos están fabricados con materiales y tecnologías diferentes. El nivel de integración híbrido puede ser muy grande, y puede incluir pre o post amplificadores, ecualizadores, recuperadores de datos y de reloj, y capacitores desacopladores, resultando en un módulo multichip. La opción más popular para el arreglo de fotodetectores es un arreglo de diodos pín de InGaAs. El InGaAs se utiliza por su acoplamiento con las longitudes de

onda, y los fotodetectores construidos de este material tiene una corriente de oscuridad baja. Así mismo, la configuración pin ofrece mejor responsabilidad que otras configuraciones de detectores, además de que la tecnología para arreglos de fotodiodos de avalancha todavía no esta disponible.

Para el amplificador electrónico de la primera etapa, la configuración comúnmente adoptada es la configuración de un amplificador de transimpedancia que puede ser realizado con tecnologías de silicio o GaAs.

Existen pocos receptores WDM híbridos integrados sin embargo podemos analizar el receptor sintonizable para 32 canales de IBM. El receptor está diseñado para tasas de bits menores a 1 Gb/s en una red WDM metropolitana de conmutación de paquetes ($\Delta\lambda=100$ GHz) con un gran número de nodos y es capaz de seleccionar una de los 32 canales en ~ 40 ns. La figura R5 muestra un esquema del módulo. Cada longitud de onda puede operar hasta con 700 Mb/s. El receptor utiliza un arreglo de guías de onda AWG de SiO₂/Si con control de temperatura como demultiplexor óptico, y un arreglo de fotodiodos pin de InGaAs seguido por un amplificador de GaAs integrado con un conmutador MESFET en dos etapas para seleccionar el canal. Para soportar varios canales, cada grupo de cuatro fotodetectores esta conectada a un amplificador y cuatro switches. Los conmutadores (switches) también están implementados en las salidas de los amplificadores logrando seleccionar sólo una longitud de onda (canal). Para minimizar el crosstalk, se implementan ranuras entre los ánodos y cátodos, y entre los grupos de diodos pin para aislarlos eléctricamente. Tener baja tasa de datos permite utilizar una gran área de fotodetector, ofreciendo mayor tolerancia en la alineación de las guías de onda de los AWG y los fotodetectores. El empaquetamiento electrónico emplea la tecnología de interconexión de alta densidad (HDI) desarrollada por GE en la cual el arreglo de detectores, amplificadores y capacitores están todos empaquetados en un substrato cerámico. Para tasas de datos mayores se necesitarán fotodetectores más pequeños, reduciendo la tolerancia de alineación óptica o incrementando la complejidad del empaquetamiento óptico. Este tipo de receptor es adecuado para tasas de transmisión hasta 1 Gb/s. Para tasas de transmisión mayores se puede utilizar el método del receptor monolítico integrado.

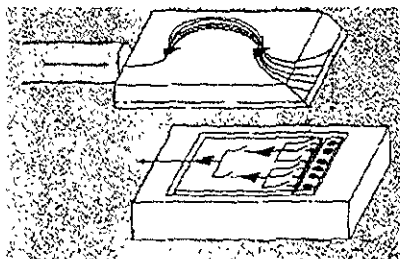


Figura R5. Esquema de un receptor WDM

III.5.8. Receptor Monolítico Integrado

Existen varios niveles de integración monolítica para receptores WDM. La integración del multiplexor con los fotodetectores, y con amplificadores ópticos o pre-amplificadores electrónicos se puede realizar en un sustrato común. En la actualidad existen receptores de ocho canales multi-longitud de onda en los cuales el arreglo AWG, los fotodetectores y el pre-amplificador están totalmente integrados. El acoplamiento del haz de las guías de onda con los detectores se basa en un acoplamiento de campo evanescente, y tiene implementada una capa aislante entre los detectores para minimizar el crosstalk. El tamaño de los detectores representa un dilema: un detector mas grande mejora la absorción pero reduce el ancho de banda al aumentar la capacitancia. Aun así se pueden manejar tasas de 2.5 Gb/s con un crosstalk entre canales de -15 dB y se pueden utilizar arreglos AWG independientes de la polarización. En la actualidad se llevan a cabo investigaciones para la integración monolítica de receptores electrónicos sin demultiplexor óptico

III.6. CONCLUSIONES

El constante crecimiento en la demanda de ancho de banda para comunicaciones no puede ser cubierta por la infraestructura existente, que esta basada en gran parte en cobre y fibra optica con una sola longitud de onda. Especialmente para los servicios futuros de Internet, donde datos de video y voz interactivos junto con archivos de gran tamaño deberán ser transportados a grandes distancias, el Acceso por división de longitud de onda (WDMA) es probablemente la técnica mas poderosa disponible para lograr aprovechar el enorme ancho de banda de la fibra tendida en las redes ópticas existentes. La próxima generación de los sistemas de comunicación de alta velocidad necesariamente tendrán que satisfacer los requerimientos de aplicaciones tales como acceso a Internet, videoconferencias de alta calidad y el tráfico de multimedia. La Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) ha evolucionado y actualmente puede utilizarse en todos los niveles de una red. Dado que en un sistema WDM cada canal esta relacionado con una longitud de onda distinta, la manipulación de los canales y particularmente la selección de cada canal requiere de una selección óptica de cada longitud de onda. Los filtros ópticos han sido la tecnología que ha permitido incrementar la capacidad de los sistemas de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) ya que, por conveniencia, esta tecnología coloca varias longitudes de onda muy cercanas dentro de una fibra, con lo que las redes pueden crecer fácilmente aumentando longitudes de onda sin necesidad de tender nueva fibra. Sin embargo, para combinar (multiplexar) o separar (demultiplexar) estas señales espaciadas estrechamente en la fibra, se requieren filtros opticos con

características de aislamiento espectral extremadamente precisas. Como se mencionó, los filtros de Rejillas de Bragg cumplen con estos requisitos. Las Rejillas de Bragg han sido piezas fundamentales en el desarrollo no sólo de los filtros ópticos sino de prácticamente todos los componentes de las redes fotónicas actuales.

La posibilidad de separar las señales ópticas ya sea para su recepción, redireccionamiento, amplificación, adición o derivación es un factor que convierte a la técnica de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) en una tecnología muy atractiva tanto para portadores de largas distancias como a prestadores de servicios de área metropolitana o local. Los demultiplexores ópticos así como los receptores ópticos permiten manejar y seleccionar los canales que viajan en la fibra lo que permite a los fotodetectores recibir la información contenida en cada longitud de onda. Como hemos podido observar los Sistemas de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) tienden cada vez más a utilizar elementos completamente ópticos disminuyendo así exponencialmente el tiempo necesario para el procesamiento de los datos que viajan en los canales ópticos.

Después de haber analizado la tendencia, el avance y el potencial de la Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) podemos observar fácilmente que los sistemas WDM son la tecnología más poderosa en cuanto capacidad de transporte de datos se refiere. Por lo tanto, es indispensable que los futuros Ingenieros especializados en Telecomunicaciones conozcan y comprendan los principios de funcionamiento de los sistemas WDM. En los siguientes capítulos se expone una propuesta de experimento para Laboratorio Docente del Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la UNAM.

PROPUESTA PARA EL EXPERIMENTO DE RECEPTOR ÓPTICO DE MULTICANALIZACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA (WDM) PARA LABORATORIO DOCENTE

CAPITULO IV

IV.1 OPCIONES FUNDAMENTALES PARA LA ELABORACIÓN DE LA PROPUESTA

En un principio se analizaran las opciones para la propuesta del experimento:

IV.1.1 Opción con una fuente

Experimento con una fuente de luz (emisor) y un analizador de espectro (receptor) que se encuentra en el departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería.

IV.1.1.1. Descripción General

Con ayuda de una fuente de luz, ya sea un LED o bien un Láser, conectores ópticos, fibra óptica y un analizador de espectros, se propone llevar a cabo una simulación de una transmisión óptica en la que se describiría el concepto básico en el que se fundamenta la técnica WDM (Multicanalización por División de Longitud de Onda); es decir, que varias longitudes de onda (componentes espectrales) pueden viajar por un mismo medio (fibra óptica) al mismo tiempo y que con el tratamiento adecuado cada una de estas longitudes de onda puede servir como un canal independiente de transmisión de información.

IV.1.1.2. Desarrollo:

Se planea conectar el sistema completo: fuentes de luz, multiplexor, fibra óptica y analizador de espectro. Luego se interpondrán materiales translúcidos para modificar la señal recibida.

Una vez acoplado el sistema, se observarán las componentes espectrales de la fuente y se determinarán las características aplicables a un emisor WDM.

Por otro lado se analizarán las señales recibidas por el analizador de espectro que sean aplicables a un receptor WDM.

Adicionalmente, con ayuda de los espectrogramas se explicará teóricamente la base de un sistema WDM, mostrando que cada componente espectral podría ser un canal de transmisión independiente. Así mismo, se haría una comparación entre las distintas etapas que se llevan a cabo en un sistema real.

Etapas:

Fase en Experimento	Etapas en un Sistema Real
Fuente de Luz	Emisión de distintas longitudes de onda utilizando Láseres.
Conector	Acoplador
Fibra óptica	Tendido de Fibra óptica de larga distancia
Laminas	Filtros Ópticos
Analizador de Espectro	Receptor

Teóricamente se expondrá la utilidad de los principales elementos que generalmente se incluyen en un sistema WDM (Amplificadores, elementos Add/Drop, filtros, etc.)

IV.1.2. Opción con dos fuentes

Experimento con dos fuentes de luz de distintas frecuencias (emisor) y un analizador de espectro (receptor) que se encuentren en el Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería.

IV.1.2.1. Descripción General

Con ayuda de dos fuentes de luz de distintos colores (componentes espectrales), LED s o láseres, conectores ópticos, un acoplador o mezclador de haz, fibra óptica y un analizador de espectros, se propone llevar a cabo una simulación de una transmisión óptica en la que se describiría el concepto básico en el que se fundamenta la técnica WDM (Multicanalización por División de Longitud de Onda); es decir, que varias longitudes de onda (componentes espectrales), pueden viajar por un mismo medio (fibra óptica) al mismo tiempo y que con el tratamiento adecuado cada una de estas longitudes de onda, en este caso fuentes de luz, puede servir como un canal independiente de transmisión de información.

Esta propuesta sería más ilustrativa, ya que se podría observar de una manera más cercana a la realidad como funciona un sistema WDM.

IV.1.2.2. Desarrollo

Se planea conectar el sistema completo: fuentes de luz, acoplador (en su caso), fibra óptica y analizador de espectro. Posteriormente, se interpondrán materiales translucidos durante la trayectoria para modificar la señal recibida y observar su efecto.

Una vez acoplado el sistema, se observarán las componentes espectrales de cada fuente por separado y posteriormente de ambas y se determinarán las características aplicables a un emisor WDM.

Por otro lado se analizarán las señales recibidas por el analizador de espectro que sean aplicables a un receptor WDM.

Posteriormente, ya sea con un generador de funciones, o bien apagando y encendiendo cualquiera de las fuentes, se demostraría que las dos señales provenientes de las distintas fuentes pueden viajar independientemente a través de una misma fibra óptica al mismo tiempo, lo que permite aprovechar eficazmente la capacidad de una fibra óptica logrando transmisiones a gran escala.

Etapas:

Fase en Experimento	Etapas en un Sistema Real
Fuentes de Luz	Emisión de distintas longitudes de onda utilizando Láseres.
Acoplador o mezclador de haz	Multiplexor
Fibra óptica	Tendido de Fibra óptica de larga distancia
Filtros	Demultiplexor
Analizador de Espectro	Receptor

Adicionalmente, con ayuda de los espectrogramas se podrían exponer algunos de los efectos que se presentan en WDM debido a su naturaleza, y como se han manejado en los sistemas actuales WDM

Teóricamente se expondría la utilidad de los principales elementos que generalmente se incluyen en un sistema WDM (Amplificadores, elementos Add/Drop, filtros, etc.)

IV.2. ELEMENTOS DISPONIBLES EN EL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

El experimento propuesto debía ser implementado utilizando principalmente el material y las herramientas disponibles en el Laboratorio del Departamento. Con la finalidad de proponer y planear los experimentos a realizar fue necesario conocer el equipo de laboratorio existente.

IV.2.1. Espectrofotómetro

Para poder realizar un análisis de intensidad y longitud de onda de una fuente luminiscente se cuenta con un espectrofotómetro de Ocean Optics el cual tiene las siguientes características:

- Tarjeta de PC
- Rango: 400 nm a 800 nm
- Fuente de tungsteno-halógeno
- Cable de fibra óptica 100 μm
- Software *FullWave*

IV.2.1.1. Software y Hardware

Las especificaciones de la PC necesarias para que el software funcione adecuadamente son 386 DX o mayor y Windows 3.1 o Windows 95. Inicialmente la tarjeta del espectrofotómetro, así como el software se instalaron en una PC 486 con Windows 95 que nos asignó el Departamento de Telecomunicaciones. Se intentó medir la intensidad de la lámpara de tungsteno-halógeno, pero la computadora no arrojó ningún resultado. Para probar si era la computadora o el espectrofotómetro lo que no funcionaba correctamente, se instaló nuevamente en una PC Pentium @ 100 MHz que se encuentra en el laboratorio de electromagnetismo. Realizamos nuevamente la medición de la fuente de tungsteno-halógeno y esta vez si se pudo observar el espectro de dicha fuente, el cual cubre todo el rango del espectrofotómetro

Debido a que en la PC 486 se observaba la pantalla del software pero no el espectro de la fuente se dedujo que probablemente la velocidad de tal computadora no era suficiente. Por lo tanto, se recomienda utilizar una computadora que tenga las características citadas

IV.2.1.2. Manejo de las funciones

Para utilizar adecuadamente el espectrofotómetro, se leyó el manual del que viene acompañado y se aprendió a utilizar las funciones del mismo. El manual se incluye al final de esta obra a manera de anexo.

En el software Full Wave se pueden realizar tres tipos de experimentos: Absorción, Cinética y emisión.

En nuestro caso la toma de medida de la emisión de una fuente es lo que nos interesa. Esta es una función que muestra las distintas longitudes de onda que emite una fuente de radiación que se encuentra en el rango de los 400-900 nm. Para llevar a cabo esta medición se necesita la fuente que se va a medir, el cable de fibra óptica y un dispositivo para acoplar los dos elementos anteriores. Esta medida se toma dándole clic a la opción de *emission* que aparece en la pantalla del espectrofotómetro. El software inmediatamente comienza a adquirir datos.

Después de algunos segundos el espectrofotómetro muestra un espectro, y se pueden identificar distintas longitudes de onda e intensidades colocando el mouse en la posición deseada.

Otras de las funciones que posee el espectrofotómetro son las siguientes:

- *Salvar espectros (Save)*. Permite guardar en memoria distintos espectros
- *Superposición de espectros (overlay Spectra)*. Esta función permite que el usuario pueda almacenar y comparar varios espectros a la vez.
- *Suaviza líneas (Smoothing)*. Esta función suaviza las curvas del espectro adquirido.
- *Tiempo de Integración (Integration Time)*: Esta función permite cambiar el tiempo de integración, el cual se refiere al tiempo en el que se detecta y procesa la luz que incide sobre cada pixel en el arreglo y varía de 8 a 4000 milisegundos.

IV.2.2. Sistemas Ópticos (Lentes)

Posteriormente al estudio y manejo del espectrofotómetro se procedió a recolectar las lentes existentes en el Laboratorio. Las lentes disponibles fueron caracterizadas. Las lentes fueron medidas milimétricamente con ayuda de una regla Vernier y se determinó la distancia focal de cada uno de ellos. Para obtener la distancia focal se empleó el concepto de distancia focal que dicta que la distancia focal de una lente convergente es el punto donde los rayos paralelos incidentes convergen, por lo utilizando una fuente lo suficientemente lejana se midió la distancia entre la posición de la

lente y el punto donde la imagen de la fuente se hacia puntual. Este concepto es expuesto más ampliamente en el anexo del documento.

Descripción de las lentes:

Lente	Diámetro	Distancia Focal	Base
L ₁	10 mm	25 mm	Si
L ₂	10 mm	25 mm	Si
L ₃	11 mm	30 mm	Si
L ₄	9 mm	9 mm	No
L ₄	9 mm	9 mm	No

Las lentes L₁, L₂ y L₃ fueron seleccionadas ya que al tener una distancia focal mayor los elementos se pueden colocar mas espaciados lo cual es necesario para maniobrar y colocar los materiales translucidos así como las fuentes que se vayan a utilizar.

IV.2.3. Cubo divisor de haz

En el Departamento se consiguió un divisor óptico de haz. Un dispositivo que permite el paso del 50% de la potencia incidente en alguno de sus extremos reflejando perpendicularmente (90°) el resto de la potencia. En otras palabras, un haz de luz es dividido en dos, uno que se mantiene paralelo al haz incidente y otro que es reflejado 90° respecto al haz original. Esto sucede en cualquiera de sus extremos excepto la base y su cara superior.

El divisor de haz consiste en un cubo simétrico de vidrio, de 23mm x 23 mm cada cara, el cual esta formado por dos prismas unidos con un espejo semireflector entre ambos.

IV.2.4. Acoplador X de fibra óptica

El acoplador de fibra óptica es un dispositivo que permite combinar la potencia de dos señales procedentes de dos fibras. El acoplador X es un dispositivo construido con dos fibras opticas las cuales, ya sea por fusión o por pulido, se unen los núcleos y se mezclan sus cargas formando un solo haz el cual se propaga en los extremos de la fibra (salidas). Generalmente, en cada salida encontramos un haz combinado con la mitad de la potencia de la suma de los haces incidentes. En este caso las fibras son multimodo de 50µm y en tres de sus cuatro extremos están colocados conectores estandar. El acoplador tener una o dos salidas, dependiendo de su configuración Y o X, en las cuales se distribuye la potencia del haz combinado. El acoplador disponible es de tipo X por lo que se distribuye el haz combinado equitativamente en las dos salidas.

Las especificaciones del Acoplador X son:

Longitud de Onda central de operación	850 nm
Tipo de fibra	50 / 125 μ m
Relación de acoplamiento (P_3/P_4), %	47.80 %
Pérdidas por Inserción (P_3/P_2), dB	3.40 / 3.78 dB
Directividad (dB)	40 dB
Estabilidad térmica	0.2 dB

IV.2.5. Filtros

En el Departamento existen filtros pasobanda de diferentes colores (longitudes de onda) dentro del espectro visible. Los filtros son laminas circulares de plástico semitransparente que permiten el paso de cierta banda y atenúan sensiblemente las demás bandas. Los filtros fueron probados con ayuda de la fuente de halógeno-tungsteno ya que su espectro abarca prácticamente todo el rango visible y del espectrofotómetro. Para obtener la respuesta de los filtros se tomo una medida patrón que corresponde a la emisión de la fuente de halógeno sin ningún tipo de filtro.

Los filtros disponibles en el Departamento son:

- *Filtro paso banda Amarillo*
- *Filtro paso banda Azul*
- *Filtro aplanador de espectro* (Realiza la función de aplanar el espectro de emisión de una fuente de luz blanca. Es decir, atenúa las frecuencias con mayor potencia mientras que las señales débiles permanecen prácticamente iguales)
- *Filtro paso banda Verde*
- *Filtro paso banda Rojo*

Posteriormente, se tomaron registros del espectro correspondiente a la emisión de la fuente a través de un filtro. Las características de atenuación y transmisión de los filtros se muestran a continuación

Figura P1. Espectro de la fuente de Halógeno-Tungsteno

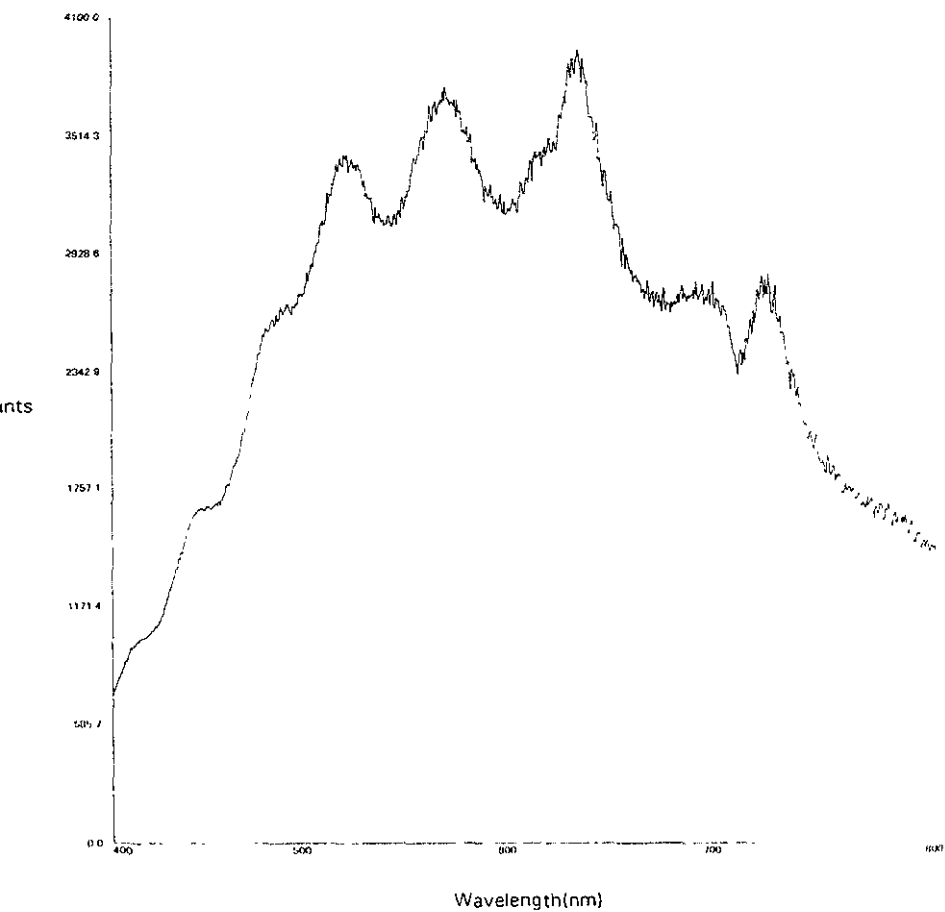


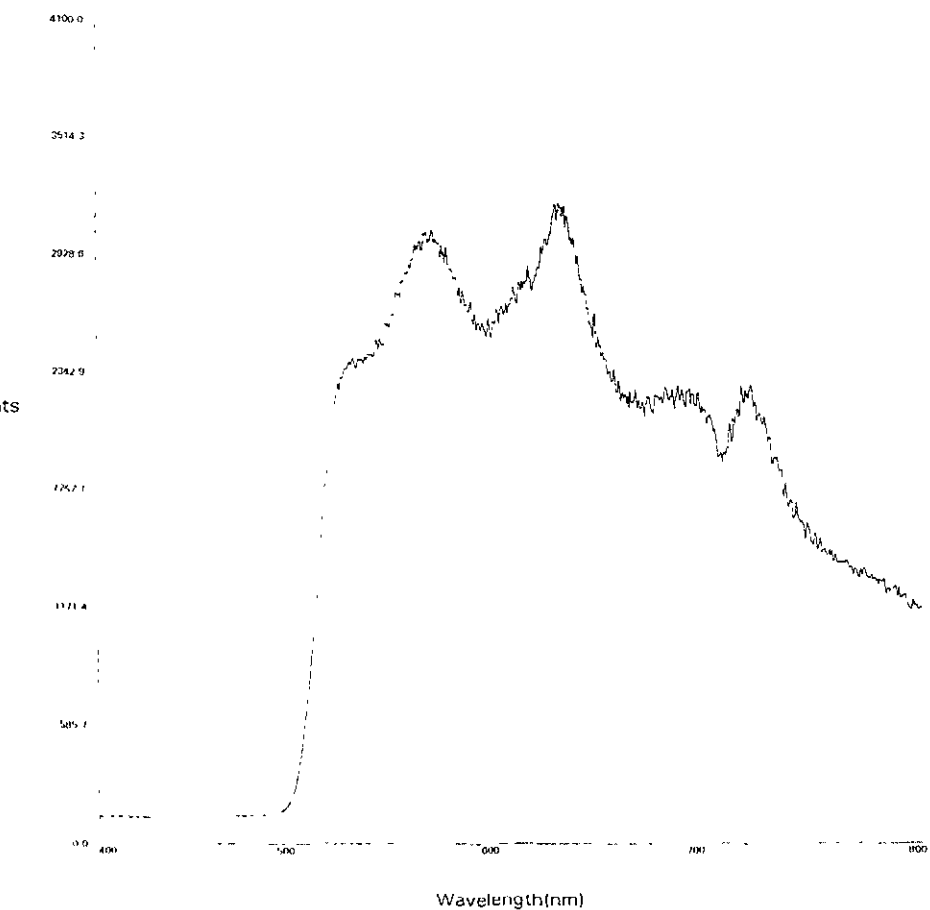
Figura P2. Espectro de la fuente con filtro paso banda Amarillo

Figura P3. Espectro de la fuente con filtro paso banda Azul

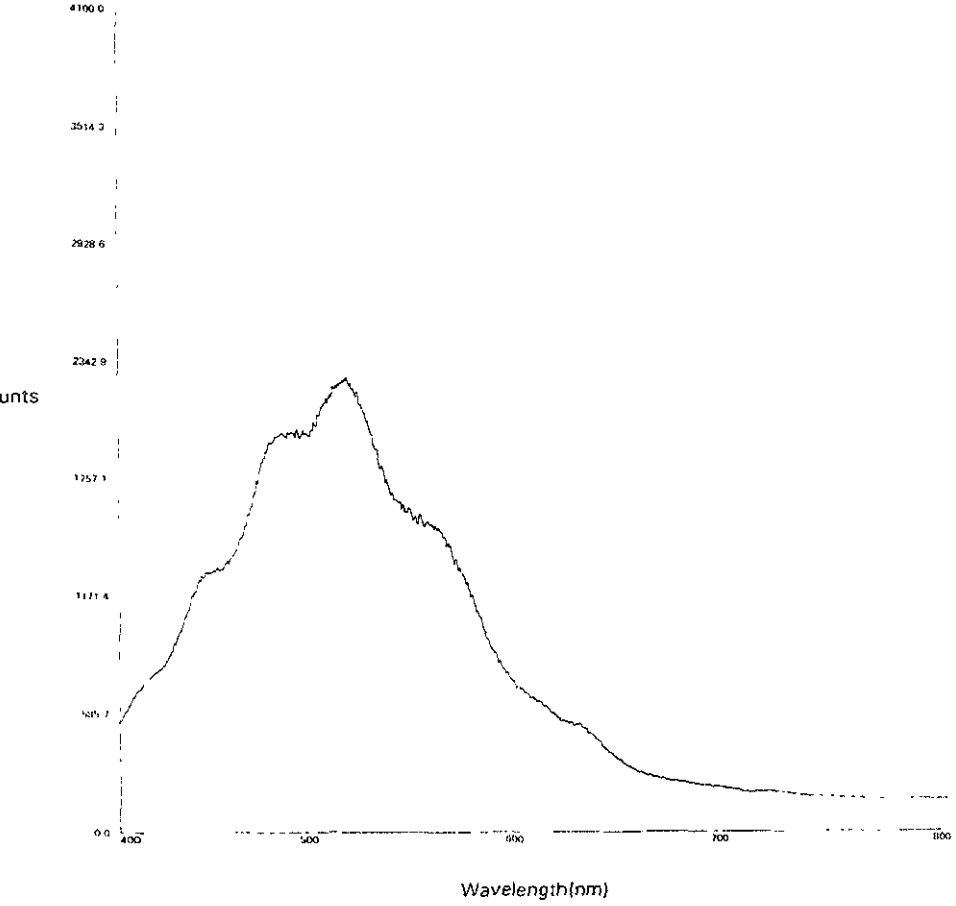


Figura P4. Espectro de la fuente con filtro aplanador de espectro

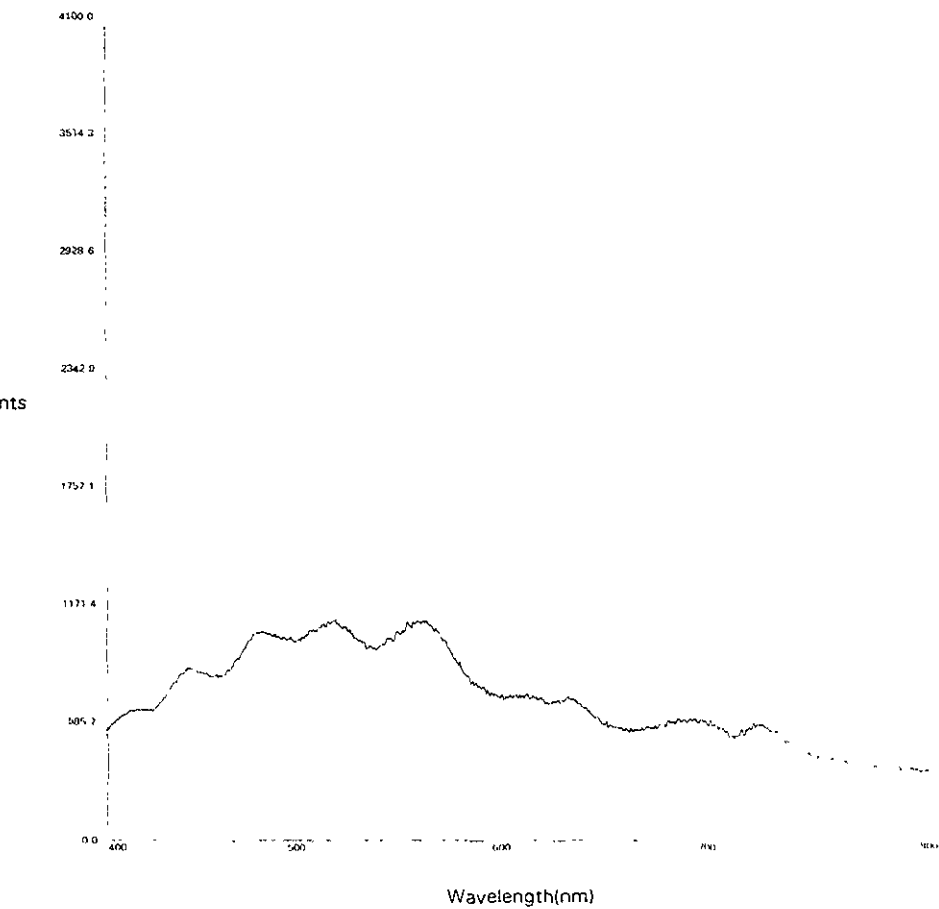


Figura P5. Espectro de la fuente con filtro paso banda Verde

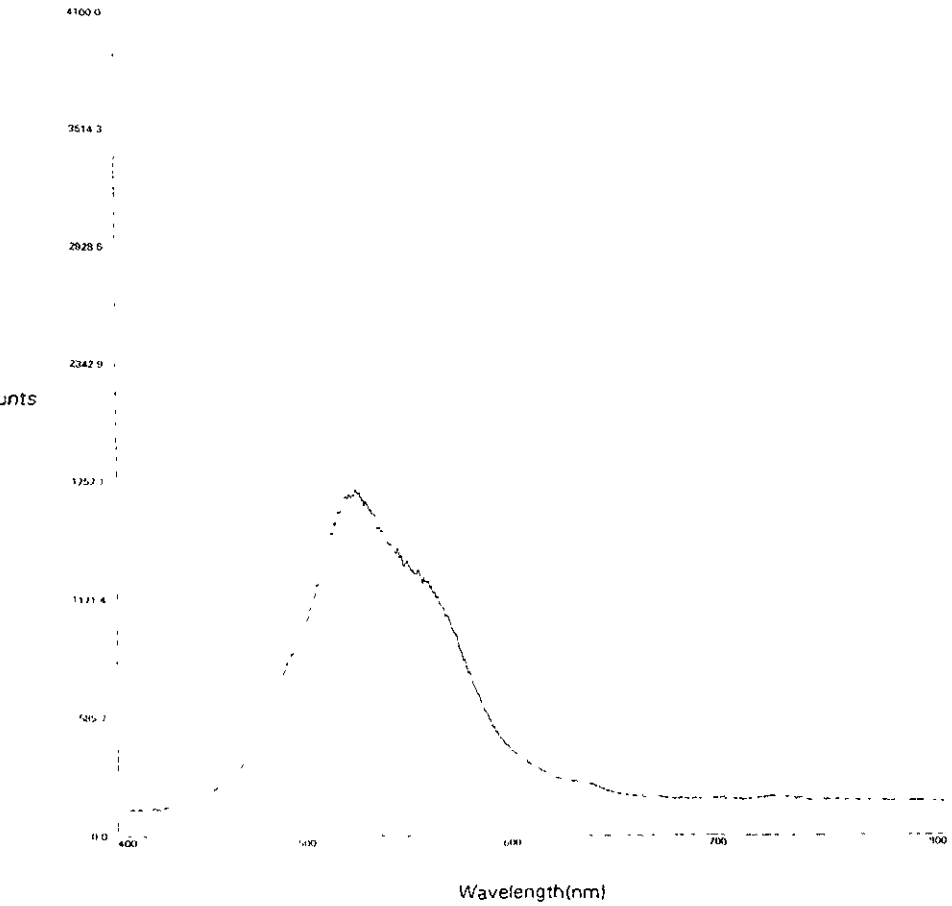
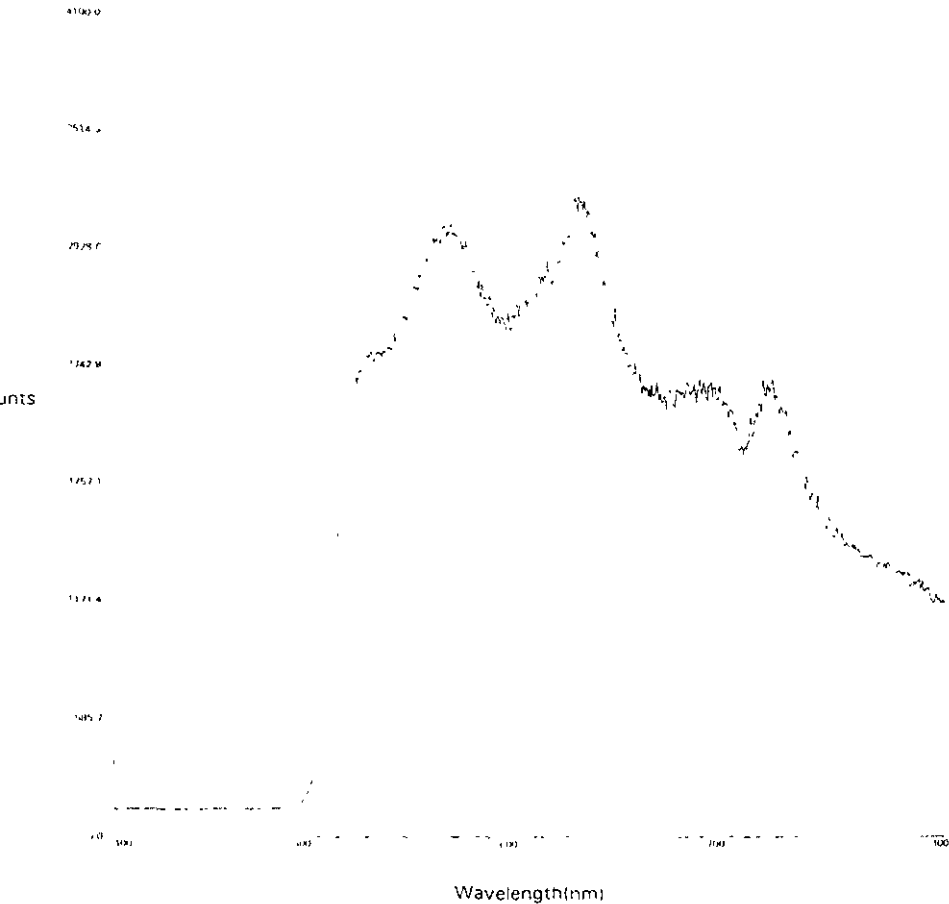


Figura P6. Espectro de la fuente con filtro paso banda Rojo



IV.3. ELEMENTOS DISPONIBLES EN EL MERCADO DE LOS DISPOSITIVOS ÓPTICOS

Una vez realizada la recolección y el análisis de los elementos y herramientas disponibles en el Departamento se efectuó una búsqueda de dispositivos ópticos que nos fueran útiles en la implementación del experimento. Del mismo modo se investigaron las características, ventajas, desventajas, costo y accesibilidad de estos.

IV.3.1. Fuentes Ópticas

Después de haber aprendido como manejar el espectrofotómetro, utilizando la fuente que viene incluida en el kit, probamos que fuentes de luz podríamos utilizar para nuestro experimento. Como primera opción se utilizaron diodos emisores de luz (LEDS) ya que además de ser más económicos son más fáciles de conseguir.

IV.3.1.1. LEDs

Como primera opción se intentó una medición directa, es decir, colocamos la fibra y la fuente (LEDS) de frente sin ayuda de ningún artefacto óptico o mecánico. Se notó que se podía alcanzar una medición aunque esta era muy pobre comparada con la fuente de halógeno tungsteno original del equipo, por lo tanto se decidió buscar LEDs superbrillantes o de alta luminosidad y realizar un arreglo con el fin de colocar los LEDs en el sitio de la fuente original ahora utilizando el mismo dispositivo del kit original y realizar así las mediciones

La búsqueda de los LEDs se realizó tanto en Internet como en los principales establecimientos de electrónica. Los LEDs encontrados en Internet aunque eran mejores a los disponibles en México no presentaban gran ventaja ya que aunque la potencia era mayor eran menos directivos lo que se traduciría en pérdidas al enfocarlo en una fibra, además de que eran más caros y se tendrían que pedir por paquetería internacional.

Los LEDs disponibles en las distribuidoras nacionales que fueron probados tienen las siguientes características:

LEDS 5mm de alta intensidad SUNLED

Color	Lente	Intensidad ($E=10 \mu\text{W}$)	Luminosa ($E=20 \mu\text{W}$)	Longitud de onda (nm)	Ángulo	Tamaño (mm)
Verde	Claro	20 mcd	150 mcd	565	30°	5
Amarillo	Claro	20 mcd	80 mcd	590	30°	5

LED azul alta intensidad SUNLED

Color	Lente	Intensidad $IF = 20 mA$	Luminosa	Longitud de onda (nm)	Angulo	Tamaño (mm)
Azul	Transp.	40 mcd	150 mcd	430	16°	5

LED rojo superbrillante SUNLED

Color	Lente	Intensidad $IF = 20 mA$	Luminosa	Longitud de onda (nm)	Angulo	Tamaño (mm)
Rojo	Claro	ND	500 mcd	625	30	5

En este caso los resultados mejoraron notablemente, el espectrofotómetro registraba valores altos (en algunos casos llegaba al máximo valor medible) y las anchuras espectrales eran más estrechas.

COLOR TIPO	INTENSIDAD (U)	LONGITUD DE ONDA (nm)
Rojo estándar	905	625
Rojo superbrillante	3979	656
Verde alta inten.	1242	564
Verde estándar	950	562
Azul	3580	420
Amarillo alta int.	2500	580

Las medidas fueron tomadas directamente de la pantalla del fotospectrómetro con ayuda de los punteros para obtener un valor más preciso. Las unidades de intensidad en este caso son unidades propias del dispositivo ya que no maneja una unidad estándar, por su parte la longitud de onda se fija en el punto donde presentaban mayor intensidad expresándose en nanómetros

IV.3.2. Lentes

En vista de que los lentes existentes son pocos se analizaron otros lentes del mercado.

PCX Lenses*

Diámetro (mm)	Distancia focal (mm)	USD
12	12	18.30

Se propuso este diámetro para no perder potencia de los LED's y poder colimar la mayor parte del haz

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE CALABAZON
LABORATORIO DE FÍSICA

IV.3.3. Divisor de haz

El cubo divisor del haz disponible en el Departamento mide 23mm x 23 mm x 23 mm, tomando en cuenta el diámetro de nuestras lentes, el cubo es semiaprovechado en el experimento. Por lo tanto, se analizaron otras opciones.

Tech Spec Dichroic Cube Beam splitter*

Transmisión y reflexión 50%

Tamaño (mm)	USD
15 mm x 15 mm	\$ 111.10

Del mismo modo, se buscaron otras opciones más económicas que pudieran funcionar como divisores de haz.

Lamina divisora de haz

Mirror-type beam splitter*

Tamaño (mm)	USD
12.5 x 17.5 x1	\$ 23

Filtro separador de colores:

Color Separating Dichroic filters*

5° blue reflector	\$16.80
45° red reflector	\$16.80

IV.3.4. Filtros ópticos

Una vez encontradas las fuentes(emisor), el analizador de espectro(receptor), los mezcladores de haz (multiplexor) y la fibra (medio de transmisión) se llevó a cabo la búsqueda de los filtros ópticos (demultiplexor)

Edmund Industrial Optics

Optical Cast Plastic Color Filters*

Tamaño	Verde (USD)	Azul (USD)	Rojo (USD)
1" Dia.	\$5.25	\$5.25	\$5.25
2" Dia.	\$7.00	\$7.00	\$7.00
3" Dia.	\$9.95	\$9.95	\$9.95
1"*1"	\$4.50	\$4.50	\$4.50
2"*2"	\$6.00	\$6.00	\$6.00
4"*5"	\$12.30	\$12.30	\$12.30

IV.4 PROPUESTAS UTILIZANDO LOS ELEMENTOS ESTUDIADOS

Una vez realizada la recopilación, caracterización y análisis de los dispositivos ópticos tanto existentes en el Departamento de Telecomunicaciones como en el mercado de componentes electrónicos y ópticos se estudiaron las combinaciones posibles y la accesibilidad de los elementos faltantes con la finalidad de realizar experimentos que cumplan con las características de las opciones presentadas en el inicio del capítulo.

Tomando en cuenta la disponibilidad de las fuentes ópticas encontradas se decidió realizar la opción utilizando dos fuentes ya que posee mayor similitud con un sistema WDM además de que brinda la posibilidad de realizar mayor número de actividades experimentales.

A continuación se exponen dos propuestas del experimento que se pueden llevar a cabo con los elementos conseguidos y analizados. Ambas propuestas utilizan combinaciones de las fuentes, multiplexores, lentes, receptor y filtros ópticos que fueron analizados con anterioridad

Una vez implementadas ambas propuestas se analizarán sus ventajas y desventajas, se comparará su funcionamiento, y se decidirá que propuesta es construida para obtener resultados y mediciones de ésta

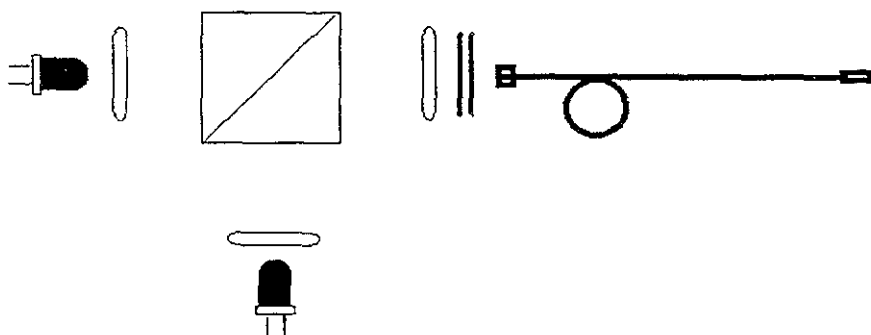
IV.4.1. Propuesta del experimento utilizando Prismas y Lentes

Con los elementos disponibles mostrados a continuación se diseñó un experimento que muestra el principio básico de la multiplexación por división de longitud de onda (WDM)

- LED rojo super brillante
- LED azul
- 2 lentes de 10 mm. (diámetro 10 mm; distancia focal 25 mm)

- 1 lente con 11 mm (diámetro 11 mm; distancia focal 30 mm)
- Cubo divisor de haz (23 mm)
- Espectrofotómetro Ocean Optics
- Fuentes variables de voltaje

La propuesta consiste en la utilizar LED's como fuentes emisoras, colocar sistemas de lentes para colimar los haces de luz provenientes de los LED's, emplear un cubo o prisma que lleve a cabo la multiplexación, designar un espacio para colocar filtros que pueden servir como demultiplexores y finalmente usar un lente para acoplar el haz resultante en la fibra óptica conectada al espectrofotómetro. Los elementos deberán ser posicionados de tal forma que los haces converjan en el extremo de la fibra del espectrofotómetro



IV.4.1.1. Análisis de la Propuesta utilizando prismas y lentes

Los LED's son fuentes poco directivas y no coherentes, su haz no es paralelo al eje por lo que se debe colimar para que pueda dirigirse hacia el cubo divisor de haz. Adicionalmente, se debe conseguir un alineamiento y posicionamiento milimétrico ya que el diámetro de la fibra es de 100 μm y ambos haces deben coincidir en dicho punto aunque al no ser una fuente puntual sino un LED con cristal de un área determinada es imposible lograr que se concentre en un punto dentro del cono de aceptación de la fibra. Para lograr las características de alineación y posición es necesaria una base rígida además de dispositivos mecánicos que permitan el desplazamiento milimétrico de los componentes. El lente colocado frente a la fibra realiza una convergencia de la señal proveniente del cubo hacia la fibra. Debido al diámetro de los lentes y a su distancia focal no es posible captar

todo el haz de los LEDs. Un análisis detallado de las pérdidas de esta propuesta es realizado mas adelante.

Sin embargo, los registros logrados por el fotodetector alcanzan a saturarlo, sin necesidad de un conector o acoplador especial para la fibra, por lo que se puede deducir fácilmente que a pesar de las pérdidas del sistema se logra el objetivo del experimento ya que se puede observar tanto directamente como en el espectrofotómetro que las dos señales viajan al mismo tiempo en el mismo medio independiente la una de la otra. Por otro lado, la mayoría de los elementos empleados en la implementación de la propuesta ya se encuentran en el Departamento y los faltantes son componentes económicos. Otra ventaja de la propuesta es que al alcanzar registros tan altos brinda un mayor rango de trabajo para que la modulación sea más evidente además se tiene el espacio necesario para colocar los filtros que funcionan como demultiplexor.

IV.4.2. Propuesta del experimento utilizando un acoplador X de fibra óptica

Una opción mas para llevar a cabo este experimento consiste en conectar dos fuentes ópticas a un acoplador de fibra óptica que lleve a cabo la unión (acoplamiento) de ambos haces en uno solo, obteniendo dos haces en dos salidas distintas con la combinación de las dos fuentes, es decir, lleva a cabo la multiplexación.

- LED rojo super brillante
- LED azul
- Acoplador Tipo X
- Fibra óptica de 65/125 μm
- Espectrofotómetro Ocean Optics
- Fuentes variables de voltaje

El arreglo consiste en dos fuentes previamente acopladas a un par de fibras ópticas las cuales se conectan por medio de conectores estándar con el acoplador X de fibra óptica para obtener un haz combinado en cualquiera de sus salidas, misma que se encuentra conectada por medio de conectores especiales (ya que no se encuentran disponibles) con un dispositivo en el cual se pueden colocar filtros ópticos. Finalmente, este dispositivo tiene una salida conectada con el espectrofotómetro

Las fuentes que se utilizaron eran LEDs acoplados con la fibra mecánicamente. El proceso de unión consistió en realizar perforaciones micrométricas en las puntas de los LEDs directamente frente a

los cristales de estos. Se preparó la fibra dejándola desnuda, limpiándola y puliéndola para evitar pérdidas, una vez lista se colocó en el orificio y se relleno con pegamento epóxico. Finalmente, con ayuda de un secador se logró el sellamiento. Las fibras utilizadas con los LEDS eran multimodo de $62.5\ \mu\text{m}$ y en el extremo opuesto se prepararon con un conector estándar para poder unirlos con la siguiente fase, el acoplador X de fibra óptica.

IV.4.2.1. Análisis de la Propuesta utilizando un acoplador X de fibra óptica

Al adaptar los LEDS y las fibras ópticas de esta manera, se observó que la potencia no es suficiente para realizar una lectura, por lo que se debe esperar a construir adaptadores, ya que no se encuentran disponibles comercialmente, para realizar las mediciones que determinen si estas fuentes son útiles o no. Otra opción es comprar fuentes especiales que tengan adaptadores para enfocarlas en la fibra, las cuales comparadas con los LEDS resultan demasiado costosas.

El dispositivo en el cual se montan los filtros puede realizarse adaptando la base del hit del espectrofotómetro donde se colocan las muestras. También se puede fabricar un dispositivo similar el cual consiste de dos placas paralelas con orificios concéntricos donde se conectaran por un lado, la salida del acoplador X, y por el otro uno de los extremos de la fibra del espectrofotómetro. Finalmente, la fibra se conecta a una tarjeta en la computadora con entrada óptica.

El acoplador X es un dispositivo construido con dos fibras ópticas las cuales, ya sea por fusión o por pulido, se unen los núcleos y se mezclan sus cargas formando un solo haz el cual se propaga en los extremos de la fibra (salidas). Generalmente, en cada salida encontramos un haz combinado con la mitad de la potencia de la suma de los haces incidentes. En este caso las fibras son multimodo de $50\ \mu\text{m}$ y en tres de sus cuatro extremos están colocados conectores estándar.

Como podemos observar uno de los inconvenientes que presenta el arreglo es que los conectores de la fibra óptica del espectrofotómetro tienen conectores especiales (es decir no son estándar) por lo tanto se deben construir adaptadores que puedan unir salidas estándar con las salidas especiales del espectrofotómetro. Estos conectores deben tener dos diámetros internos distintos y ser perfectamente concéntricos además de tener dos tipos de sujetadores uno estándar (con pequeños postes laterales) y otro que tenga una rosca para sujetar el conector especial. El adaptador debe ser de un material muy resistente pero que permita cortes milimétricos. La necesidad de construir un dispositivo para colocar los filtros es un factor que lo hace menos atractivo.

Sin embargo, el principal problema de esta propuesta son las pérdidas excesivas que se tienen en las distintas conexiones y acoplamientos del sistema. Primeramente, aunque el acoplamiento del LED con la fibra es bueno, por la naturaleza de la fuente y el tamaño de la fibra existen grandes pérdidas. Por otro lado, las conexiones entre las fibras adaptadas a los LEDs y las fibras del acoplador X, aunque se realicen con conectores estándar iguales tienen pérdidas sensibles ya que las fibras tienen núcleos distintos. Adicionalmente, debido a que sólo ocuparemos una salida del acoplador X la potencia entregada será la mitad de la suma de los haces incidentes. Además debemos tomar en cuenta las conexiones con los adaptadores especiales que al no ser del mismo tipo provocan aún más pérdidas. Finalmente, el espacio reservado para los filtros presenta una fuente de dispersión en nuestro sistema aunado a que la última fibra (la del espectrofotómetro) también es distinta a las dos fibras anteriores.

IV.4.3. Resultados de la comparación de las propuestas

Las pérdidas en los sistemas ópticos así como en nuestro experimento son un factor determinante: *del mismo modo, el costo de construcción así como su desempeño deben ser tomados en cuenta.*

Como se mencionó la propuesta de los prismas y lentes tiene grandes pérdidas por el tamaño de las lentes así como por la dificultad de alineamiento de los elementos que lo conforman aunado a que las fuentes emisoras de los LEDs son cristales de un área varias veces mayor a la de la fibra que es imposible, aún con lentes, concentrar la potencia de su haz en un punto tan pequeño. Por otro lado, para su óptimo funcionamiento se debe utilizar una base o estructura que permita fijar los componentes. Sin embargo, a pesar de las pérdidas las lecturas tomadas por el espectrofotómetro son bastante altas para los dos LEDs sin necesidad de un conector o acoplador especial para la fibra. Además, la mayoría de los elementos empleados en la implementación de la propuesta ya se encuentran en el Departamento y los faltantes son componentes económicos. Otra ventaja de la propuesta es que al alcanzar registros tan altos brinda un mayor rango de trabajo para que la modulación sea más evidente además se tiene el espacio necesario para colocar los filtros que funcionan como demultiplexor.

La segunda propuesta a pesar de tener elementos más complejos y sofisticados presenta grandes pérdidas, tales que no se alcanzan registros en el espectrofotómetro. Por otro lado para la implementación de dicha propuesta se deben construir varios dispositivos como conectores y bases. Los extremos de la fibra óptica del espectrofotómetro tienen conectores especiales (es decir no son estándar) por lo tanto se deben construir adaptadores que puedan unir salidas estándar con las

salidas especiales del espectrofotómetro. El adaptador debe ser de un material muy resistente pero que permita cortes milimétricos. El principal problema de esta propuesta son las pérdidas excesivas que se tienen en las distintas conexiones y acoplamientos del sistema

En vista de todas estas desventajas sumado a que la obtención de resultados prácticos fue tan baja se decidió construir la propuesta de los prismas y filtros.

IV.5. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO DEFINITIVO

Una vez tomada la decisión de implementar la propuesta de un experimento de Multiplexación por División de longitud de onda utilizando el cubo divisor de haz como multiplexor, LED's luminiscentes como fuentes de emisoras de luz; y un sistema de lentes para enfocar la luz a la fibra, se diseñó el sistema con las distancias y posiciones adecuadas.

Elementos disponibles:

- LED rojo super brillante
- LED azul
- 2 lentes de 10 mm. (diámetro 10 mm; distancia focal 25 mm)
- 1 lente con 11 mm (diámetro 11 mm, distancia focal 30 mm)
- Cubo divisor de haz (23 mm)
- Espectrofotómetro Ocean Optics
- Fuentes variables de voltaje

De acuerdo a las especificaciones (Anexo C), se observa que los LEDs se polarizan con una corriente determinada, ya que contamos con una fuente de voltaje variable de 0 a 10 Volts y no con una fuente de corriente, se soldó a cada uno de los LEDs una resistencia cuyo valor se calculó de la manera siguiente:

$$V_{\max}=10 \text{ Volts}$$

$$I_{\max}=20 \text{ mA}$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{10}{20 * 10^{-3}} = 500 \Omega$$

El valor comercial de resistencia con el que se contaba fue de 470 Ω y esta fue la que se colocó

Inicialmente se colocó el LED azul frente a un sistema de lentes, las cuales tienen la función de colimar el haz de luz dentro del cono de admisión de la fibra óptica. Para lograr este objetivo fue necesario conocer el eje óptico de las lentes, el cual se define como una línea imaginaria que pasa por los centros de curvatura de ambas lentes. El eje de estas lentes se encuentra a 5mm a partir de cualquiera de sus extremos. Una vez conocida esta distancia se determinó la altura a la que debían colocarse tanto el LED como la fibra, ya que éstas debían coincidir con el eje óptico del sistema de lentes. La distancia entre las lentes fue de 50 mm, para poder colocar más adelante el cubo divisor de haz y filtros. Una de las principales dificultades que se encontraron para que este sistema funcionara eficientemente fue la correcta alineación de los elementos.

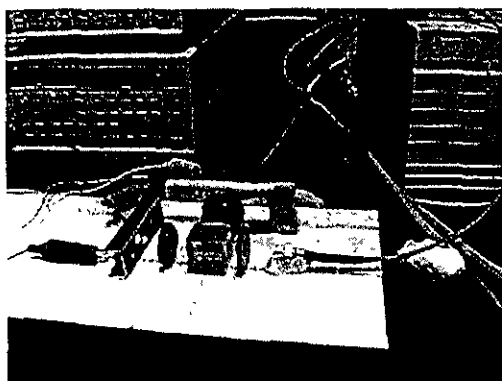
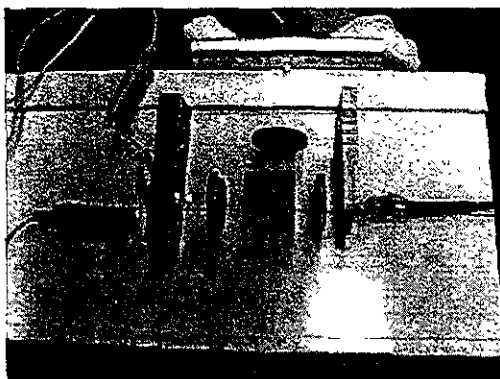


Figura P7 Esquema del experimento propuesto

Considerando que el par de lentes delgadas separadas por una distancia d forman un sistema óptico, calculamos la distancia a la que debíamos colocar la fibra a partir de la lente 2 con la ayuda de la siguiente fórmula (anexo B):

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} = \frac{1}{25} + \frac{1}{25} - \frac{50}{25 * 25} = 0.072$$

$$F = 13.9 \text{ mm}$$

La distancia a la que se colocó el LED azul de la lente 1 se determinó experimentalmente, ya que el LED azul tiene un recubrimiento plástico transparente que funciona como una tercera lente de la cual *no se pueden determinar sus características. Esta distancia se determinó de la siguiente manera:*

Colocamos las lentes 1 y 2 separadas 50 mm y la fibra óptica a una distancia de 13.9 mm de la lente 2 aproximadamente. Posteriormente se colocó el LED azul con una corriente de polarización de 6 mA, a una distancia arbitraria de la lente 1 y se comenzó a mover en la dirección del eje óptico hasta que se detectara una amplitud máxima en el espectrofotómetro. Esta distancia fue de 55 mm aproximadamente.

Se colocó después el cubo divisor de haz entre las lentes 1 y 2 y se observó que la intensidad detectada por el espectrofotómetro disminuyó aproximadamente a la mitad por lo que aumentamos la corriente hasta observar nuevamente una intensidad máxima en el espectrofotómetro. Esta corriente fue de 13 mA.

El mismo proceso se realizó para el LED rojo y obtuvimos que el espectrofotómetro detectaba una intensidad máxima con una corriente de polarización menor a la del LED azul. Sin utilizar el cubo divisor de haz el espectrofotómetro marcaba un máximo al tener una corriente de polarización de 4 mA aproximadamente. Al colocar el cubo detectamos nuevamente un máximo de intensidad con una corriente de polarización aproximada de 8.5 mA.

A continuación se muestra una tabla comparativa de las corrientes para cada LED.

LED	I sin cubo (mA)	I con cubo (mA)
Azul	6	13
Rojo	4	8.5

Debido a que el espectrofotómetro es más sensible a la luz emitida por el LED rojo y a que éste tiene un ángulo de emisión mayor, se decidió colocarlo de manera transversal a la fibra y acoplarlo mediante la lente 3 de 11 mm de diámetro

Experimentalmente también se determinó la distancia a la que debía de colocarse el LED rojo de la lente 3 ya que también cuenta con un recubrimiento-plástico que funciona como una lente adicional. Por otro lado, se encontró que la distancia en la cual se observa un máximo en el espectrofotómetro fue de 25 mm.

Las respuestas de los LEDs como fuentes emisoras independientes se muestran en los espectros correspondientes: LED rojo (635 nm) y LED azul (430 nm).

Después de haber analizado los LEDs independientemente se procedió a armar el sistema en conjunto logrando la multiplexación de ambos haces de luz, cumpliendo así el objetivo principal del experimento. Para demostrar que se ha logrado la multiplexación por medio del dispositivo propuesto, una vez acopladas las fuentes, se obtuvo el espectro correspondiente en donde se observan las dos espigas simultáneamente

Adicionalmente con este dispositivo puede lograrse la modulación independiente de las fuentes, esto se realizó modulando con señales cuadradas a distintas frecuencias cada LED. Como resultado, se obtuvieron espectros que representan la modulación en distintos tiempos.

Finalmente, para separar cada longitud de onda en el receptor, se colocaron filtros ópticos que llevaron a cabo la demultiplexación. En los espectros resultantes se muestran las señales multiplexadas y la respuesta al filtro rojo y azul respectivamente.

Figura P8. Espectro del LED azul (430 nm)

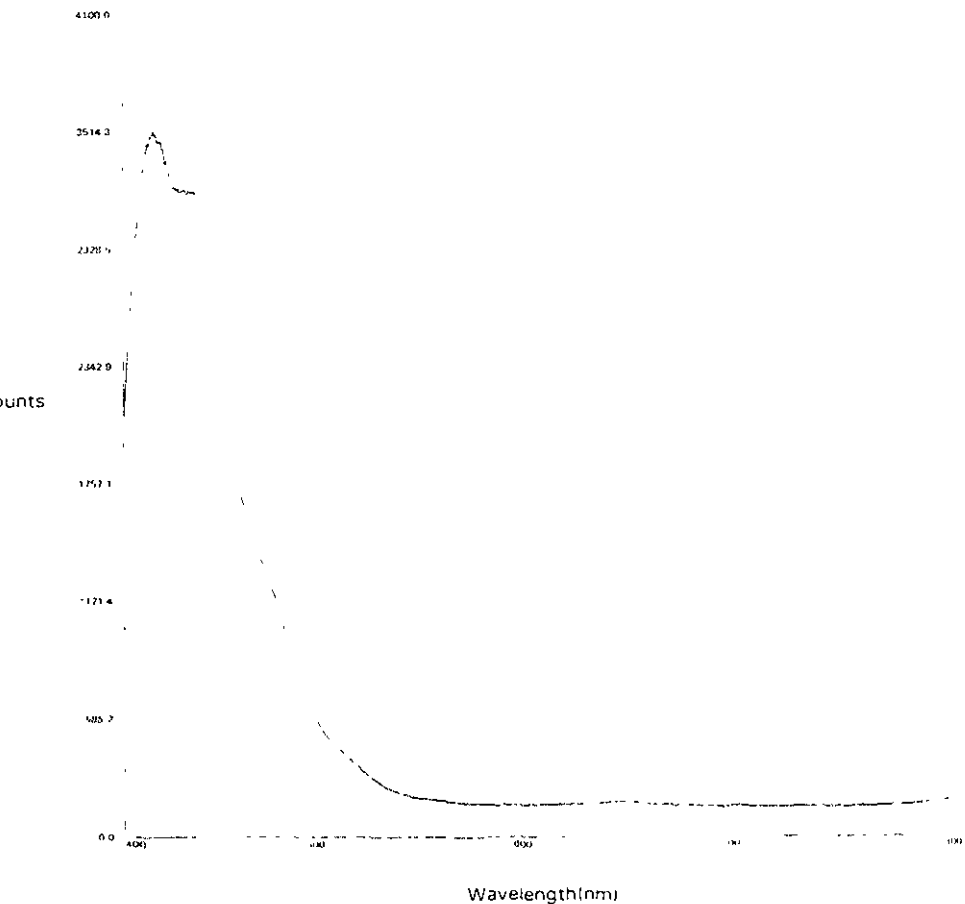


Figura P9. Espectro del LED rojo (635 nm)

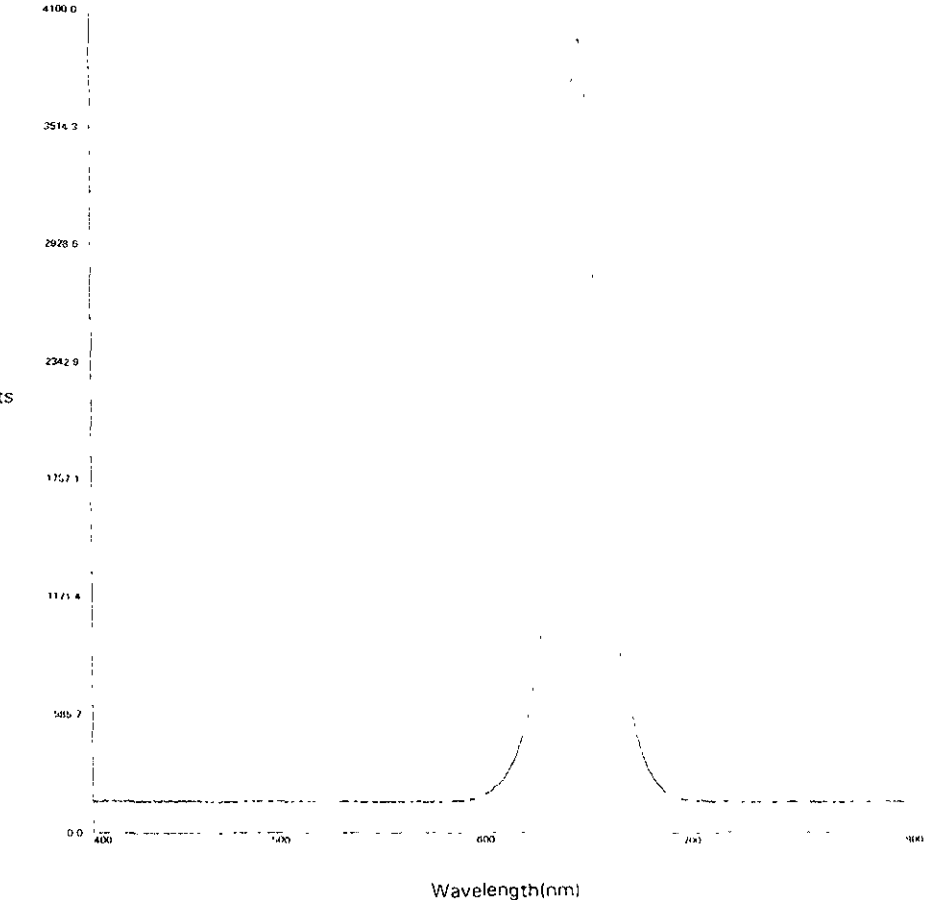


Figura P10. Espectro de las señales multiplexadas
Principio de la técnica WDM

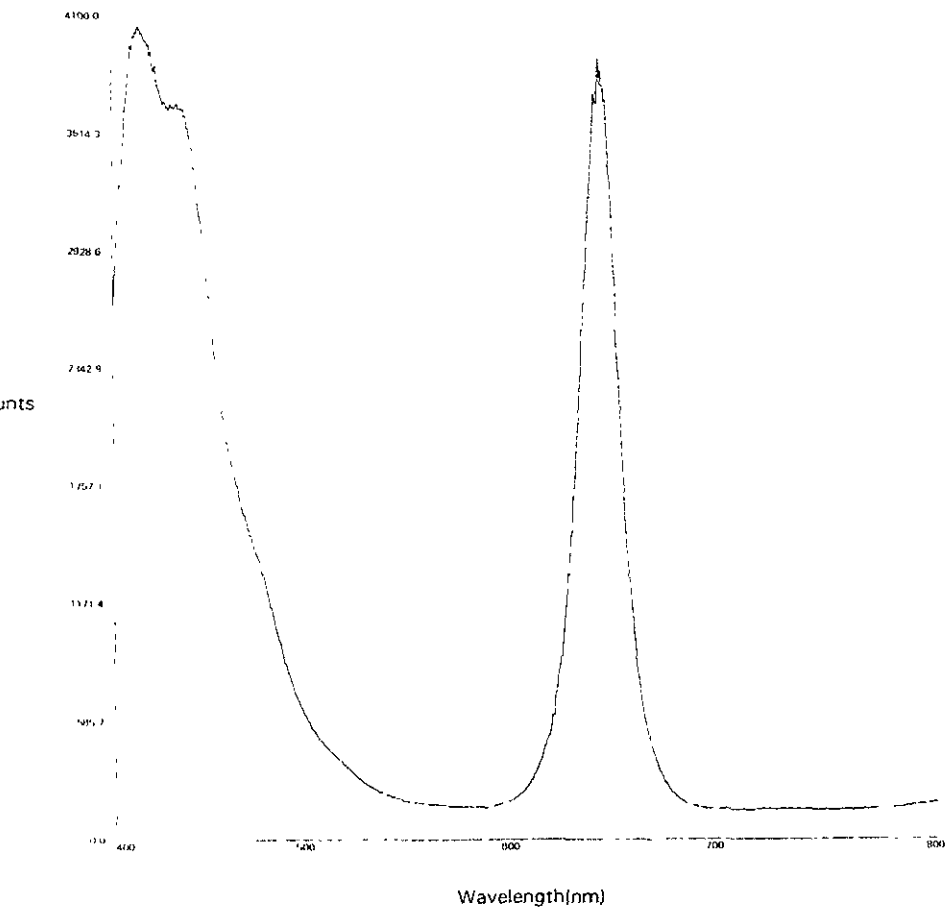


Figura P11. Secuencia de la modulación de las fuentes a distintas frecuencias en el instante(1)

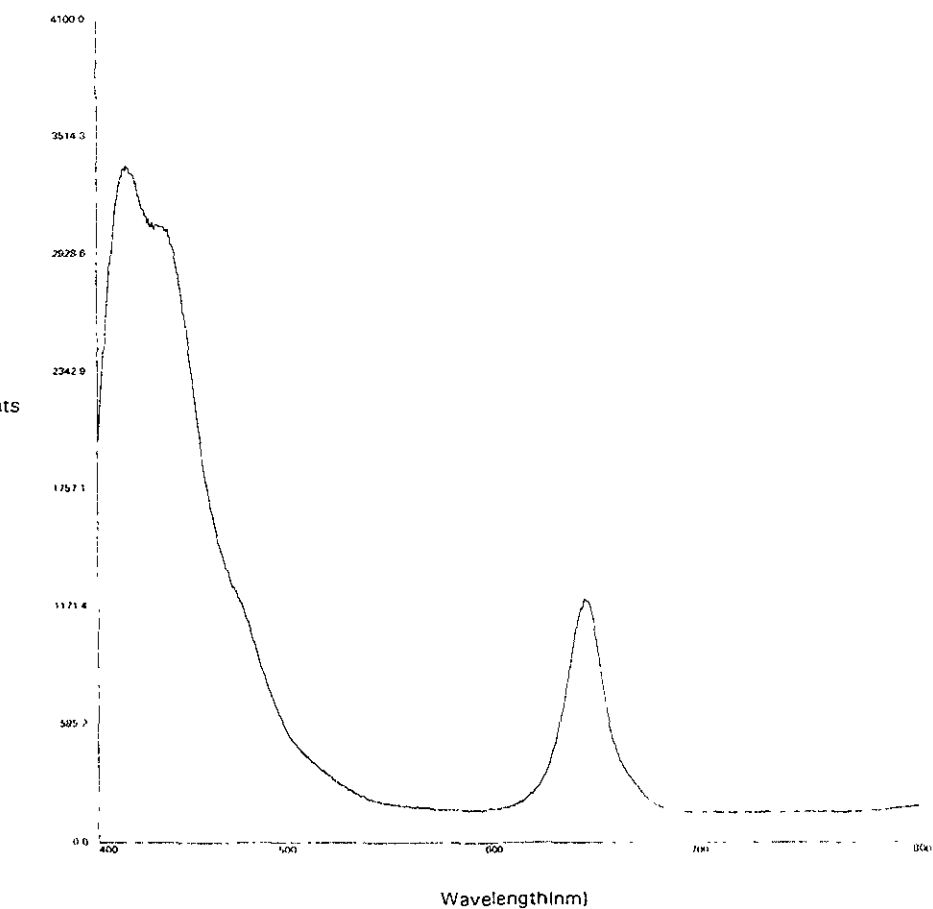


Figura P12. Secuencia de la modulación de las fuentes a distintas frecuencias en el instante(2)

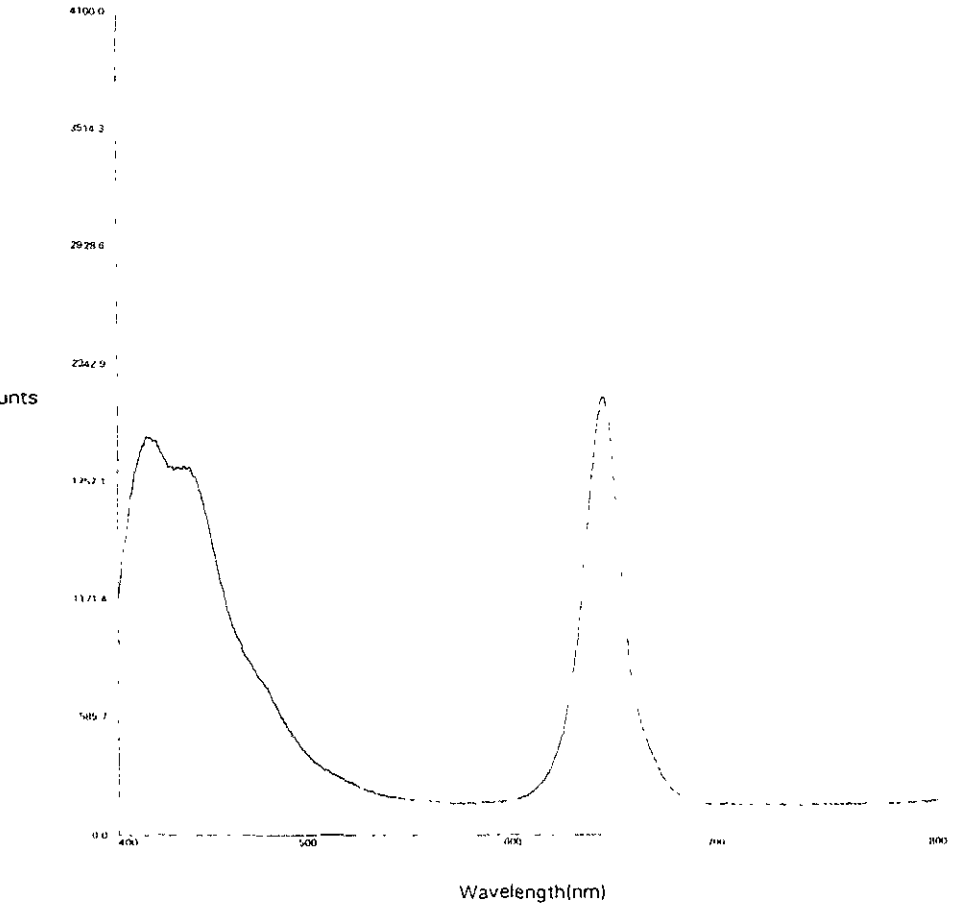


Figura P13. Secuencia de la modulación de las fuentes a distintas frecuencias en el instante (3)

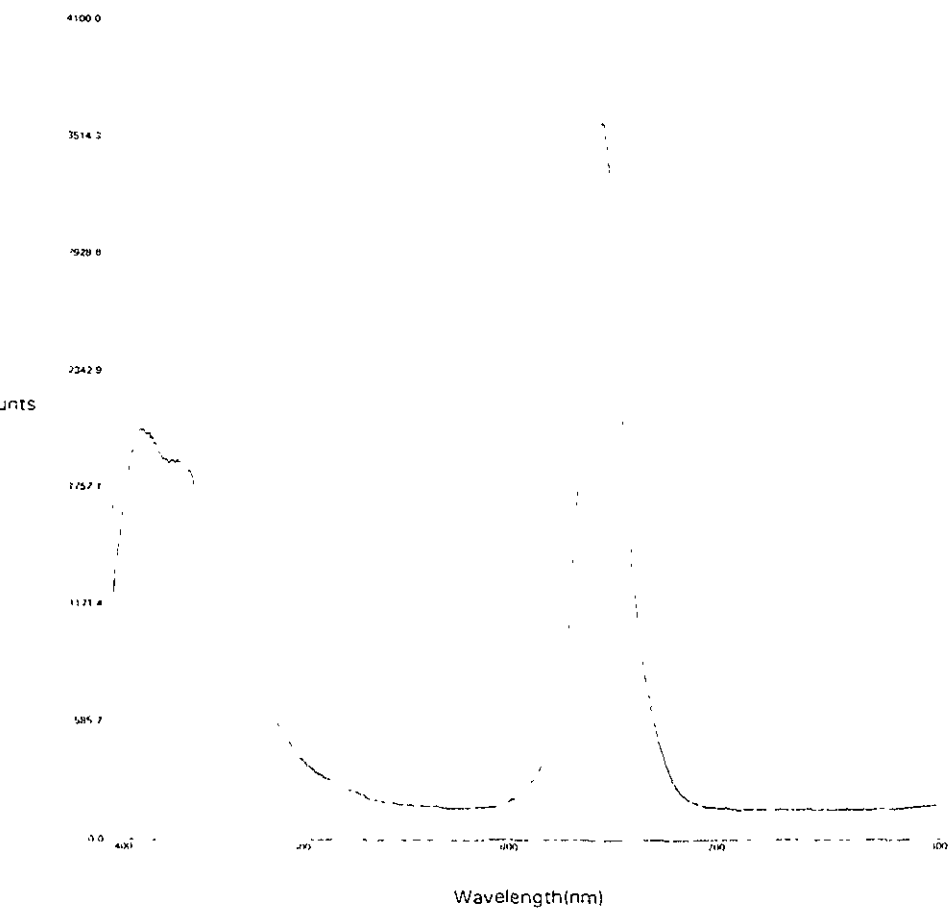


Figura P14 . Espectro de Respuesta del filtro rojo (demultiplexación)

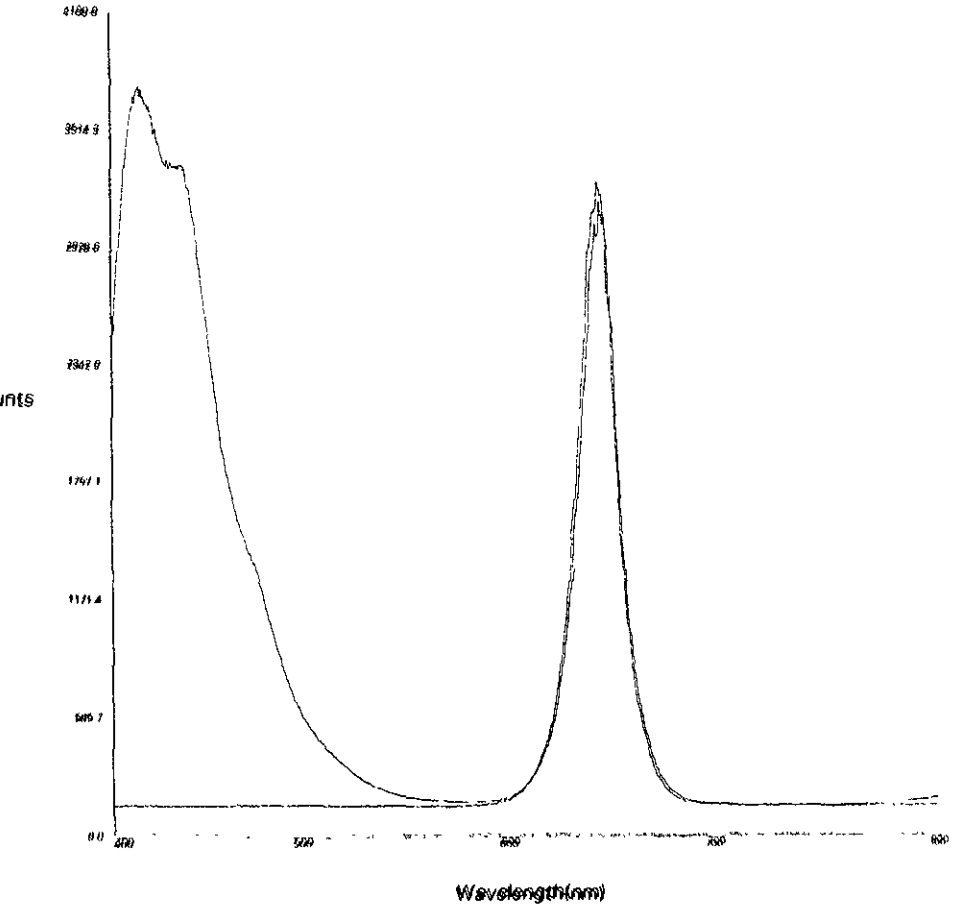
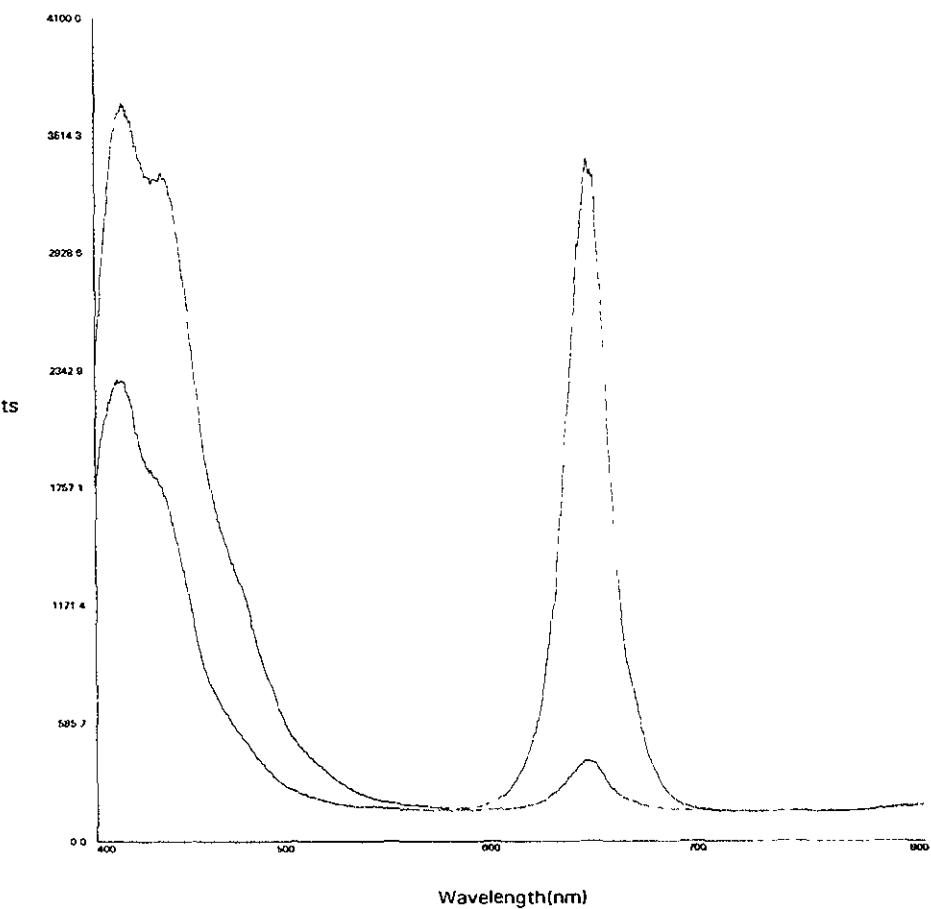


Figura P15. Espectro de Respuesta del filtro azul (demultiplexación)



IV.6. PROPUESTA SOBRE UN EXPERIMENTO DE LABORATORIO DOCENTE SOBRE UN SISTEMA WDM PARA EL DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNAM

Finalidad:

Conocer y comprender el principio sobre el cual se basa la técnica de multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM – Wavelength Division Multiplexing) e identificar los elementos básicos en un sistema de comunicaciones basado en esta tecnología.

Metas:

- Aprender el manejo del software del espectrómetro.
- Analizar y conocer las características espectrales de una fuente de luz. (Diodos emisores de luz-LED)
- Conocer el comportamiento de algunos filtros ópticos y sus efectos en el espectro de una fuente.
- Conocer los efectos de la modulación en una fuente emisora de luz tanto en el tiempo como en la frecuencia.
- Analizar el comportamiento de dos fuentes de luz acopladas en una misma fibra.
- Mediante la modulación, observar el principio de la técnica WDM.
- Mediante la utilización de filtros, observar el principio de demultiplexación en sistemas WDM.
- Reconocer algunos de los problemas de WDM.

Lista de Experimentos:

- ◆ Experimento 1: Manejo y Funciones del Espectrofotómetro FullWave de Ocean Optics.
- ◆ Experimento 2: Caracterización y análisis de la fuente regulada de tungsteno-halógeno.
- ◆ Experimento 3: Caracterización y análisis de un LED
- ◆ Experimento 4: Filtros ópticos
- ◆ Experimento 5: Modulación de una fuente emisora de luz (LED)
- ◆ Experimento 6: Implementación práctica de un sistema WDM
- ◆ Experimento 7: Modulación de fuentes de luz en un sistema WDM
- ◆ Experimento 8: Demultiplexores en un sistema WDM

Conocimientos Previos:

- ◆ Características de una fuente emisora de luz
- ◆ En que consiste la técnica de WDM
- ◆ Emisores WDM/Multiplexores
- ◆ Receptores WDM/Demultiplexores
- ◆ Filtros ópticos
- ◆ Elementos básicos en un sistema de comunicaciones basado en esta tecnología.
- ◆ Características de la Modulación.

Lista de Equipo:

- PC 486 o mayor
- Espectrofotómetro FullWave de Ocean Optics.
- Osciloscopio
- Generador de señales
- Fuente regulada de tungsteno-halógeno
- LED rojo superbrillante (625 nm)
- LED azul (430 nm)
- 2 lentes de 10 mm. (diámetro 10 mm; distancia focal 25 mm)
- 1 lente con 11 mm (diámetro 11 mm; distancia focal 30 mm)
- Cubo divisor de haz (23 mm)
- Filtros
- Fuente variable de voltaje
- Fibra óptica (100 μm)

Experimento 1

Manejo y Funciones del Espectrofotómetro FullWave de Ocean Optics

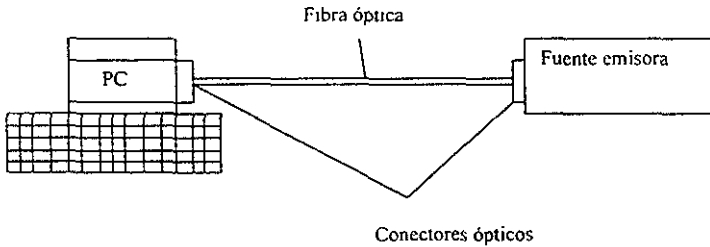
Objetivo:

Aprender a utilizar el espectrofotómetro así como el software utilizado para manejarlo.

Desarrollo:

- Mediante la utilización de conectores ópticos, conectar la fuente regulada de tungsteno-halógeno a un extremo de la fibra óptica.
- Conectar el extremo opuesto a la tarjeta del espectrofotómetro instalada en la PC.
- Tomar algunas lecturas para familiarizarse con el programa FullWave.
- Observar, dibujar y explicar cada una de las funciones que tiene cada una de las ventanas y menús del programa.
- Dibujar el espectro obtenido en la pantalla del programa y sus parámetros.
- Cambiar los parámetros y observar los resultados obtenidos.

Diagrama de conexiones:



Resultados:

Comentarios y Conclusiones:

Experimento 2

Caracterización y análisis de la fuente regulada de tungsteno-halógeno

Parámetros del Espectrofotómetro FullWave de Ocean Optics.

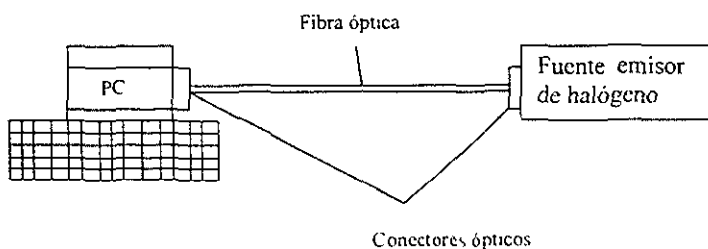
Objetivos:

- Conocer las características espectrales de una fuente regulada de tungsteno-halógeno.
- Determinar prácticamente el ancho de banda del espectrofotómetro y determinar los valores máximos y mínimos de sus escalas.

Desarrollo:

- Mediante la utilización de conectores ópticos, conectar una fuente de luz a un extremo de la fibra óptica.
- Conectar el extremo opuesto a la tarjeta del espectrofotómetro instalada en la PC.
- Mediante el software apropiado, observar el espectro de dicha fuente.
- Analizar las características espectrales tales como intensidad y anchura espectral.
- Dibujar o imprimir el espectro de dicha fuente.
- Con ayuda del espectro obtenido en la pantalla, determinar el rango del espectrofotómetro, anotando los valores mínimos y máximos de las escalas vertical y horizontal.
- Posteriormente, colocar el puntero del mouse en el máximo y mínimo valor posible de ambas escalas y anotar los resultados para conocer y comparar los rangos teóricos y prácticos

Diagrama de conexiones:



Resultados:

Comentarios y Conclusiones:

Experimento 3

Caracterización y análisis de LEDs.

Parámetros que determinan las características y respuesta del
Espectrofotómetro FullWave de Ocean Optics.

Objetivos:

- Conocer las características espectrales de un LED.
- Obtener y conocer las características del espectrofotómetro que se aplican a un receptor para un sistema WDM.

Desarrollo:

- Conectar el diodo láser a una fuente variable de voltaje y colocar una resistencia de 470Ω aproximadamente para limitar la corriente.
- Mediante la utilización de prismas y lentes, enfocar el haz de luz proveniente del LED a un extremo de la fibra óptica. Como se muestra en la figura.
- Conectar el extremo opuesto a la tarjeta del espectrofotómetro instalada en la PC.
- Mediante el software apropiado, observar el espectro y amplitud de ambas fuentes, para distintos valores de voltaje de alimentación. Determinar en que longitud de onda se registra mayor amplitud (longitud de onda central) y la anchura espectral para dos LEDs distintos: rojo (625 nm), azu (430 nm) Llenar la siguiente tabla:

LED rojo:

Voltaje de alimentación V.	Longitud de onda central (λ_c) nm	Anchura espectral nm	Amplitud
0.5			
1.0			
1.5			
2.0			
2.5			
3.0			
3.5			
4.0			

LED azul

Voltaje de alimentación V	Longitud de onda central (λ) nm	Anchura espectral nm	Amplitud
0.5			
1.0			
1.5			
2.0			
2.5			
3.0			
3.5			
4.0			

- Dibujar o imprimir el espectro de las fuentes con máxima amplitud.
- Tomar la amplitud de la longitud de onda inmediata siguiente, el decir la más próxima, anotar su localización (longitud de onda). La mínima diferencia entre estos dos valores nos proporciona la resolución del espectrofotómetro.
- Con ayuda de la tabla anterior y tomando en cuenta las especificaciones del LED, seleccionar los valores máximos y mínimos de amplitud.
- Comparar la longitud de onda central con los valores teóricos

Resultados:**Comentarios y Conclusiones:**

Experimento 4**Filtros ópticos****Objetivo:**

Comprender la utilidad de los filtros ópticos en las transmisiones ópticas.

Desarrollo:

1. Con el sistema acoplado a la fuente de Halógeno y observando su espectro en el espectrofotómetro, colocar distintas láminas coloreadas y observar la respuesta en frecuencia mencionando los efectos que produce. Detectar que frecuencias son atenuadas en mayor y en menor grado.
2. Encontrar la lámina que tenga mayor atenuación para una λ de 625nm y 430 nm. Acoplar el LED rojo mediante prismas y lentes a la fibra optica y obtener su respuesta con y sin el filtro correspondiente. Repetir para el LED azul. Una vez observado el efecto se puede explicar como se utilizan los filtros en un sistema WDM.

Resultados:**Comentarios y Conclusiones:**

Experimento 5

Modulación

Objetivo:

- Observar la modulación de una fuente emisora de luz.

Desarrollo:

- Acoplar un LED por medio de prismas y lentes a la fibra óptica. Por medio de un generador de señales, modular el LED con una frecuencia de 0.1 hz y observar los cambios en el espectro.
3. Determinar el tiempo de respuesta del espectrofotómetro, variar el voltaje de entrada de un valor mínimo (1.0 volt) a un valor máximo (5 volts) y registrar el tiempo que transcurre hasta que el espectrofotómetro detecta la variación y se estabilice en el valor máximo.

Resultados:**Comentarios y Conclusiones:**

Experimento 6

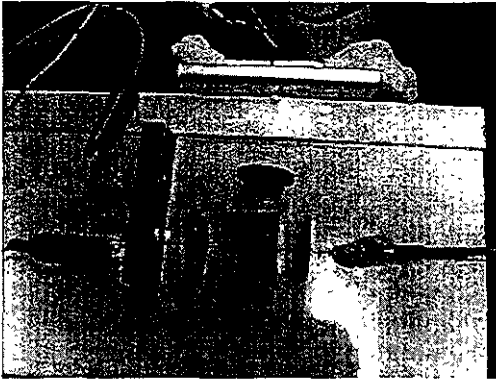
Implementación de un sistema WDM

Objetivo:

- Observar el principio de funcionamiento de un sistema WDM y conocer los conceptos básicos de esta técnica.

Desarrollo:

- Instalar y acoplar dos LEDs de distintas longitudes de onda (rojo y azul) y realizar la *multiplexación mediante el sistema óptico que se muestra a continuación:*



- Identificar y realizar una analogía de los elementos de este experimento y un sistema real WDM. Llenar la siguiente tabla:

Etapa en un Sistema Real	Base en el Experimento
Emisión de distintas longitudes de onda utilizando Láseres.	
Multiplexor	
Tendido de Fibra óptica de larga distancia	
Receptor	

Resultados:

Comentarios y Conclusiones:

.....

.....

Experimento 8**Demultiplexores en un sistema WDM****Objetivo:**

- Comprender la utilidad de los filtros ópticos y su importancia en los demultiplexores.

Desarrollo:

- Una vez realizado el experimento 6, fijar ambos LEDs a un voltaje fijo con el cual se observe una amplitud máxima en el espectrofotómetro. Colocar la lámina que atenúa la longitud de onda correspondiente al LED rojo identificada en el experimento 4 y anote resultados.
- Colocar la lámina que atenúa la longitud de onda correspondiente al LED azul identificada en el experimento 4 y anote resultados.
- Extraer conclusiones y realizar una comparación entre los filtros ópticos utilizados experimentalmente y los filtros utilizados para la demultiplexación en un sistema real.

Resultados**Comentarios y Conclusiones:**

IV.7. CONCLUSIONES

Como hemos mencionado en capítulos anteriores, la técnica de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) es una técnica moderna y revolucionaria que en los últimos cinco años ha tenido gran auge dentro de las comunicaciones ópticas y que pronto serán la principal tecnología utilizada para transportar grandes cantidades de datos a grandes distancias e incluso tendrán gran aplicación en las redes locales de gran capacidad. Por lo tanto es indispensable que los futuros Ingenieros especializados en Telecomunicaciones conozcan y comprendan los principios de funcionamiento de los sistemas WDM. Para los ingenieros en telecomunicaciones es vital conocer las tecnologías de punta, su funcionamiento, los elementos que la conforman, además de sus ventajas y desventajas.

En el presente capítulo se presentó una propuesta de experimento para Laboratorio Docente del Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la UNAM que cumple con el propósito de demostrar el principio de trabajo de un Receptor Óptico para la Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM). Análogamente, se logró la Multiplexación de canales ópticos (colores) y se demostró que estos pueden viajar simultáneamente en el mismo medio (fibra óptica). Del mismo modo, se demostró que los canales son independientes entre ellos y que es posible su separación después de viajar en el mismo medio.

El experimento definitivo es el resultado de un exhaustivo estudio de los elementos disponibles tanto en el Departamento como en los catálogos de los distribuidores de componentes ópticos y electrónicos. De igual manera, se estudiaron los fundamentos ópticos para determinar el diseño y la implementación de las propuestas para el experimento. Una vez implementadas las propuestas se realizó un análisis tanto de su desempeño como de su complejidad, accesibilidad y costo. Con base en la evaluación se eligió la mejor opción y se llevo a cabo su construcción.

El estudio comparativo realizado es una aportación a los laboratorios docentes de nivel superior ya que no se había realizado un análisis evaluando estas dos propuestas lo cual tiene un valor científico y experimental al aportar y descartar experimentos de multiplexación. Además, se soportan las decisiones con la exposición de ventajas y desventajas que se presentan

Adicionalmente existe un reporte detallado de las actividades experimentales efectuadas en el desarrollo de la propuesta así como las direcciones tomadas en la resolución de problemas lo cual también representa un beneficio al brindar respuestas a la resolución de problemas

Un resultado más de este trabajo es la elaboración de una Propuesta (Práctica de laboratorio) sobre un experimento de laboratorio docente sobre un sistema WDM con el formato adecuado para el Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la UNAM que cumple con los objetivos propuestos de demostrar el principio de funcionamiento de un Receptor Óptico para la Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) además de lograr grandes similitudes con un sistema real.

CÁLCULOS Y EVALUACIÓN DE LAS PERDIDAS DEL EXPERIMENTO

CAPITULO V

V.1. EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DEL EXPERIMENTO

Para realizar una evaluación de la eficiencia de esta propuesta implementada, es necesario conocer las pérdidas del sistema. A continuación se hace un análisis de las distintas pérdidas que se presentan en todo el sistema diseñado.

V.1.1. Pérdidas debidas a la conexión

Existen tres elementos fundamentales que son necesarios para realizar un enlace óptico, éstos son:

1. La fibra óptica: fibra multimodo con índice gradual o escalonado o bien fibra monomodo.
2. La fuente óptica: LED o láser
3. El detector óptico. Fotodiodo p-i-n, fotodiodo de avalancha o fototransistor.

Estos elementos deben estar ligados entre ellos para realizar un sistema de comunicación óptica.

En un enlace por fibra óptica existe siempre, según sea el extremo, una fuente óptica por acoplar con una fibra o una fibra por acoplar con un detector óptico. El acoplamiento o la interconexión tiene por objeto transferir el máximo de energía luminosa de un elemento a otro. El objeto de la conexión es realizar interconexiones con pocas pérdidas.

La pérdida en el acoplamiento entre un elemento 1 y otro elemento 2, se calcula por la siguiente relación.

$$D(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (5-1)$$

donde P_1 es el flujo energético que llega al elemento 1;

P_2 es el flujo energético efectivamente recuperado por el elemento 2;

D es la ganancia o pérdida del acoplamiento

En todas las interconexiones aquí tratadas D es negativo, lo que indica una pérdida de flujo energético. La pérdida es entonces igual a 10 veces el logaritmo base 10 de la relación entre el flujo energético acoplado y el flujo energético que llega. Esta pérdida se expresa en decibeles.

V.1.2. Acoplamiento Emisor-fibra

La eficiencia del acoplamiento entre un emisor y una fibra depende, simultáneamente, de los parámetros del emisor, de las características de la fibra y del medio que separa al emisor de la fibra. Todos estos parámetros tienen influencia sobre la transferencia del flujo energético del emisor hacia la fibra. El acoplamiento debe tener por objetivo lograr que se inyecte el máximo flujo energético al núcleo de la fibra y que pueda propagarse.

V.1.2.1. Influencia de las superficies

La fuente luminosa tiene una cierta superficie emisora A_s . La mejor manera de inyectar el máximo de luz de la fuente a la fibra es aplicar directamente la superficie de la fibra a la superficie de la fuente suponiendo que el eje de la fibra es colineal al eje de la fuente. Sin embargo, es necesario que la superficie emisora A_s sea menor o igual a la superficie del núcleo de la fibra $A_f = \pi a^2$, donde a es el radio del núcleo de la fibra. En caso contrario ($A_f < A_s$), se inyecta una parte del flujo energético en la cubierta o al exterior de la fibra por lo que se pierde dicho flujo.

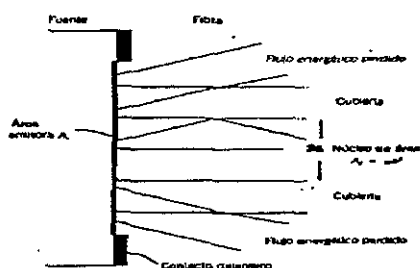


Figura P.1 Acoplamiento entre una fuente de área emisora A_s y una fibra con área de núcleo A_f . La luz emitida hacia el exterior de la fibra se pierde.

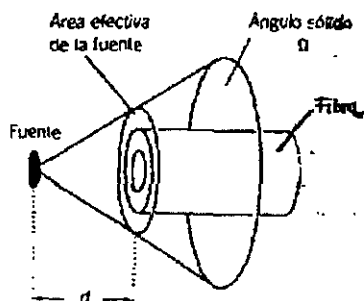


Figura P.2 Acoplamiento entre una fuente y una fibra separadas por una distancia d

No siempre es posible poner en contacto la superficie emisora con la cara de entrada de la fibra. Si, en este caso se tiene una distancia d entre las dos superficies A_s y A_f .

La fuente emite luz en un cierto ángulo sólido Ω . Si el punto luminoso a la distancia d de la fuente tiene una superficie A_s superior a A_f , se pierde una parte de la luz puesto que no puede penetrar en el núcleo de la fibra. De hecho, la superficie del punto luminoso en el plano de la cara de entrada de la fibra, es la superficie efectiva de la fuente. La pérdida que resulta de tener una superficie A_s más grande que la superficie del núcleo A_f puede evaluarse considerando que la relación entre el flujo energético acoplado y el flujo energético que llega es igual a la relación entre la superficie del núcleo de la fibra y la superficie efectiva de la fuente. Entonces la pérdida por acoplamiento se calcula de la siguiente manera:

$$D_s = 10 \log \frac{A_f}{A_s}, \text{ para } A_s > A_f \quad (5-2)$$

$$D_s = 0; \text{ para } A_s < A_f$$

D_s es la pérdida expresada en decibels; A_s es la superficie efectiva de la fuente; y A_f es la superficie del núcleo de la fibra.

V.1.2.2. Influencia del diagrama de radiación

Para que la luz pueda propagarse en una fibra óptica de índice escalonado, es necesario que ésta entre en el núcleo con un ángulo α inferior a α_{om} definido por $n_0 \sin \alpha_{om} = A.N.$ en donde $A.N.$ es la apertura numérica de la fibra y n_0 el índice de refracción del medio exterior. En una fibra de índice gradual, el ángulo máximo de entrada α_{om} , depende del lugar en que la luz se inyecte al núcleo, este ángulo es máximo en el centro del núcleo de la fibra y disminuye cuando se le acerca a la cubierta. Entonces, aun cuando toda la luz emitida por una fuente penetre la superficie de entrada del núcleo de la fibra, toda esta luz no se propaga por la fibra. La cantidad de luz que pueda propagarse depende del ángulo de entrada y, por tanto, del ángulo al que esta luz es emitida por la fuente. Para evaluar el acoplamiento entre una fuente de luz y una fibra óptica, es necesario entonces conocer a la vez el diagrama de radiación de la fuente que dice en que direcciones se emite la luz y también, la apertura numérica de la fibra que señala las direcciones de la luz que podrán propagarse efectivamente en el núcleo de la fibra. Si una fuente emite luz con ángulos que varían, por ejemplo de 0° a 60° y la fibra no acepta, para la propagación, más que la luz que entra con ángulos inferiores a 14° , toda la luz emitida entre 14° y 60° penetra en la fibra pero no se propaga. Esta luz constituye entonces una pérdida en el acoplamiento fuente-fibra. Desgraciadamente las fuentes no siempre tienen una emisión muy directiva, sobre todo en caso de los LED.

El conocimiento del diagrama de radiación de la fuente permite calcular las pérdidas por acoplamiento para una fibra determinada debido a la apertura numérica de la fibra. El diagrama de radiación es la representación gráfica de la variación de la intensidad energética $I(\theta)$ de la fuente en función del ángulo θ entre una dirección determinada y la normal al plano de la superficie emisora.

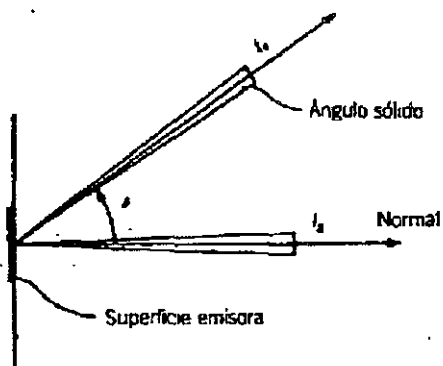


Figura P 3 Determinación del diagrama de radiación de una fuente, por medición de la intensidad energética $I(\theta)$ en función del ángulo θ respecto a la normal a la superficie de la fuente

La intensidad energética es por definición el flujo energético emitido por unidad de ángulo sólido; las unidades son watts por esterradián (W/sr). Si la fuente emite simétricamente con relación a la normal (simetría axial), es suficiente solo un diagrama en un plano cualquiera; como en el caso de un LED de emisión superficial. Por el contrario, en el caso de un diodo láser o de un LED de emisión lateral, es necesario proporcionar el diagrama de radiación en dos direcciones diferentes.

De manera general, la intensidad energética de una fuente puede escribirse:

$$I(\theta) = I_0 (\cos \theta)^m; m > 1 \quad (5-3)$$

$I(\theta)$ es la intensidad energética en la dirección del ángulo θ ;

I_0 es la intensidad energética en la dirección normal;

m es un coeficiente positivo característico de la fuente.

Para $m=1$ se tiene .

$$I(\theta) = I_0 (\cos \theta) \quad (5-4)$$

se tiene entonces

$$I(\theta) = I_0 / 2 \text{ para } \theta = 60^\circ \quad (5-5)$$

Una variación como ésta, caracteriza a una *fente lambertiana*. Cuanto más aumente el coeficiente m , la emisión de la fente será más directiva. véase la siguiente figura:

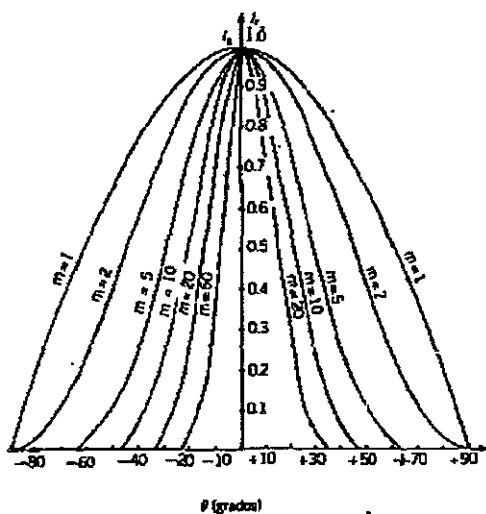


Figura P.4 Diagramas de radiación que muestran las intensidades energéticas relativas de las fuentes para $m=1$ (fente lambertiana), $m=2$, $m=5$, $m=10$, $m=20$, $m=50$ en función del ángulo θ respecto a la normal a la superficie de la fente, en un plano dado.

Si se conoce la función $I(\theta)$ de la fente, es posible conocer la porción del flujo energético total de la fente que se encuentra en el interior de los ángulos compatibles con la apertura numérica de la fibra. Como se tiene, por definición, $I(\theta)=dP/d\omega$ donde $d\omega$ es el ángulo sólido elemental en la dirección θ , puede evaluarse integrando dP :

$$dP=I(\theta)d\omega \quad (5-6)$$

$$\text{con } d\omega=2\pi\text{sen}\theta \, d\theta \quad (5-7)$$

$$dP=2\pi\text{sen}\theta \, I(\theta)d\theta \quad (5-8)$$

$$P=2\pi \int I(\theta)\text{sen}\theta d\theta \quad (5-9)$$

Como se conoce la función $I(\theta)$, la integración sobre los ángulos θ posibles (de 0° a 90°) da el flujo energético total P_T emitido por la fente. La integración entre 0° y α_{aM} da el flujo energético P , que se puede propagar en la fibra, puesto que esta luz tiene ángulos de entrada dentro del cono de admisión de la fibra.

Se tiene, para una intensidad determinada por:

$$I(\theta) = I_0 (\cos \theta)^m; m > 1$$

$$P_t = 2\pi I_0 \int_0^{\pi/2} \sin \theta (\cos \theta)^m d\theta = \frac{2\pi}{m+1} I_0$$

$$P_c = 2\pi I_0 \int_0^{\alpha_{0M}} \sin \theta (\cos \theta)^m d\theta = \frac{2\pi}{m+1} [1 - (\cos \alpha_{0M})^{m+1}]$$
(5-10)

Entonces se obtiene la relación importante:

$$P_c = P_t [1 - (\cos \alpha_{0M})^{m+1}] \text{ con } n_0 \sin \alpha_{0M} = \text{A.N.}$$
(5-11)

Por tanto se conoce el flujo P_T total emitido por una fuente, su diagrama de radiación (m) y la apertura numérica de la fibra ($A > N$), se puede calcular el flujo energético P_c que se acopla efectivamente en la fibra y que se propaga.

La pérdida por acoplamiento $D_{A.N}$ en dB debida al diagrama de radiación y a la apertura numérica se escribe:

$$D_{A.N} = 10 \log \frac{P_c}{P_t} = 10 \log [1 - (\cos \alpha_{0M})^{m+1}]$$
(5-12)

Para una fuente lambertiana se tiene:

$$D_{A.N} = 10 \log (A.N.)^2$$
(5-13)

Este resultado es muy importante ya que muestra claramente la enorme pérdida de luz que se tiene en el acoplamiento fibra-emisor. Si la fibra es de índice gradual, con una apertura numérica A.N. (0) y un parámetro de perfil de índice g , entonces:

$$D_{A.N} = 10 \log [1 - (\cos \alpha_{0M})^{m+1}] = 10 \log \left(1 - \frac{2}{g+2} \right)$$
(5-14)

Para reducir esta enorme pérdida $D_{A.N}$ es necesario aumentar la apertura numérica, es decir, aumentar m , lo que significa tener una fuente no lambertiana. Aumentar la apertura numérica no

siempre es deseable puesto que aumenta la dispersión modal, de manera que es necesario actuar de acuerdo a la utilización. Otra solución consiste en utilizar fuentes más directivas, que pueden ser bien LED de emisión lateral o diodos láser. Las superficies emisoras rectangulares de las fuentes con heteroestructuras poseen dimensiones aproximadamente de $2 \times 20 \mu\text{m}$ para los diodos láser y de aproximadamente $20 \times 50 \mu\text{m}$ para los LED de emisión lateral. En el caso de LED de emisión lateral, el diagrama de radiación es pseudolambertiano en la dirección paralela al plano de la unión y es más directivo en el plano perpendicular al plano de la unión. Así, los fotones que se emiten en éste último son los que más fácilmente se acoplan a la fibra. Para un diodo láser, el diagrama de radiación es muy directivo en los dos planos, lo que da como resultado una mayor eficiencia en el acoplamiento.

V.1.2.3. Influencia de la Reflexión

Para entrar en la fibra, la luz debe pasar la interfaz entre el aire y el núcleo de la fibra. Como el aire tiene un índice de refracción n_0 diferente al del núcleo de la fibra n_1 , una parte del flujo energético se refleja y, en consecuencia, no se acopla. Esta pérdida de luz debida a la reflexión se llama *pérdida de Fresnel*. El factor de reflexión ρ , definido como la relación entre el flujo energético reflejado y el flujo energético incidente es igual a:

$$\rho = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \quad (5-15)$$

La pérdida debida a la reflexión (Pérdida de Fresnel)), se escribe:

$$D_R = 10 \log(1 - \rho) \quad (5-16)$$

Esta pérdida es pequeña en comparación con las pérdidas de apertura numérica.

V.2. OPTIMIZACIÓN DEL ACOPLAMIENTO EMISOR - FIBRA

En el acoplamiento entre un emisor de luz y una fibra, la causa principal de pérdidas se debe a que la fibra no puede aceptar luz más que en ciertas direcciones, suponiendo un acoplamiento directo entre el emisor y la fibra. Se sabe que los sistemas ópticos como las lentes, poseen la propiedad de cambiar la dirección, es decir refractar, los rayos de luz que los atraviesan. Se puede preguntar por tanto si no es posible refractar los rayos emitidos por la fuente por medio de sistemas ópticos, de modo que su dirección corresponda a la del cono de admisión de la fibra. Esto es posible, pero no siempre. Existe, en efecto, una limitación teórica. Una fuente óptica se caracteriza por la superficie emisora A_s y su diagrama de radiación o el ángulo sólido Ω_s de emisión. La fibra óptica se caracteriza por el área de su núcleo A_f y su apertura numérica (A.N) a la cual se le puede asociar un ángulo sólido Ω (cono de admisión)

Se le llama *extensión geométrica E* al producto del área por el ángulo sólido:

$$E = A\Omega \quad (5-17)$$

La fuente tiene una extensión:

$$E_s = A_s \Omega_s \quad (5-18)$$

La fibra tiene una extensión:

$$E_f = A_f \Omega_f \quad (5-19)$$

La transferencia de energía de la fuente hacia la fibra debe satisfacer el teorema de extensión que se enuncia como sigue:

“No se puede reducir la extensión de un objeto por un sistema de imágenes, sin perder energía en una relación igual a la que hay entre las extensiones de origen y de llegada”

De este teorema resulta que si la extensión geométrica E_s de la fuente es superior a la extensión geométrica de la fibra E_f de la fibra, no se puede transmitir en la fibra toda la energía emitida por la fuente.

V.3. EVALUACIÓN DE LAS PERDIDAS DE LA FUENTE 1 (LED rojo)

Los manuales correspondientes al LED rojo especifican la potencia máxima del LED en 500 mcd. Éstas son unidades del sistema fotométrico. Para poder realizar una evaluación de las pérdidas del sistema es necesario conocer la potencia del LED en unidades del sistema radiométrico. (Anexo A) Considerando que la potencia máxima dada en las especificaciones es para un ángulo sólido dado se tiene:

Intensidad luminosa máxima: $I_f \text{ max} = 500 \text{ mcd}$

Semiángulo en el vértice del cono: $\theta = 30^\circ$

Tenemos que el ángulo sólido (Anexo C) se determina mediante la siguiente relación:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta)$$

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos 30) = 0.41 \text{ Sr}$$

Obtenemos la potencia en el sistema fotométrico:

$$P_f \text{ max} = I_f \text{ max} \Omega = 500 \text{ mcd} * 0.41 \text{ Sr} = 0.420 \text{ lumen}$$

Para obtener la potencia en watts:

$$P_R = \frac{P_f}{K_\lambda * V_m}$$

La longitud de onda central del LED rojo es de 625 nm, por lo que de tablas (Anexo A) se obtiene el siguiente valor para V_m :

$$V_m = 0.333$$

Por lo que:

$$P_R = \frac{P_f}{K_\lambda * V_m} = \frac{0.420}{683 * 0.333} = 1.85 \text{ mW}$$

Una vez obtenida esta potencia se pueden realizar los cálculos correspondientes a la pérdida del sistema.

Influencia de las superficies

Para conocer el área efectiva de emisión del LED rojo, se pulió la superficie hasta llegar al cristal. Posteriormente se determinó con ayuda de un microscopio el área emisora del LED:

$$\text{Área del cuadrado} = l * l = 240 \mu\text{m} * 240 \mu\text{m} = 57.60 \text{ nm}^2$$

$$\text{Área del círculo} = \pi * r^2 = \pi * 77.5^2 \mu\text{m} = 18.87 \text{ nm}^2$$

$$\text{Área efectiva de emisión, } 38.73 \text{ nm}^2$$

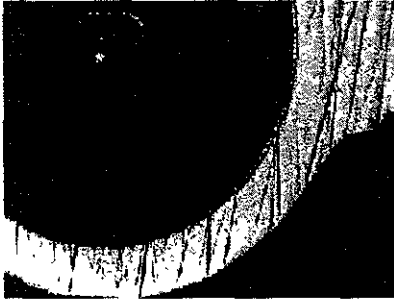


Figura P.5 Superficie pulida del LED rojo

Conociendo que el núcleo de la fibra tiene un diámetro de $100\mu\text{m}$ se calcula que las pérdidas por diferencia de área son:

Área efectiva de la fuente: $A_s \approx 38.73 \text{ nm}^2$

Área efectiva de la fibra: $A_f \approx 7.85 \text{ nm}^2$

$$D_s = 10 \log \frac{A_f}{A_s}$$

$$D_s \approx 10 \log \frac{7.85}{38.73}$$

$$D_s \approx -6.29 \text{ dB}$$

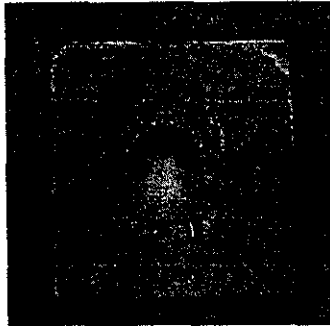


Figura P. 6 Cristal de emisión LED rojo

Si se considera que solo se pueden acoplar en un 50% la fibra con la fuente, se tomarán 3dB adicionales de pérdida, por lo que se tiene como pérdida total por influencia de las superficies:

$$D_s \approx -6.29 - 3 = -9.29 \text{ dB}$$

Influencia del diagrama de radiación

En este caso se debe considerar que existe un sistema óptico que ayudará a acoplar el haz de la fuente a la fibra, por lo que existe una pérdida por el diagrama de radiación de la fuente y el ángulo de aceptación de la lente.

El conocimiento del diagrama de radiación de la fuente permite calcular las pérdidas por acoplamiento para un sistema determinado debido a la radiación que admite el sistema óptico. El diagrama de radiación es la representación gráfica de la variación de la intensidad energética $I(\theta)$ de la fuente en función del ángulo θ entre una dirección determinada y la normal al plano de la superficie emisora.

El semiángulo para el cual la intensidad es la mitad de la intensidad máxima (θ a -3 dB) es de 30° .

Anexo D

La intensidad energética es máxima para $\cos\theta = 1$, es decir, $\theta = 0$. Por tanto sigue la normal y es igual a I_0 .

Se obtiene El valor de m , para obtener el diagrama de radiación:

$$I(\theta) = I_0 (\cos\theta)^m$$

considerando θ a media potencia :

$$I(\theta) = \frac{I_0}{2} = I_0 (\cos\theta)^m$$

$$\frac{I_0}{2} = I_0 (\cos\theta)^m$$

$$0.5 = (\cos 30^\circ)^m$$

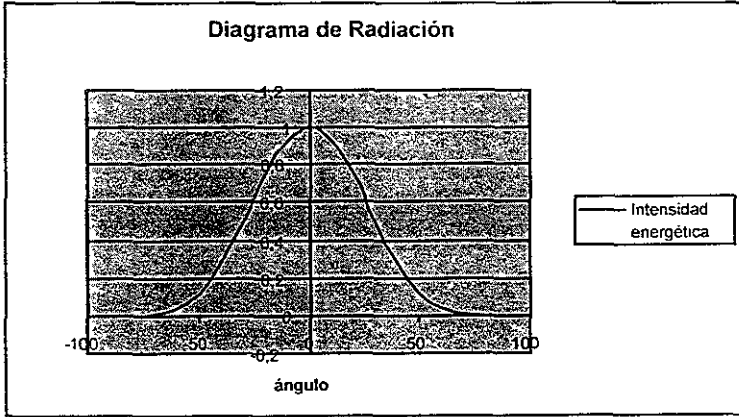
$$\log 0.5 = \log(\cos 30^\circ)^m$$

$$\log 0.5 = m \log(\cos 30^\circ)$$

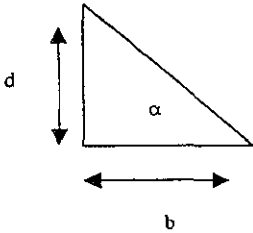
$$m = \frac{\log 0.5}{\log(\cos 30^\circ)}$$

$$m = 4.82$$

Por lo que su diagrama de radiación se aproxima al siguiente:



Para calcular el cono de aceptación del sistema óptico:



$$\alpha_{\text{m}} = \tan^{-1}\left(\frac{d}{b}\right)$$

$$\alpha_{\text{m}} = \tan^{-1}\left(\frac{5.5}{25}\right)$$

$$\alpha_{\text{m}} = 12.41^\circ$$

para obtener las pérdidas debidas al cono de aceptación del sistema óptico tenemos

$$D_{A N_{\text{m}}} = 10 \log[1 - (\cos \alpha_{\text{m}})^{m+1}]$$

$$D_{A N_{\text{m}}} \approx 10 \log[1 - (\cos 12.41)^{4.82(1)}]$$

$$D_{A N_{\text{m}}} \approx -8.91 \text{ dB}$$

Existe también un cono de aceptación de la fibra debido a su apertura numérica, la cual se obtuvo en el laboratorio de una manera experimental utilizando el método de los tres anillos.

Método de los tres anillos

En este método se utiliza una fuente de luz láser con el haz paralelo, la cual se proyecta con distintos ángulos sobre un extremo de la fibra. Al otro extremo se coloca un microscopio. Para los ángulos de entrada del haz menores que el ángulo de entrada máximo, el extremo de salida tiene el núcleo más brillante que la cubierta. Para los ángulos de entrada mayores que el ángulo máximo, el extremo de salida presenta el núcleo más oscuro que la cubierta. Girando la fuente de luz hasta detectar un anillo luminoso en la interfaz entre el núcleo y la cubierta se obtiene el ángulo de entrada máximo α_{OM} del cono de admisión.

Se realizaron tres medidas y se obtuvo el valor promedio:

Ángulo Máximo	Apertura Numérica α_{OM}
$\alpha_{OM 1}=23.5$	A.N. ₁ =0.39
$\alpha_{OM 2}=22.5$	A.N. ₂ =0.38
$\alpha_{OM 3}=22.0$	A.N. ₃ =0.37
$\alpha_{OM \text{ prom}}=22.65$	A.N. _{prom}} =0.39

Entonces se obtiene un ángulo de admisión de 22.65° , el cual es mayor al cono del sistema óptico, por lo que no existen pérdidas entre el sistema óptico o lente y la fibra óptica

Influencia de la Reflexión

En general, las pérdidas de Fresnel se refieren a las reflexiones que existen debido a la diferencia en los índices de refracción de dos medios distintos.

En este caso se considera el índice de refracción del cuarzo como:

$$n_{\text{cuarzo}} \approx 1.6$$

Se sabe que el índice de refracción del aire es:

$$n_{\text{aire}} \approx 1$$

por lo que la reflexión de Fresnel se puede calcular.

$$\rho = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2$$

$$\rho \approx \left(\frac{1.6 - 1}{1.6 + 1} \right)^2 \approx 0.053$$

La pérdida debida a la reflexión (Pérdida de Fresnel), se escribe:

$$D_R = 10\log(1 - \rho)$$

$$D_R \approx 10\log(1 - 0.053)$$

$$D_R \approx -0.24dB$$

Dado que existen varias lentes y el cubo, se obtiene que son 7 los cambios de medio que se presentan, por lo que:

$$D_{Rtotal} \approx 7 * D_R$$

$$D_{Rtotal} \approx -1.66dB$$

Esta pérdida es pequeña en comparación con las pérdidas de apertura numérica.

Pérdidas debidas al cubo divisor de haz

El cubo divisor de haz tiene la propiedad de transmitir aproximadamente el 50% de la potencia y reflejar el 50% restante, por lo que se adioionará una pérdida debida al cubo de $-3dB$.

$$D_c \approx -3dB$$

Pérdida total del sistema

La pérdida total del sistema es entonces la suma de todas las pérdidas mencionadas anteriormente.

$$D_{total} = D_s + D_{A.N. \text{ total}} + D_R + D_c$$

$$D_{total} \approx -9.29 - 8.91 - 1.66 - 3$$

$$D_{total} \approx -22.86dB$$

Esto indica que se perdió aproximadamente 197 veces la potencia inicial de la fuente, es decir que al final del sistema óptico se tiene una potencia final máxima 197 veces menor a la inicial:

$$D_{total} = 10\log \frac{P_{salida}}{P_{entrada}}$$

$$P_{salida} = 10^{D_{total}/10} * P_{entrada}$$

$$P_{salida} = 10^{-2.28} * 1.85 * 10^{-1} = 9.57\mu W$$

Evaluando la eficiencia del sistema se tiene:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} * 100 = \frac{9.57 * 10^{-6}}{1.85 * 10^{-3}} * 100 = 0.52\%$$

A pesar de que la eficiencia del sistema es muy baja, se puede ver que la sensibilidad del espectrofotómetro es elevada, ya que sí puede realizar lecturas de estos niveles de potencia tan reducidos.

V.4. EVALUACION DE LAS PERDIDAS DE LA FUENTE 2 (LED azul)

De manera análoga al LED rojo, se analizará el sistema para el LED azul. Los manuales correspondientes al LED azul (Anexo D) especifican la potencia máxima del LED en 150 mcd. Como ya se estudió en el capítulo anterior, estas son unidades del sistema fotométrico. Para poder realizar una evaluación de las pérdidas del sistema es necesario conocer la potencia del LED en unidades del sistema radiométrico.

Considerando que la potencia máxima dada en las especificaciones es para un ángulo sólido dado se tiene:

Intensidad luminosa máxima: $I_f \text{ max} = 150 \text{ mcd}$

Semiángulo en el vértice del cono: $\theta = 16^\circ$

Tenemos que el ángulo sólido (Anexo C) se determina mediante la siguiente relación:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta)$$

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos 16) = 0.24 \text{ Sr}$$

Obtenemos la potencia en el sistema fotométrico:

$$P_f \text{ max} = I_f \text{ max} \Omega = 150 \text{ mcd} * 0.24 \text{ Sr} = 0.036 \text{ lumen}$$

Para obtener la potencia en watts:

$$P_R = \frac{P_f}{K_\lambda * V_m}$$

La longitud de onda central del LED rojo es de 430 nm, por lo que de tablas se obtiene el siguiente valor para V_m :

$$V_m = 0.0116$$

Por lo que,

$$P_R = \frac{P_t}{K_s * V_m} = \frac{0.036}{683 * 0.0116} = 4.60 \text{ mW}$$

Una vez obtenida esta potencia se pueden realizar los cálculos correspondientes a la pérdida del sistema:

Influencia de las superficies

En este caso se consideró la misma área efectiva de emisión del LED rojo, ya que ambos LEDs son análogos.

$$\text{Área del cuadrado} = l * l = 240 \mu\text{m} * 240 \mu\text{m} = 57.60 \text{ nm}^2$$

$$\text{Área del círculo} = \pi * r^2 = \pi * 77.5^2 \mu\text{m} = 18.87 \text{ nm}^2$$

$$\text{Área efectiva de emisión: } 38.73 \text{ nm}^2$$



Figura P 7 Superficie pulida del LED azul

Conociendo que el núcleo de la fibra tiene un diámetro de $100 \mu\text{m}$ se calcula que las pérdidas por diferencia de área son:

$$\text{Área efectiva de la fuente: } A_s = 38.73 \text{ nm}^2$$

$$\text{Área efectiva de la fibra: } A_f = 7.85 \text{ nm}^2$$

$$D_s = 10 \log \frac{A_f}{A_s}$$

$$D_s \approx 10 \log \frac{7.85}{38.73}$$

$$D_s \approx -6.29 \text{ dB}$$

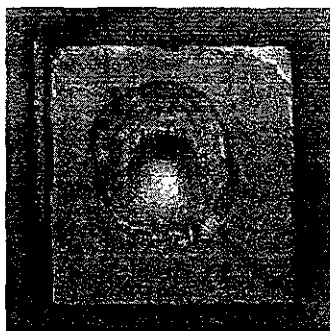


Figura P 8 Cristal de emisión

Si se considera que sólo se pueden acoplar en un 50% la fibra con la fuente, se tomarán 3dB adicionales de pérdida, por lo que se tiene como pérdida total por influencia de las superficies:

$$D_s = -6.29 - 3 = -9.29 \text{ dB}$$

Influencia del diagrama de radiación

En este caso se debe considerar que existe un sistema óptico que ayudará a acoplar el haz de la fuente a la fibra, por lo que existe una pérdida por el diagrama de radiación de la fuente y el ángulo de aceptación de la lente.

El conocimiento del diagrama de radiación de la fuente permite calcular las pérdidas por acoplamiento para un sistema determinado debido a la radiación que admite el sistema óptico. El diagrama de radiación es la representación gráfica de la variación de la intensidad energética $I(\theta)$ de la fuente en función del ángulo θ entre una dirección determinada y la normal al plano de la superficie emisora

El semiángulo para el cual la intensidad es la mitad de la intensidad máxima (θ a -3 dB) es de 16° (Anexo D)

La intensidad energética es máxima para $\cos\theta = 1$, es decir, $\theta = 0$. Por tanto sigue la normal y es igual a I_0 .

Se obtiene El valor de m , para obtener el diagrama de radiación.

$$I(\theta) = I_0(\cos\theta)^m$$

considerando θ a media potencia:

$$I(\theta) = \frac{I_0}{2} = I_0(\cos\theta)^m$$

$$\frac{I_0}{2} = I_0(\cos\theta)^m$$

$$0.5 = (\cos 16^\circ)^m$$

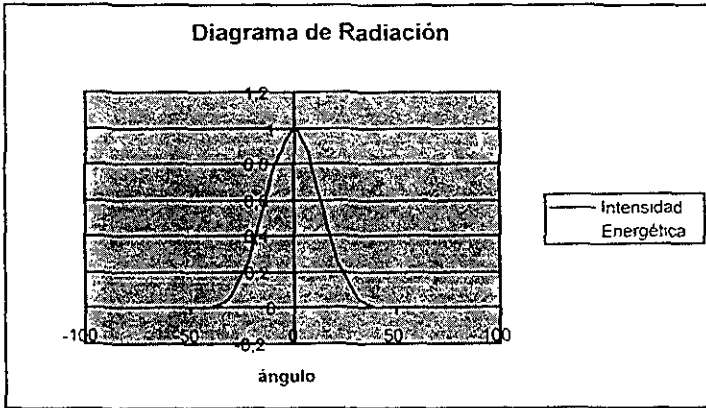
$$\log 0.5 = \log(\cos 16^\circ)^m$$

$$\log 0.5 = m \log(\cos 16^\circ)$$

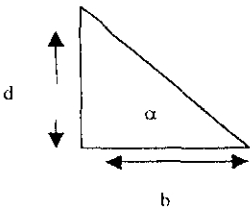
$$m = \frac{\log 0.5}{\log(\cos 16^\circ)}$$

$$m = 17.54$$

Por lo que su diagrama de radiación se aproxima al siguiente:



Para calcular el cono de aceptación del sistema óptico.



$$\alpha_{va} = \tan^{-1}\left(\frac{d}{b}\right)$$

$$\alpha_{va} = \tan^{-1}\left(\frac{5}{30}\right)$$

$$\alpha_{va} = 9.46^\circ$$

para obtener las pérdidas debidas al cono de aceptación del sistema óptico tenemos:

$$D_{1 \lambda va} = 10 \log[1 - (\cos \alpha_{va})^{1754+1}]$$

$$D_{2 \lambda va} \approx 10 \log[1 - (\cos 9.46)^{1754+1}]$$

$$D_{2 \lambda va} \approx -6.49 \text{ dB}$$

Existe también un cono de aceptación de la fibra debido a su apertura numérica, la cual se obtuvo en el laboratorio de una manera experimental utilizando el método de los tres anillos:

Método de los tres anillos

En este método se utiliza una fuente de luz láser con el haz paralelo, la cual se proyecta con distintos ángulos sobre un extremo de la fibra. Al otro extremo se coloca un microscopio. Para los ángulos de entrada del haz menores que el ángulo de entrada máximo, el extremo de salida tiene el núcleo más brillante que la cubierta. Para los ángulos de entrada mayores que el ángulo máximo, el extremo de salida presenta el núcleo más oscuro que la cubierta. Girando la fuente de luz hasta detectar un anillo luminoso en la interfaz entre el núcleo y la cubierta se obtiene el ángulo de entrada máximo α_{oM} del cono de admisión.

Se realizaron tres medidas y se obtuvo el valor promedio:

Ángulo Máximo	Apertura Numérica = seno α_{oM}
$\alpha_{oM 1} = 23.5$	A.N. ₁ = 0.39
$\alpha_{oM 2} = 22.5$	A.N. ₂ = 0.38
$\alpha_{oM 3} = 22.0$	A.N. ₃ = 0.37
$\alpha_{oM \text{ prom}} = 22.65$	A.N. _{prom} = 0.39}

Entonces se obtiene un ángulo de admisión de 22.65° , el cual es mayor al cono del sistema óptico, por lo que no existen pérdidas entre el sistema óptico o lente y la fibra óptica.

Influencia de la Reflexión

En general, las pérdidas de Fresnel se refieren a las reflexiones que existen debido a la diferencia en los índices de refracción de dos medios distintos.

En este caso se considera el índice de refracción del cuarzo como:

$$n_{\text{cuarzo}} \approx 1.6$$

Se sabe que el índice de refracción del aire es:

$$n_{\text{aire}} \approx 1$$

por lo que la reflexión de Fresnel se puede calcular.

$$\rho = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2$$

$$\rho \approx \left(\frac{1.6 - 1}{1.6 + 1} \right)^2 \approx 0.053$$

La pérdida debida a la reflexión (Pérdida de Fresnel), se escribe.

$$D_R = 10 \log(1 - \rho)$$

$$D_R \approx 10 \log(1 - 0.053)$$

$$D_R \approx -0.24 \text{ dB}$$

Dado que existen varias lentes y el cubo, se obtiene que son 7 los cambios de medio que se presentan, por lo que:

$$D_{\text{total}} \approx 7 * D_R$$

$$D_{\text{total}} \approx -1.66 \text{ dB}$$

Esta pérdida es pequeña en comparación con las pérdidas de apertura numérica

Pérdidas debidas al cubo divisor de haz:

El cubo divisor de haz tiene la propiedad de transmitir aproximadamente el 50% de la potencia y reflejar el 50% restante, por lo que se adicionará una pérdida debida al cubo de 3dB.

$$D_i \approx -3 \text{ dB}$$

Pérdida total del sistema:

La pérdida total del sistema es entonces la suma de todas las pérdidas mencionadas anteriormente

$$D_{total} = D_s + D_{\text{trans}} + D_R + D_i$$

$$D_{total} \approx -9.29 - 6.49 - 1.66 - 3$$

$$D_{total} \approx -20.44dB$$

Esto indica que se perdió aproximadamente 112 veces la potencia inicial de la fuente, es decir que al final del sistema óptico se tiene una potencia final máxima 112 veces menor a la inicial.

$$D_{total} = 10 \log \frac{P_{salida}}{P_{entrada}}$$

$$P_{salida} = 10^{D_{total}/10} * P_{entrada}$$

$$P_{salida} = 10^{-2.04} * 4.60 * 10^{-1} = 41.95 \mu W$$

Evaluando la eficiencia del sistema se tiene

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} * 100 = \frac{41.95 * 10^{-6}}{4.60 * 10^{-1}} * 100 = 0.91\%$$

A pesar de que la eficiencia del sistema es muy baja, se puede ver que la sensibilidad del espectrofotómetro es elevada, ya que si puede realizar lecturas de estos niveles de potencia tan reducidos

V.5. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en este capítulo se puede concluir que el ojo presenta una respuesta distinta a cada color o longitud de onda, para el color rojo presenta mayor sensibilidad que para el color azul. En el sistema fotométrico, que es análogo a la sensibilidad de ojo, se tiene que el LED rojo es más intenso que el azul, pero al realizar la conversión al sistema radiométrico se observa que el LED azul es más potente que el rojo. Por ello, al tener ambos LEDs encendidos se observa más brillante el rojo, aunque el LED azul sea más potente. El espectrofotómetro también detecta con mayor potencia el LED rojo, esto debido a que funciona similarmente al sistema fotométrico.

Es importante mencionar que estos LEDs son indicadores, es decir que no están diseñados para acoplarse con una fibra óptica y mucho menos para un sistema de telecomunicaciones, por lo que tenemos grandes pérdidas en el sistema.

Las múltiples pérdidas que afectan al sistema implementado en la práctica provienen de diversos factores, sin embargo, las pérdidas más significativas son debidas a la diferencia entre las áreas efectivas de emisión de la fuente y el área de la fibra. Otro de los factores que afectan considerablemente al sistema es la pérdida debida a la diferencia entre el diagrama de radiación de los LEDs y el cono de admisión de las lentes. Aunque el resto de las pérdidas consideradas individualmente son menores, al sumarse decremantan de una manera importante la potencia final del sistema.

La eficiencia del sistema pueden reducirse bastante si se utilizan LEDs con un área de emisión comparable al diámetro de la fibra, es decir, más directivos con el propósito de reducir las pérdidas relacionadas al diagrama de radiación y el cono de admisión de las lentes. Estas pérdidas se pueden reducir si se colocan lentes que admitieran la mayoría de los rayos emitidos por las fuentes.

Del mismo modo, el sistema se puede optimizar si se utilizan fuentes con adaptadores para fibra y se conectara con un acoplador de fibra tipo Y, obteniendo pérdidas notablemente menores minimizando casi totalmente las pérdidas por acoplamiento, por cono de emisión y de apertura y por el divisor de haz. Las pérdidas por diferencia de área se reducirían sensiblemente

Finalmente, se puede observar que el sistema cumple con el objetivo de llevar a cabo la Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM), y aunque no lo hace de una manera optima, el espectrofotómetro es lo suficientemente sensible para detectar la pequeña cantidad de potencia del haz que entra en la fibra y mostrar claramente el principio de un sistema WDM.

RECEPTOR OPTICO WDM: PROPUESTA SOBRE UN EXPERIMENTO DE LABORATORIO DOCENTE

CONCLUSIONES GENERALES

En el desarrollo de este trabajo se ha logrado cumplir con los objetivos planteados inicialmente e inclusive se han cubierto otros aspectos adicionales.

En un principio el documento ofrece una descripción general de los sistemas de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM). Adicionalmente se explican sus principios de funcionamiento y los elementos y tecnologías en los que se basa la técnica. Por otro lado, se hace una recopilación de los avances vertiginosos de estos sistemas en el campo de las comunicaciones de banda ancha con lo que el lector adquiere una visión general del sistema, entiende su funcionamiento y su alcance además de notar el potencial y la importancia de esta técnica en la tarea de aumentar la capacidad de transmisión de las redes ópticas.

La obra ofrece una descripción detallada de los elementos principales que conforman un Sistema de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM). Después del estudio y análisis de la bibliografía del tema se identificaron las principales características y aplicaciones de cada uno de estos:

- Los transmisores para WDM deben proveer estabilidad y selectividad de longitud de onda transmitida para prevenir filtraciones en las longitudes de onda (canales) adyacentes sobre todo, cuando se trata de incrementar la densidad de canales
- Las fibras utilizadas en WDM deben cumplir ciertas características, en la actualidad existen métodos para corregir las limitantes de la fibra evitando la dispersión y la atenuación en la fibra. Además, por medio de filtros y amplificadores se pueden realizar correcciones para mejorar la transmisión.
- Los sistemas WDM, se basan principalmente en las características de los amplificadores ópticos de fibra óptica dopada que compensan las pérdidas de potencia de la señal durante su trayectoria. Las características que determinan el desempeño de los amplificadores son: ancho de banda, ganancia, ganancia plana, potencia de salida, y figura de ruido

- Un elemento que ha venido a revolucionar tanto las comunicaciones ópticas como los dispositivos electroópticos son los filtros ópticos, los cuales además de un vasto potencial son indispensables para la construcción de prácticamente todos los elementos involucrados en los sistemas WDM. Dentro del campo de los filtros ópticos se encuentran las rejillas de Bragg una tecnología tan poderosa como la propia técnica de WDM que a pesar de su reciente descubrimiento (mediados de los 80's) ha tenido gran campo de aplicación. El potencial de las rejillas es comparado por los especialistas con el que tuvo el microprocesador para la electrónica. Las rejillas han permitido a la técnica de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) multiplicar su capacidad.
- El equipo de transmisión que lleva a cabo la Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) en sistemas de alta capacidad se ha desarrollado ampliamente en los últimos años. Los sistemas WDM están aprovechando la gran cantidad de ancho de banda de las fibras ópticas y la disposición de los amplificadores ópticos de fibra dopada con erbio (EDFA). La disponibilidad de fibras ópticas monomodo y de dispersión corrida con dispersión cero fuera de las ventanas de transmisión han sido factores fundamentales para la evolución de los sistemas de Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM).

Adicionalmente, se han descubierto nuevas bandas (ventanas) de transmisión donde los Amplificadores Escalables y las nuevas tecnologías de amplificación han permitido multiplicar el número de canales disponibles. Sin embargo, como hemos mencionado el desarrollo de las tecnologías mencionadas hubiera sido imposible sin la implementación en su diseño de filtros de alto rendimiento y con gran selectividad.

Por otro lado, el experimento definitivo es el resultado de un exhaustivo estudio de los elementos disponibles tanto en el Departamento como en los catálogos de los distribuidores de componentes ópticos y electrónicos. De igual manera, se estudiaron los fundamentos ópticos para determinar el diseño y la implementación de las propuestas para el experimento.

Una vez implementadas las propuestas se realizó una evaluación tanto de su desempeño como de su complejidad, accesibilidad y costo. Con base en la evaluación se eligió la mejor opción y se llevó a cabo su construcción.

El estudio comparativo realizado es una aportación a los *laboratorios docentes de nivel superior* ya que *no se había realizado un análisis evaluando estas dos propuestas lo cual tiene un valor científico y experimental al aportar y descartar experimentos de multiplexación*. Además, se soportan las decisiones con la exposición de ventajas y desventajas que se presentan

Adicionalmente existe un reporte detallado de las actividades experimentales efectuadas en el desarrollo de la propuesta así como las direcciones tomadas en la *resolución de problemas lo cual también representa un beneficio al brindar respuestas a la resolución de problemas*.

Un resultado más de este trabajo es la elaboración de una Propuesta sobre un experimento de laboratorio docente sobre un sistema WDM para el Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la UNAM que cumple con los objetivos propuestos de demostrar el principio de funcionamiento de un Receptor Óptico para la Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM) y se presentan las similitudes logradas con un sistema real.

Del mismo modo se presentan recomendaciones para aumentar la eficiencia del sistema, la cual se podría optimizar utilizando LEDs con un área de emisión comparable al diámetro de la fibra o LEDs más directivos para reducir las pérdidas relacionadas al diagrama de radiación y el cono de admisión de las lentes, o bien estas mismas pérdidas se pueden reducir colocando lentes que admitan la mayoría de los rayos emitidos por las fuentes.

El trabajo también presenta los temas adicionales que se utilizaron para el desarrollo de la tesis y que describen de manera clara los conceptos de radiometría y fotometría. El Sistema de medidas radiométricas y fotométricas, el ángulo sólido y sistema de lentes así como las especificaciones de los dispositivos utilizados en el experimento propuesto se incluyen en los anexos.

Finalmente, la obra ofrece las bases para futuros trabajos relacionados con experimentos docentes sobre la Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM).

En resumen

Se desarrolló un experimento para el laboratorio docente que permite a los alumnos de Ingeniería en Telecomunicaciones conocer y comprender el principio básico de la técnica de Multicanalización, así como los elementos que lo conforman. Además, se muestra a los futuros ingenieros en telecomunicaciones el funcionamiento de esta poderosa técnica

Adicionalmente, el trabajo documental *ofrece una amplia descripción* de los Sistemas Ópticos de Multicanalización por División de Longitud de Onda resultado de la compilación, análisis y sistematización de la literatura especializada publicada a nivel internacional principalmente en forma de artículos, aportando así, un documento de carácter monográfico dirigido a los futuros ingenieros especializados en telecomunicaciones y áreas afines ya que debido a la actualidad del tema la disponibilidad de libros es escasa.

En otras palabras este trabajo representa en una sola obra la información básica, reciente y sistematizada sobre la Multicanalización por División de Longitud de Onda, escrita en español donde la información disponible sobre el tema es prácticamente inexistente.

REFERENCIAS

- A Inoue. **Great Gratings**. Photonics Spectra, Agosto 2000.
- Allen H. Cherin. *An Introduction To Optical Fibers*. Mc. Graw Hill. USA 1983.
- Brandon C. Collings; Matthew L. Mitchell; Luc Boivin. *A 1021 Channel WDM System*. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, No. 7. Julio 2000.
- Brian Lawrence; Michael Shimazu. *Waveguide amplifiers bring integration benefits*. WDM solutions. Noviembre 2000.
- Carter Houghton. *EDFAs ready to amplify the metro market*. WDM Solutions. Agosto 2000.
- Charles T. Whippie. *Amplifier Transmits 3.2 Tb/s over 1500 Km*. Photonics. Julio 2000.
- Chung-En Zah; Amersfoort M R.; Pathak, B.N. *Multiwavelength DFB laser arrays with integrated combiner and optical amplifier for WDM optical Networks*. Selected Topics in Quantum Electronics. IEEE Journal. Octubre 1996
- Dan Sadot; Efrain Boimovich. *Tunable optical filters for dense WDM network*. IEEE Communications Magazine, Vol. 36, No. 12, December 1998.
- Dhruvad A. Trivedi; Toby Strite; Gerlas Van den Hoven. *EDFAs pump up the power again and again*. WDM solutions. Abril 2000.
- EO. *2000 Optics and Optical instruments Catalog*. Edmund Industrial Optics. EUA. 2000
- Eugene Hecht; Alfred Zajac. *Óptica*. Addison Wesley Iberoamericana. EUA 1986.
- Eugene Rudkevich; Feenix Y. Pan. *Understanding polarization-mode dispersion*. WDM Solutions. Junio 2000.
- F. Tong; C. S. Li; and G. Berkowitz. *A 32-Channel Tunable Receiver Module for Wavelength Division Multiple Access Networks*. IEEE Photon Tech Lett., vol 9, no.11, 1997, pp 1523-25.
- Frank Tong. *Multiwavelength Receivers for WDM Systems*. IEEE Communications Magazine. Diciembre 1998.
- J P Laude. *Wavelength Division Multiplexing*. Prentice Hall International Paris 1993

- Jaafar M.H. Elmirghani, Hussein T. Mouftah *Technologies and Architectures for Scalable Dynamic Dense WDM Networks*. IEEE Communications Magazine. Vol. 38 No. 2. Febrero 2000.
- Jeff Hecht. *WDM systems brook no interference*. Laser Focus World. Junio 2000.
- José Martín Sanz. *Comunicaciones Ópticas*. Parainfo. España 1996.
- K Okamoto, *et al*. *16 channel optical add/drop multiplexer consisting of arrayed waveguide gratings and double-gate switches*. *Elect. Lett.*, vol. 32, no. 116. Ago. 1996.
- Kevin Zhang; Lesley Rogers. *Bandwidth-expandable EDFA offers options for growth*. WDM solutions. Agosto 2000.
- L. D. Garrett *et al*. *Performance of eight channel OEIC pin/HBT receiver array in 8 x 2.5 Gb/s WDM transmission system*. *J. Lightwave Tech.*, vol. 15, no. 5, 1997.
- M K. Smit; C. Van Dam. *PHASAR-based WDM-devices: principles, design and applications*. *IEEE j Sel Topics Quantun Elect*, vol. 2, no. 2, 1996.
- Marco Listanti; Vincenzo Eramo. *Architectural and Technological Issues for Future Optical Internet Networks*. IEEE Communications Magazine. Vol. 38, No. 9. Septiembre 2000
- Miyamoto Y *40-Gbit/s transport system: its WDM upgrade*. Optical Fiber Communication Conference Marzo 2000.
- Néj G Dunay. *DWDM permeates networks from access to ultralong-haul*. WDM solutions Noviembre 2000.
- Raman Kashyap. *Fiber Bragg Gratings*. Academic Press. USA. 1999
- Robinson M., Wright I. *Realisation of 320 Gbit/s transmission*. Multiwavelength Optical Networks: Devices, Systems and Network Implementations. IEEE Colloquim. Junio 1998
- Rod C. Alferness; Herwing Kgelnik; Thomas H wood . *The Evolution of Optical Systems*. Bell Labs Technical Journal. January-March 2000.
- Suzuki, m. *Long haul and high capacity WDM undersea cable technologies*. Lasers and Electro-optics The Pacific Rim Conference Septiembre 1999
- Svirid Vladimir *Apuntes de Comunicaciones Ópticas*. 2000.

GLOSARIO

- **ADM**- Multiplexor segregador agregador (*Add Drop Multiplexer*)
- **ASE**- Emisión Espontánea Amplificada (*Amplified Spontaneous Emission*)
- **ATM**- Modo de Transferencia Asíncrona (*Asynchronous Transfer Mode*)
- **AWG**- Arreglo de Guías de Onda con Rejillas (*Arrayed Waveguide Gratings*)
- **BA/D**- Filtro de Banda Agregar/Segregar (*Bandwidth Add/Drop filter*)
- **Banda C** - Banda de Transmisión de longitudes de onda largas 1530nm-1560nm. (*Long-Wavelength Transmission Band*)
- **Banda C roja** - Banda Convencional Roja: comprende las longitudes de onda de 1540-1563 nm.
- **Banda L** - Banda de Transmisión Convencional. 1570nm-1610nm. (*Conventional Transmission Band*)
- **CATV**- Televisión por cable (*Cable Television*)
- **DBR**- Reflector de Bragg Distribuido (*Distributed Bragg Reflector*)
- **DCM**- Módulo de Compensación de la Dispersión (*Dispersion-Compensate Module*)
- **DFB**- Realimentación Distribuida (*Distributed Feedback*)
- **DS**- Dispersión Corrida (*Dispersion Shifted*)
- **DWDM**- Multiplexación por División de Longitud de Onda Denso (*Dense WDM*)
- **EDFA**- Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*)
- **FBG**- Fibras con rejillas de Bragg (*Fiber Bragg Gratings*)
- **FP**- Fabry-Perot
- **FTTH** - Fibra hasta el Hogar (*Fiber To The Home*)
- **FTTR**- Esquema de Transmisor Sintonizable Fijo Y Receptor Sintonizable (*Fixed Tuned Transmitter and tunable receiver scheme*)
- **HDI**- Interconexión de Alta Densidad (*High Density Interconnect*)
- **HFC**- Híbrido fibra-coaxial (*Hybrid Fiber-Coax*)
- **IC**- Circuito Integrado (*Integrated Circuit*)
- **ITU** - Unión Internacional de Telecomunicaciones (*International Telecommunication Union*)
- **LAN**- Red de Área Local (*Local Area Network*)
- **LD**- Diodo Láser (*Laser Diode*)
- **LED**- Diodo electroluminiscente (*Light Emission Diode*)

-
- **MCVD**- Preforma por Depósito Interno (Modified Chemical Vapour Deposition)
 - **NBA**- Amplificador de Banda Estrecha. (Narrow Band Amplifier)
 - **NBF**- Filtro de Banda Estrecha. (Narrow Band Filter)
 - **NDSF**- Fibra óptica de dispersión corrida (Non-Dispersion-Shifted-Fiber)
 - **NGLN**- Red de Ondas de Luz de la Próxima Generación (Next-Generation Lightwave Network)
 - **NZDSF** – Fibra con Dispersión Corrida No-Cero (Non Zero Dispersion Shifted Fiber)
 - **OADM**- Multiplexor Segregador Agregador Óptico (Optical Add Drop Multiplexer) **OC-N**- Portadora óptica en un Sistema SONET (Optical Carrier Digital Signal Rate Of N*51.840 Mb/S In A SONET System)
 - **OGD**- Controlador de ganancia (Optical Gain Driver)
 - **OGM**- Modulo de Ganancia Óptica (Optical Gain Module)
 - **ONU**- Unidad de Red óptica (Optical Network Unit)
 - **PON**- Red Óptica Pasiva (Passive Optical Network)
 - **RF** – Radio Frecuencia (Radio Frequency)
 - **SDH**- Jerarquía Digital Síncrona (Synchronous Digital Hierarchy)
 - **SM**- Monomodo (Single Mode)
 - **SONET**- Red Óptica Síncrona (Synchronous Optical Network)
 - **TDM**- Multiplexación por División de Tiempo (Time Division Multiplexing)
 - **TDMA**- Acceso Múltiple por División de Tiempo (Time Division Multiple Access)
 - **TE**- Modo Eléctrico Transversal (Transverse Electric mode)
 - **TM**- Modo Magnético Transversal (Transverse Magnetic mode)
 - **TTFR**- Esquema de Transmisor Sintonizable Y Receptor Sintonizable Fijo (Tunable Transmitter and fixed tuned receiver scheme)
 - **TWAS**- Amplificadores de Onda Viajera (Travelling Wavelength Amplifiers)
 - **TWA**- Amplificador de Onda Viajera (Traveling Wave Amplifier)
 - **WDMA**- Acceso por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiple Access)
 - **WDM**-Multiplexación por División de Longitud de Onda (Wavelength Division Multiplexing)

ANEXO A

RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA

La luz es la porción visible del espectro de radiación electromagnética. Aunque la energía radiante es un fenómeno físico, se dice que la visión es de naturaleza psicofísica o subjetiva. Así, aunque la *energía radiante tiene propiedades bien definidas y físicamente medibles, la visión sólo puede medirse por medio de técnicas subjetivas. Algunas respuestas biológicas objetivamente registrables, como la constricción pupilar o hechos eléctricos registrables desde la retina o corteza cerebral, están estrechamente relacionados con la visión. Pero representan hechos paralelos más o menos crudos y alejados cuando se comparan con la complejidad exquisitamente sensible y ricamente diversa de la experiencia visual. Aunque hechos fisiológicos objetivamente registrables en ocasiones son útiles para evaluar el estado del sistema visual, las medidas más sensibles de función visual son de naturaleza psicofísica. Dependen de respuestas subjetivas, en las cuales los sujetos humanos son usados como si fueran instrumentos de medición. Los ejemplos típicos de tales pruebas incluyen los umbrales absolutos de percepción luminosa, comparación de luces de prueba con luces estándares y detección de diferencias apenas notables cuando las luces de prueba se alteran de alguna forma. Algunas funciones del sistema visual humano son extraordinariamente sensibles. El ojo humano adaptado a la oscuridad puede detectar un destello de luz cuando la retina absorbe tan poco como una docena de fotones. Este umbral rivaliza con la sensibilidad de las mejores emulsiones fotográficas.*

La luz es el estímulo adecuado para la visión y es la porción del espectro electromagnético que cae en el espectro de longitudes de onda de aproximadamente 400 a 750 nm

Hay dos formas diferentes con las cuales puede detectarse la luz. La primera involucra el uso de técnicas de medición físicas (radiometría), mientras que la segunda emplea métodos psicofísicos en los cuales se recurre a sujetos humanos para detectar y comparar las sensaciones visuales producidas por la luz (fotometría). Las medidas radiométricas de radiación electromagnética involucran la caracterización de su frecuencia, su contenido de energía y su distribución de tiempo y espacio. Las medidas fotométricas involucran la detección y comparación de luces por las sensaciones de color y brillo.

El brillo visto por observadores humanos no es una simple función del contenido de energía de la luz. Distintas longitudes de onda de la luz tienen diferentes eficacias para la producción de sensaciones visuales. Longitudes de onda subjetivamente identificables como verde son más eficaces para estimular una sensación visual, mientras que aquellas que producen la sensación de azul o rojo requieren niveles mucho más altos de energía para producir niveles equivalentes de brillo subjetivo.

Radiometría

La metodología de la detección y cuantificación físicas de la radiación electromagnética constituye el campo de la radiometría. Esto debe diferenciarse del uso del ojo como un instrumento de detección para la medición de la porción visible del espectro electromagnético. Esto, llamado "fotometría".

Los términos para la expresión de las dimensiones físicas de la radiación electromagnética especifican las distribuciones temporal y espacial de cantidades de energía radiante. Estas cantidades (U) se miden en unidades básicas de ergios o joules. Un joule es igual a 10^7 (10 millones) ergios.

Sin embargo, las cantidades de energía radiante solas son insuficientes para describir la distribución de la energía radiante en cualquier sistema. También debe especificarse la velocidad de transferencia (flujo) de energía. El flujo de energía por unidad de tiempo (t) se denomina potencia (P) y la unidad estándar de poder radiante es el watt. Un watt se define como 1 joule de flujo de energía por segundo.

$$P = U/t = \text{joules/seg} = \text{watts}$$

Habiendo definido potencia, también debemos especificar las dimensiones espaciales dentro de las cuales ocurre el flujo de energía. La intensidad radiante (J) es una medida de la radiación propagada en una dirección dada. Es el flujo de energía, o poder radiante, emitido desde una fuente puntual y propagado en una dirección especificada. Para fuentes de luz que emiten en forma uniforme, cortes transversales de un ángulo sólido con su vértice en la fuente pueden mostrar una distribución uniforme de energía. Es decir, que la relación de potencia con el área transversal del ángulo sólido es una constante. El esterradián (w) es la unidad métrica usada para la expresión del ángulo sólido

La intensidad radiante se define como el límite de la relación de potencia con el ángulo sólido en el cual está contenida, a medida que el ángulo se acerca a un valor de cero en la dirección de interés:

$$J = \frac{dP}{d\omega} \text{ watts / esterradianes}$$

La irradiancia (H) es el poder radiante que incide en una unidad de superficie. Es directamente proporcional a la intensidad de la fuente de luz y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente y la superficie sobre la cual incide la energía. Para un punto dado en la superficie, y de la misma forma que para intensidad radiante, la irradiancia se define como el límite de la relación de poder radiante y área (A), a medida que el área se aproxima a un valor de cero en el punto de interés:

$$H = \frac{dP}{dA} \text{ watts / m}^2$$

La excitancia radiante (M), algunas veces denominada "emitancia" está muy relacionada con la irradiancia y se expresa en las mismas unidades de watts por metro cuadrado. Es el poder radiante por unidad de área que es emitido desde un punto sobre una superficie, ya sea que se trate de una fuente primaria (un emisor de luz) o una fuente secundaria (un reflector de luz).

La radiancia (N) es el poder radiante emitido desde un punto sobre una superficie extensa y con una dirección específica. Se expresa en watts por unidad de ángulo sólido y unidad de área. Dado que las superficies amplias son fuentes de luz que emiten o reflejan, en forma imperfecta, la energía emitida desde puntos sobre tales superficies puede variar con la dirección de propagación. La radiancia (N) se define como el límite de la relación de poder con la sección transversal del ángulo sólido y el área de superficie, a medida que estas dos últimas dimensiones se acercan a un valor de cero en el punto y dirección de interés. También puede expresarse como eficacia radiante (M) desde un punto dado sobre una superficie y en una dirección específica.

$$N = \frac{dM}{d\omega} \text{ watts/(esterradianes * m}^2\text{)}$$

Los términos radiométricos y sus unidades se presentan a continuación.

<i>Término radiométrico</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Derivación</i>	<i>Unidades</i>
Energía radiante	U	Fuerza * distancia	Joules o ergios
Flujo radiante	P	dU/dt	Watts
Intensidad radiante	J	dP/dw	Watts/esterradianes
Irradiancia	H	dP/dA	Watts/m ²
Excitancia radiante	M	dP/dA	Watts/m ²
Radiancia	N	dM/dw	esterradianes

Fotometría

A cada término de medida radiométrica le corresponde una dimensión análoga de medida fotométrica. Las cantidades fotométricas pueden derivarse directamente de sus equivalentes radiométricos multiplicando la cantidad radiométrica por V_λ , el coeficiente de luminosidad fotópica. La función V_λ está representada por la curva de eficiencia luminosa fotópica estándar ilustrada en la siguiente figura:

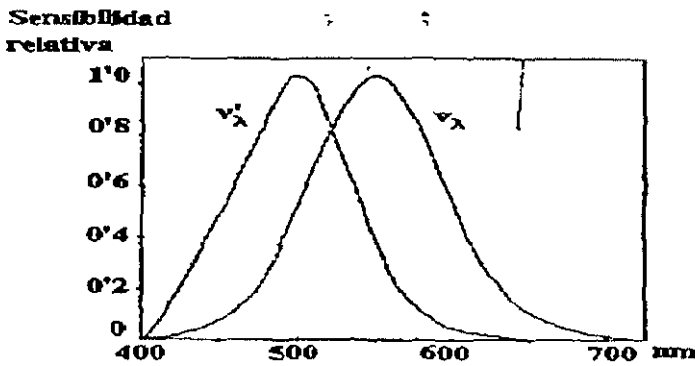


Figura 1.1 Eficiencia luminosa fotópica estándar

Tabla de Valores para cada Longitud de Onda

Longitud de onda λ (nm)	Curva de visibilidad fotópica V_{λ}	Curva de visibilidad escotópica V_{λ}^{\prime}
380	0.00004	0.0006
390	0.00012	0.0022
400	0.0004	0.0093
410	0.0012	0.0348
420	0.0040	0.0966
430	0.0116	0.1998
440	0.023	0.3281
450	0.038	0.455
460	0.060	0.567
470	0.091	0.676
480	0.139	0.793
490	0.208	0.904
500	0.323	0.982
510	0.503	0.997
520	0.710	0.935
530	0.862	0.811
540	0.954	0.650
550	0.995	0.481
560	0.995	0.3288
570	0.952	0.2076
580	0.870	0.1212
590	0.757	0.0655
600	0.631	0.0332
610	0.503	0.0159
620	0.381	0.0074
630	0.265	0.0033
640	0.175	0.0015
650	0.107	0.00068
660	0.061	0.00031
670	0.032	0.00015
680	0.017	0.000072

690	0.0082	0.000035
700	0.0041	0.000018
710	0.0021	0.000009
720	0.00105	0.000005
730	0.00052	0.000003
740	0.00025	0.000001
750	0.00012	0.000001
760	0.00006	
770	0.00003	
780	0.000015	

En visión nocturna, la visibilidad se desplaza hacia las cortas longitudes de onda; el valor máximo de las visibilidades es ahora $V_\lambda = 510$ nm. (visibilidad escotópica).

Obsérvese que los cálculos de cantidades fotométricas basados en sus equivalentes radiométricos deben hacerse sobre una base dependiente de la longitud de onda. Esto se debe a que el coeficiente de luminosidad fotópica varía continuamente con la longitud de onda

Los equivalentes fotométricos de medida radiométrica requieren integración a través del espectro de longitudes de onda visibles y dependen de una caracterización espectral completa de las cantidades radiométricas de las cuales derivan las medidas fotométricas. La medida de energía radiante (U) tiene su equivalente fotométrico en la "energía luminosa"(Q), una medida psicofísica de la cantidad de luz, evaluada según su capacidad para producir una sensación visual de brillo. Mientras que la energía radiante se expresa en ergios o joules, la energía luminosa se expresa en las unidades psicofísicas de lumen segundos. Este valor puede derivar de la distribución espectral de energía radiante (U) por integración.

$$Q = 683 \int_{400}^{750} V_\lambda U_\lambda d_\lambda$$

donde V_λ es la función del coeficiente de luminosidad fotópica V_λ es un coeficiente sin dimensión que tiene un valor máximo de 1 con 555 nm El número 683 es la constante de conversión: el valor de lúmenes por watt con la misma longitud de onda (555 nm)

El flujo luminoso (F) es el equivalente fotométrico del flujo radiante (P) Representa la velocidad de transferencia (flujo) de energía, evaluado según su capacidad para producir una sensación visual. Dado que la energía luminosa se mide en unidades de lúmenes segundos, F, que es la energía luminosa por unidad de tiempo, se expresa en lúmenes

La intensidad luminosa (I) es el equivalente fotométrico de la intensidad radiante (J). Representa el flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección específica. Se expresa en candelas, las cuales se calculan como lúmenes por esterradianes.

La iluminancia (E) es el equivalente fotométrico de la irradiancia (H). Es el flujo luminoso que incide en una superficie por unidad de área y se expresa en lux, unidad que tiene las dimensiones de lúmenes por metro cuadrado. Una unidad alternativa de iluminancia es el "pie candela", medido como lúmenes por pie cuadrado.

Quizá la medida fotométrica más comúnmente usada sea la luminancia. La luminancia (L) es el equivalente fotométrico de la radiancia (N) y es la intensidad luminosa (I) por unidad de área visible de una fuente de luz superficial (ya sea que emite o refleja). Sus unidades son las de intensidad luminosa por unidad de área de fuente superficial expresado como candelas por unidad de área, candelas por m².

Los términos de medida fotométrica y sus diversos símbolos se resumen en el siguiente cuadro:

Término Fotométrico	Símbolo	Derivación	Unidades
Energía luminosa	Q	$683 \int_{400}^{750} V_{\lambda} U_{\lambda} d_{\lambda}$	Lumen segundos
Flujo luminoso	F	dQ/dt	Lúmenes
Intensidad luminosa	I	dQ/dw	Lúmenes/esterradianes (candelas)
Iluminancia	E	dQ/dA	Lúmenes/m ² (lux)
Luminancia	L	dt/dA	Candelas/m ² (nits)

REFERENCIAS

Mariano Aguilar; Felipe Mateos. **Óptica Fisiológica**. Tomo 1 Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia, 1993

ANEXO B

LENTES DELGADAS Y SISTEMAS DE LENTES

Una lente es una placa de vidrio cuyas caras son por lo general esféricas y casi paralelas en el centro de ella. Consideremos un haz de rayos paralelos incidiendo a una lente muy delgada. Si la lente hace que los rayos refractados converjan, se dice que la lente es convergente, y si hace que diverjan, la lente es divergente. También se dice que una lente divergente es negativa y que una convergente es positiva.

Si el medio que rodea a la lente es menos denso que el material con que está hecha la lente, una lente más delgada en su centro que en su periferia es divergente y una más gruesa en su centro que en su periferia es convergente. Las lentes delgadas pueden tener cualquier de las formas que se muestran en la siguiente figura

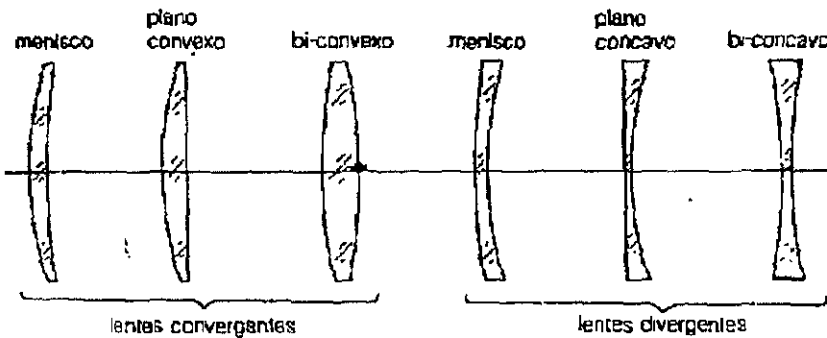
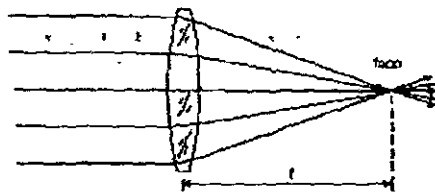
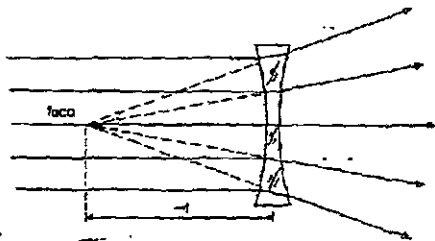


Figura II 1 Formas que pueden tener las lentes delgadas

Si la lente tiene dos superficies esféricas, el eje óptico es una línea imaginaria que pasa por los centros de curvatura de ambas superficies. Si la lente tiene una superficie esférica y una plana, el eje óptico es una línea imaginaria perpendicular a la superficie plana que pasa por el centro de curvatura de la otra superficie. Es fácil ver con estas definiciones que el eje óptico pasa por la parte más gruesa o más delgada de la lente, según sea convergente o divergente respectivamente.



a) Lente convergente



b) Lente divergente

Figura 11.2 Focos y distancias focales en lentes delgadas convergentes y divergentes

El foco de una lente se define como el punto de convergencia de los rayos luminosos cuando éstos llegan a la lente en un haz de rayos paralelos entre sí y al eje de la lente. En una lente divergente el foco es el punto de convergencia de las prolongaciones de los rayos refractados. La distancia focal de una lente delgada es la distancia de la lente al foco, siendo positiva para una lente convergente y negativa para una divergente.

La potencia P de una lente se define como el recíproco de la distancia focal f :

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \tag{B-1}$$

Si la distancia focal se mide en metros, la potencia queda expresada en dioptrías

Existe una fórmula para lentes delgadas, la cual se puede encontrar aplicando la fórmula de Gauss a ambas caras de la lente

Así, para la primera superficie tenemos:

$$\frac{N'_1}{l_1} - \frac{N_1}{l'_1} = \frac{N'_1 - N_1}{r_1} \tag{B-2}$$

donde las distancias l_1 y l'_1 están ilustradas en la figura III.3. Haciendo lo mismo para la segunda superficie:

$$\frac{N_2}{l_2} - \frac{N'_2}{l'_2} = \frac{N'_2 - N_2}{r_2} \tag{B-3}$$

El índice de refracción de la lente es N , por lo que podemos observar que:

$$N'_1 = N_2 = N \tag{B-4}$$

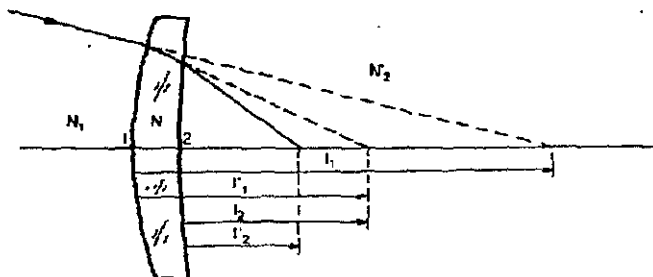


Figura II 3 Refracción de un rayo luminoso meridional en una lente delgada

Los índices N_1 y N'_2 son en general igual a 1, pero no siempre, ya que una de las caras de la lente puede estar en contacto con aceite o con agua. Si el grueso de la lente es muy pequeño comparado con la distancia, podemos escribir aproximadamente:

$$l_2 = l'_1 \tag{B-5}$$

por lo que sustituyendo las ecuaciones B-4 y B-5 en las ecuaciones (B-2) y (B-3), obtenemos

$$\frac{N}{l_2} - \frac{N_1}{l_1} = \frac{N - N_1}{r_1} \tag{B-6}$$

$$\frac{N_2}{l_2} - \frac{N}{l_2} = \frac{N'_2 - N}{r_2} \tag{B-7}$$

Sumando estas dos expresiones miembro a miembro, resulta:

$$\frac{N'_2}{l_2} - \frac{N_1}{l_1} = \frac{N'_2 - N}{r_2} - \frac{N - N_1}{r_1} \quad (\text{B-8})$$

donde l_1 y l_2 son las distancias del objeto y de la imagen, respectivamente, a la lente. Estas distancias siguen la convención de signos introducida anteriormente.

Supongamos el caso particular en que el objeto está a una distancia infinita y por lo tanto los rayos luminosos llegan a la lente en un haz de rayos paralelos entre sí y el eje óptico. En este caso N_1/l_1 es cero y l_1 es por definición, igual a la distancia focal f_2 . Podemos ver entonces que ambos lados de la ecuación (B-8) son iguales a N'_2/f_2 .

Igualando el lado derecho de la ecuación (B-8) a N'_2/f_2 obtenemos:

$$\frac{1}{f_2} = \frac{N - N_1}{N'_2 r_1} + \frac{N'_2 - N}{N'_2 r_2} \quad (\text{B-9})$$

Si el haz de rayos paralelos viaja de derecha a izquierda, el foco está a la izquierda de la lente. En este caso N'_2/l_2 se hace cero y l_1 es, por definición, la distancia focal f_1 . Por lo tanto, de la misma ecuación (B-8) podemos obtener:

$$\frac{1}{f_1} = \frac{N - N_1}{N'_1 r_1} + \frac{N'_2 - N}{N'_1 r_2} \quad (\text{B-10})$$

De las ecuaciones (B-9) y (B-10) podemos fácilmente concluir que las distancias focales f_2 y f_1 están relacionadas por

$$\frac{N'_2}{f_2} = \frac{N_1}{f_1} \quad (\text{B-11})$$

Consideremos ahora el caso particular, muy común, en que la lente está rodeada de aire ($N'_2 = N_1 = 1$). En estas condiciones las dos distancias focales son idénticas y por consiguiente podemos escribir

$$\frac{1}{f} = (N - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{B-12})$$

Esta es la llamada fórmula del fabricante de lentes, válida únicamente para lentes delgadas rodeadas de aire y considerando rayos paraxiales.

Formación de imágenes

La función primordial de una lente es formar imágenes, por lo que es deseable estudiar esta propiedad de las lentes con cierto detalle.

Es posible igualar ahora el lado izquierdo de la ecuación (B-8) a N_2/f_2 , con lo que obtenemos

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{f_2} - \frac{N_1}{N_2 l_1} \tag{B-13}$$

Pero si $N_1 = N_2$, esta expresión se reduce a:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{l_1} \tag{B-14}$$

Con esta relación podemos calcular la posición de la imagen, dada la posición del objeto y la distancia focal. Las posiciones del objeto y su imagen respectiva sobre el eje óptico se dice que son dos puntos conjugados.

Por la definición de distancia focal, un rayo que llega a la lente paralelo al eje óptico pasa por el foco F_2 . En forma simultánea un rayo que llega al lente después de pasar por el foco F_1 saldrá de ella paralelo al eje óptico. Como se muestra en la siguiente figura el rayo 1 llega paralelo al eje óptico y por lo tanto pasa por el foco F_2 después de refractarse. El rayo 2 pasa por F_1 , por lo que sale de la lente paralelo al eje óptico.

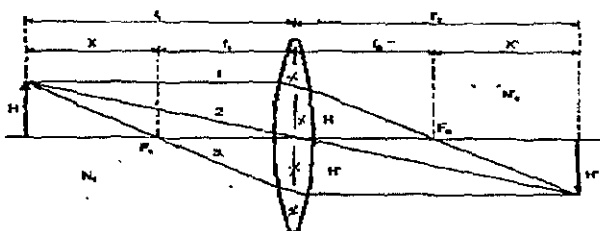


Figura 11.4 Posiciones del objeto y la imagen, o puntos conjugados

Lentes convergentes

La formación de imágenes por medio de lentes convergentes se puede estudiar más fácilmente graficando en un diagrama las posiciones i_2 de la imagen contra las posiciones l_1 del objeto, como se muestra a continuación:

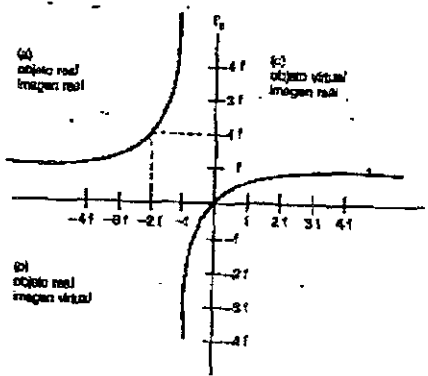
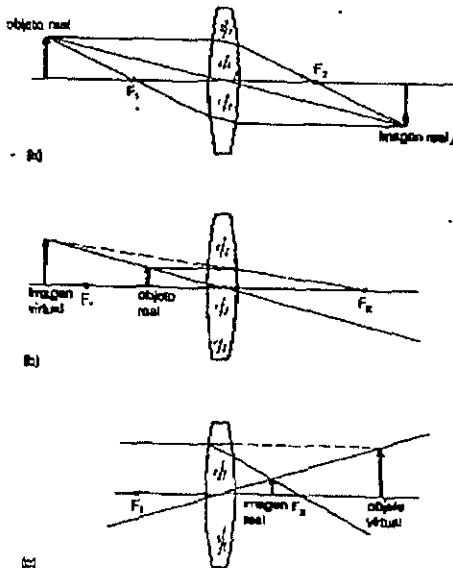


Figura II.5 Posiciones del objeto y la imagen con lentes convergentes

Como se puede observar en esta figura, no es posible con una lente convergente obtener imágenes virtuales con objetos virtuales. Además podemos ver que la imagen pasa bruscamente de real a virtual cuando el objeto pasa por el foco de la lente al irse acercando a ella. Las tres combinaciones posibles de tipos de objeto e imagen que se pueden formar con una lente convergente se ilustran de manera clara en la siguiente figura (II.6)



En la siguiente tabla se tabulan algunos parámetros para los tres casos de combinaciones de objeto e imagen con lentes convergentes

Limites en la posición objeto	$\infty > l_1 > f$ (Real)	$f > l_1 > f/2$ (Real)	$l_1 < f/2$ (Virtual)
Tipo de imagen	Real	Virtual	Real
Signo de l_2	+	-	+
signo de m	-	+	+
Magnitud de m	< 1	> 1	< 1

Lentes divergentes

El diagrama con la gráfica de la posición l_2 de la imagen contra la posición l_1 del objeto se muestra en la figura siguiente:

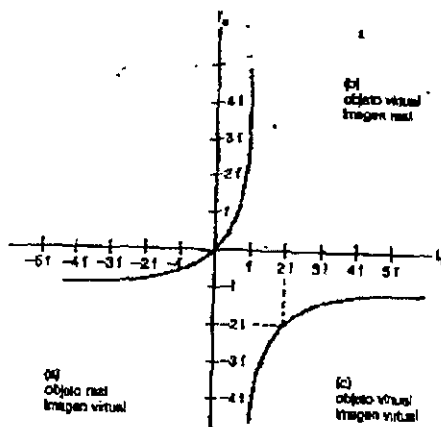


Figura H 7 Posiciones del objeto y la imagen con lentes divergentes

Como se puede observar en esta figura, no es posible con una lente divergente obtener imágenes reales con objetos reales. Además podemos ver que la imagen pasa bruscamente de virtual a real cuando una imagen virtual pasa por el foco F_2 de la lente al irse acercando a ella

En la siguiente tabla se tabulan algunos parámetros para los tres casos de combinaciones de objeto e imagen con lentes divergentes

<i>Limite en la posición objeto</i>	<i>∞ lente (Real)</i>	<i>Lente F_2 (Virtual)</i>	<i>$F_2 < x$ (Virtual)</i>
Tipo de imagen	Virtual	Real	Real
Signo de l'_2	-	+	-
signo de m	+	+	-
Magnitud de m	<1	>1	<1

Las tres combinaciones posibles de tipos de objeto e imagen que se pueden formar con una lente divergente se ilustran de manera clara en la siguiente figura.

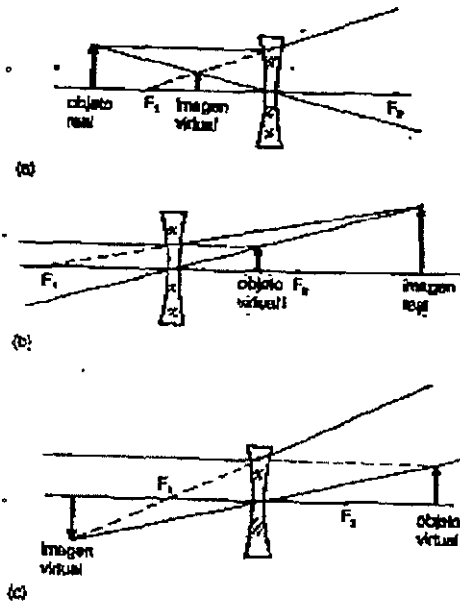


Figura II.8 Tipos de imágenes formadas con lentes divergentes

Sistema de dos lentes delgadas

Un ejemplo de un sistema óptico simple es el sistema formado por dos lentes delgadas separadas por una distancia d mayor que cero.

La distancia focal efectiva se puede calcular con ayuda de la siguiente figura:

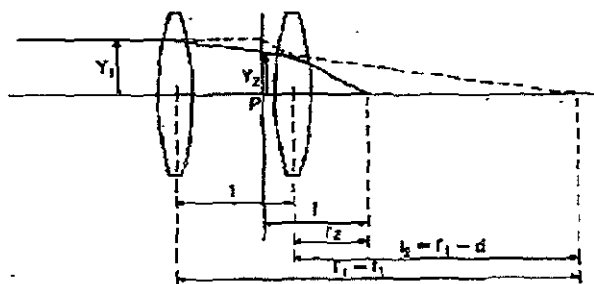


Figura H 9 Distancia focal de un sistema de lentes delgadas

Podemos ver que:

$$\frac{y_1}{F} = \frac{y_2}{f_2} \tag{B-15}$$

y que:

$$\frac{y_1}{f_1} = \frac{y_2}{f_2 - d} \tag{B-16}$$

si eliminamos de las dos últimas ecuaciones y_1 y y_2 :

$$\frac{1}{F} = \frac{f_2 - d}{f_1 f_2} \tag{B-17}$$

pero como la luz llega colimada al sistema tenemos que $l_1 = f_1$, y por lo tanto

$$\frac{1}{F} = \frac{f_2 - d}{f_1 f_2} \tag{B-18}$$

Por otro lado:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \tag{B-19}$$

si las dos lentes están en contacto una con otra, esta expresión se reduce a

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \tag{B-20}$$

REFERENCIAS

Eugene Hecht, Alfred Zajac *Óptica* Addison Wesley Iberoamericana, FUA 1986

ANEXO C

ÁNGULO SÓLIDO

Un plano puede determinarse mediante dos rectas que forman un ángulo θ . Cuando θ varía de 0 a 2π radianes (360°), la región del plano delimitado por las dos rectas varía. De modo que un ángulo permite delimitar una porción finita de un plano.

El ángulo sólido permite determinar una porción finita del espacio alrededor de un punto dado.

Considérese una esfera con centro O y radio R . Tómese sobre la superficie de la esfera, una pequeña superficie A , como se muestra en la figura:

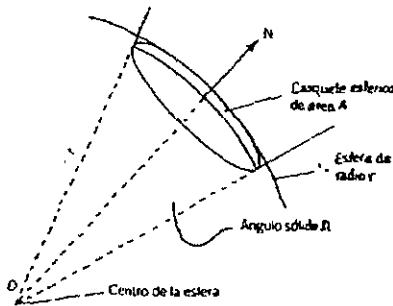


Figura III.1 Ángulo sólido Ω definido por un casquete esférico de área A

El cono generado por una recta móvil, con origen en O y que se apoya sobre la circunferencia del casquete esférico A , delimita una porción del espacio alrededor del punto O . Esta porción, así delimitada, del espacio constituye un ángulo sólido Ω . La magnitud de Ω está definida por la relación entre la superficie A del casquete esférico y el cuadrado del radio de la esfera. Como A está dada en unidades de área (m^2), Ω es una magnitud adimensional. Su unidad se llama esterradián (Sr). Si el área A es el área total de la esfera ($4\pi r^2$), el ángulo sólido delimita todo el espacio alrededor del punto O .

El ángulo sólido máximo es, por tanto:

$$\Omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi sr$$

El semiespacio delimitado por una semiesfera se asocia con un ángulo sólido de $2\pi sr$

Hay que observar que el valor del ángulo sólido Ω es, por su naturaleza, independiente del valor del radio r de la esfera utilizada para su medición. Si r se escoge más grande, A será más grande, pero Ω será el mismo.

Se puede elaborar una representación gráfica de un sector esférico en forma bidimensional

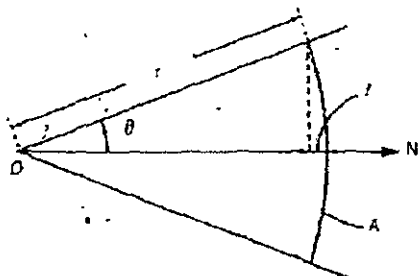


Figura III.2 Representación bidimensional de un sector esférico

Alrededor de la recta ON existe simetría de revolución; el ángulo sólido Ω puede evaluarse si se conoce, que es el semiángulo en el vértice del cono que rodea al casquete esférico de área A. Se tiene:

$$A = 2\pi rl$$

$$l = r(1 - \cos \theta)$$

$$\Omega = \frac{A}{r^2} = \frac{2\pi r^2(1 - \cos \theta)}{r^2} = 2\pi(1 - \cos \theta)$$

REFERENCIAS

Vladimir Svirid. Apuntes de Comunicaciones Ópticas. 2000.

ANEXO D

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA DE LOS ELEMENTOS



DIODOS EMISORES DE LUZ

LED 3 y 5 mm. DIFUSOS

Terminales 15 mm. de largo

Código Copel	Nombre Comercial	Color	Lente	Intensidad luminosa (mcd)		Longitud de onda (nm)	Angulo	Tamaño mm	Figura
				IF= 10mA min	IF= 20mA máx				
L-5000	LHR31D	Rojo	Difuso	0.8	2.0	700	60°	3	1
L-5005	LUG31D	Verde	Difuso	5.0	12.5	565	60°		
L-5010	LUY31D	Amarillo	Difuso	5.0	12.5	590	60°		
L-5130	LUO31D	Naranja	Difuso	1.2	3.9	625	60°		
L-5015	LHR52DL	Rojo	Difuso	0.8	2.0	700	60°	5	2
L-5020	LUG52D	Verde	Difuso	3.2	8.0	565	60°		
L-5025	LUY52D	Amarillo	Difuso	3.2	8.0	590	60°		

Fig. 1.

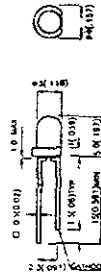


Fig. 2.

LED 3 y 5 mm. CLAROS

Terminales 15 mm. de largo

Código Copel	Nombre Comercial	Color	Lente	Intensidad luminosa (mcd)		Longitud de onda (nm)	Angulo	Tamaño mm	Figura
				IF= 10mA min	IF= 20mA max				
L-5090	LHR31C	Rojo	Claro	0.8	2.0	700	60°	3	1
L-5095	LUG31C	Verde	Claro	5.0	12.5	565	60°		
L-5100	LUY31C	Amarillo	Claro	5.0	12.5	590	60°		
L-5125	LUO31C	Naranja	Claro	1.8	7.9	625	40°		
L-5105	LHR52C	Rojo	Claro	0.8	2.0	700	60°	5	2
L-5110	LUG52C	Verde	Claro	3.2	8.0	565	60°		
L-5115	LUY52C	Amarillo	Claro	3.2	8.0	590	60°		
L-5117	LUO52C	Naranja	Claro	3.8	8.0	625	60°		

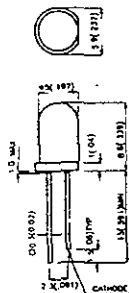


Fig. 3.

LED 3 y 5 mm. DIFUSOS

Terminales 27 mm. largo

Código Copel	Nombre Comercial	Color	Lente	Intensidad luminosa (mcd)		Longitud de onda (nm)	Angulo	Tamaño mm	Figura
				IF= 10mA min	IF= 20mA max				
L-5030	LHR34D	Rojo	Difuso	1.3	3.2	700	60°	3	3
L-5120	LUR32D	Rojo	Difuso	8.0	5.0	625	60°		
L-6035	LUG34D	Verde	Difuso	5.0	3.2	565	60°		
L-5040	LUY34D	Amarillo	Difuso	5.0	2.0	590	60°		
L-5045	LHR53D	Rojo	Difuso	2.0	8.0	700	60°	5	4
L-5050	LUG53D	Verde	Difuso	5.0	3.2	565	60°		
L-5055	LUY53D	Amarillo	Difuso	5.0	3.2	590	60°		

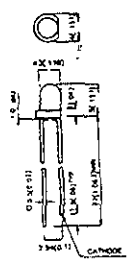
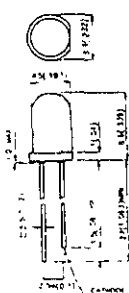


Fig. 4.

D 5 mm. ALTA INTENSIDAD

Terminales 27 mm. largo

Código Copel	Nombre Comercial	Color	Lente	Intensidad luminosa (mcd)		Longitud de onda (nm)	Angulo	Tamaño mm	Figura
				IF= 10mA min	IF= 20mA max				
L-5060	LUR53D	Rojo	Difuso	12.5	80	625	60°	5	4
L-5065	LUR53C	Rojo	Claro	50	200	625	30°		
L-5070	LUR53W	Rojo	Trans	50	200	625	30°		
L-5075	LUG53C	Verde	Claro	20	150	565	30°		
L-5080	LUY53C	Amarillo	Claro	20	80	590	30°		
L-5085	LUO53D	Naranja	Difuso	12.5	80	625	60°		



D 5mm. ECONOMICOS

Terminales 27 mm. largo

Código Copel	Nombre Comercial	Color	Lente	Intensidad luminosa (mcd)		Longitud de onda (nm)	Angulo	Tamaño mm	Figura
				IF= 10mA min	IF= 20mA max				
L-6400	LHR53D/N1	Rojo	Difuso	2.0	8.0	700	60°	5	4
L-6410	LHR53C/N1	Rojo	Claro	50	125	625	30°		
L-6420	LUG53C/N1	Verde	Claro	20	100	565	30°		
L-6430	LUY53C/N1	Amarillo	Claro	20	70	590	30°		
L-6440	LUO53C/N1	Naranja	Claro	20	70	625	60°		



DIODOS EMISORES DE LUZ

LED'S 8 Y 10 mm

Código Dicoipel	Nombre Comercial	Color	Lente	Longitud de onda (nm)	Intensidad luminosa (mcd) IF=20mA		Angulo	Tamaño	Figura
					Mín	Máx			
194-5200	LUR81D	Rojo	Difuso	625	40	150	60°	8mm	1
194-5205	LUG81D	Verde	Difuso	565	20	70	60°	8mm	1
194-5215	LUR01D	Rojo	Difuso	625	40	150	60°	10mm	2
194-5220	LUG01D	Verde	Difuso	565	20	70	60°	10mm	2
194-5225	LUY01D	Amarillo	Difuso	590	20	70	60°	10mm	2

FIG 1

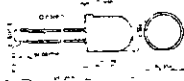


FIG 2



LED'S BICOLORES Y BIPOLARES 5mm

Código Dicoipel	Nombre Comercial	Color	Lente	Longitud de onda (nm)	Intensidad luminosa (mcd) IF=20mA		Angulo	Tamaño	Figura
					Mín	Máx			
194-5300	LURR58D	Rojo	Difuso	625	8	40	60°	5mm	3
194-5305	LUGG58D	Verde	Difuso	565	5	20	60°	5mm	3
194-5310	LUGR59M	Rojo / Verde	Transp Dif	625/565	20/20	90/70	60°	5mm	4
194-5315	LUGR59W	Rojo / Verde	Transp Claro	625/565	100/50	300/200	24°	5mm	4
194-5320	LUYR59W	Rojo / Amarillo	Transp Claro	625/590	100/30	300/80	24°	5mm	4
194-5325	LUGY59W	Verde / Amarillo	Transp Claro	565/590	50/30	200/80	24°	5mm	4

FIG 3

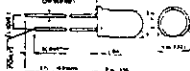
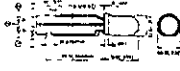


FIG 4



LED'S INTERMITENTES (BLINKING) 5mm

Código Dicoipel	Nombre Comercial	Color	Lente	Longitud de onda (nm)	Intensidad luminosa (mcd) VF=9V		Angulo	Tamaño	Figura
					Mín	Máx			
194-5400	BUR53D	Rojo	Difuso	625	20	80	60°	5mm	5
194-5405	BUG53D	Verde	Difuso	565	5	32	60°	5mm	5
194-5410	BUY53D	Amarillo	Difuso	590	5	32	60°	5mm	5

FIG 5

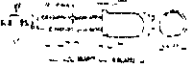
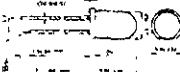
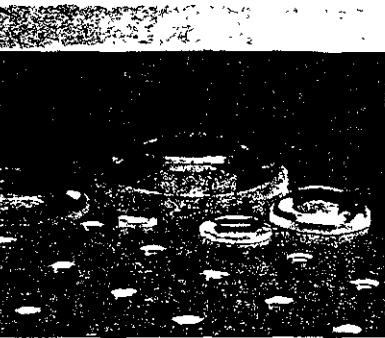


FIG 6



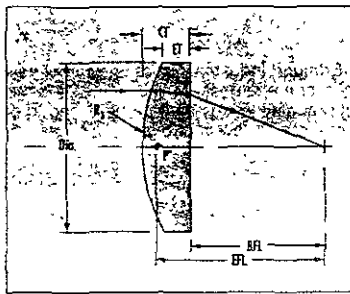
LED'S AZULES 5mm

Código Dicoipel	Nombre Comercial	Color	Lente	Longitud de onda (nm)	Intensidad luminosa (mcd) IF=20mA		Angulo	Tamaño	Figura
					Mín	Máx			
194-6535	LUB53D	Azul	Difuso	430	20	60	60°	5mm	6
194-6540	LUB53W	Trans	Claro	430	40	150	16°	5mm	6
194-6545	LUB53C	Azul	Claro	430	20	100	16°	5mm	6



TECH SPEC™ PLANO-CONVEX LENSES (PCX)

Plano-Convex (PCX) Lenses have a positive focal length that makes them ideal for collecting and focusing light for many imaging applications. They are also useful in a variety of applications involving emitters, detectors, lasers and fiber optics. Coated versions have optimum light transmission. Available in a wide variety of diameters and focal lengths. All dimensions are in mm.



NOTES:

1. Bevel: If the diameter $> 0.65 \times$ (radius of curvature) then no bevel is required.
2. Clear Aperture Specification:
 3.00 diameter CA = (diameter) $\times 0.50$ mm
 3.01 - 12.50 diameter CA = (diameter) $\times 0.00$ mm
 12.51 - 75.00 diameter CA = (diameter) $\times 0.50$ mm
3. Coating: $\lambda/4$, MgF₂ @ 550nm
4. Focal Length Tolerance: $\pm 2\%$

TECH SPEC™ PCX LENSES

Surface Quality	Diameter Tolerance	Center Thickness Tolerance	Edge Thickness	Centering Tolerance	Bevel (Note 1.)
20/10	$\pm 0.0/-0.05$	± 0.05	Reference	30-45 arc min.	none
60-40	$\pm 0.0/-0.05$	± 0.1	Reference	3-5 arc min.	0.1 \times 45°
60-40	$\pm 0.0/-0.10$	± 0.1	Reference	3-5 arc min.	0.1 \times 45°
80-50	$\pm 0.0/-0.10$	± 0.1	Reference	3-5 arc min.	0.1 \times 45°

TECH SPEC™ QUALITY

Back F.L. (mm)	Center Thick (mm)	Edge Thick (mm)	Radius R (mm)	Glass Type	Stock Number Uncoated	Prices — Uncoated			
						1-49	50-99	100-249	250+
0.17	0.80	0.39	0.51	LaSFN9	K45-588	\$27.80	\$22.20	\$19.40	Call For
0.57	0.80	0.64	0.85	LaSFN9	K45-589	\$27.80	\$22.20	\$19.40	For
0.97	0.80	0.35	0.85	LaSFN9	K43-394	\$25.70	\$20.50	\$17.90	OEM
1.07	0.80	0.56	1.28	LaSFN9	K43-395	\$26.90	\$21.50	\$18.80	Quantity
1.07	0.80	0.32	1.28	LaSFN9	K43-396	\$26.90	\$21.50	\$18.80	Pricing
1.57	0.80	0.48	1.70	LaSFN9	K43-397	\$26.90	\$21.50	\$18.80	
1.57	0.80	0.25	1.70	LaSFN9	K43-398	\$26.90	\$21.50	\$18.80	
2.07	0.80	0.39	2.12	LaSFN9	K43-399	\$25.70	\$20.50	\$17.90	
2.57	0.80	0.47	2.55	LaSFN9	K45-590	\$25.70	\$20.50	\$17.90	



Edmund Industrial Optics offers custom manufacturing of optics. Quantity pricing is available for both custom and stock items.

800-363-1992

TECH SPEC™ QUALITY

Back F.L. (mm)	Center Thick (mm)	Edge Thick (mm)	Radius R (mm)	Glass Type	Stock Number Uncoated	Prices — Uncoated				Stock Number Coated	Prices — Coated			
						1-49	50-99	100-249	250+		1-49	50-99	100-249	250+
1.18	2.00	1.46	2.35	SF11	K45-117	\$19.30	\$15.40	\$13.50	Call For	K45-118	\$19.90	\$15.90	\$13.90	Call For
1.30	1.80	1.47	3.62	LaSFN30	K45-141	\$19.30	\$15.40	\$13.50	OEM	K45-142	\$19.90	\$15.90	\$13.90	OEM
1.81	1.80	1.41	3.10	BK7	K32-952	\$18.90	\$15.10	\$13.20	Quantity	K32-953	\$19.60	\$15.70	\$13.70	Quantity
8.01	1.50	1.25	4.65	BK7	K32-954	\$18.90	\$15.10	\$13.20	Pricing	K32-955	\$19.60	\$15.70	\$13.70	Pricing
11.29	1.08	0.90	6.20	BK7	K45-272	\$18.90	\$15.10	\$13.20		K45-273	\$19.60	\$15.70	\$13.70	
14.17	1.26	1.12	7.78	BK7	K45-425	\$18.90	\$15.10	\$13.20		K45-426	\$19.60	\$15.70	\$13.70	
1.06	1.70	1.00	3.21	LaSFN30	K45-223	\$19.30	\$15.40	\$13.50		K45-224	\$19.90	\$15.90	\$13.90	
2.51	2.26	1.53	3.11	BK7	K45-427	\$18.90	\$15.10	\$13.20		K45-428	\$19.60	\$15.70	\$13.70	
2.17	1.39	1.00	5.36	Bof10	K45-225	\$18.90	\$15.10	\$13.20		K45-226	\$19.60	\$15.70	\$13.70	
8.93	1.64	1.24	5.19	BK7	K45-429	\$18.90	\$15.10	\$13.20		K45-430	\$19.60	\$15.70	\$13.70	
11.00	1.52	1.19	6.22	BK7	K45-431	\$18.90	\$15.10	\$13.20		K45-432	\$19.60	\$15.70	\$13.70	
3.65	2.59	1.80	3.61	LaSFN30	K45-143	\$19.30	\$15.40	\$13.50		K45-144	\$19.90	\$15.90	\$13.90	
7.41	2.38	1.80	4.65	BK7	K45-147	\$18.90	\$15.10	\$13.20		K45-148	\$19.60	\$15.70	\$13.70	
3.96	1.87	1.00	4.02	LaSFN30	K45-227	\$19.30	\$15.40	\$13.50	Call For	K45-228	\$19.90	\$15.90	\$13.90	Call For
1.91	1.64	1.00	5.17	BK7	K45-229	\$18.90	\$15.10	\$13.20	OEM	K45-230	\$19.60	\$15.70	\$13.70	OEM
10.83	1.77	1.25	6.22	BK7	K45-433	\$18.90	\$15.10	\$13.20	Quantity	K45-434	\$19.60	\$15.70	\$13.70	Quantity
13.94	1.60	1.19	7.75	BK7	K45-356	\$18.90	\$15.10	\$13.20	Pricing	K45-355	\$19.60	\$15.70	\$13.70	Pricing
4.60	2.50	1.42	4.71	SF11	K45-077	\$17.50	\$14.00	\$12.20		K45-078	\$18.10	\$14.50	\$12.70	
7.95	1.75	0.95	6.05	SF5	K32-489	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K32-470	\$17.50	\$14.00	\$12.20	
10.94	1.60	0.83	6.20	BK7	K32-471	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K32-472	\$17.50	\$14.00	\$12.20	

X LENSES — TECH SPEC — QUALITY																
D (mm)	Effective F.L. (mm)	Back F.L. (mm)	Center Thick (mm)	Edge Thick (mm)	Radius R (mm)	Glass Type	Stock Number Uncoated	Prices — Uncoated				Stock Number Coated	Prices — Coated			
								1-49	50-99	100-249	250+		1-49	50-99	100-249	250+
0.0	12.0	17.07	1.40	0.90	9.30	BK7	K45-079	\$16.60	\$13.30	\$11.60	Call For OEM Quantity Pricing	K45-080	\$17.50	\$14.00	\$12.20	Call For OEM Quantity Pricing
0.0	21.0	20.06	1.42	1.00	10.85	BK7	K32-473	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K32-474	\$17.50	\$14.00	\$12.20	
0.0	24.0	23.01	1.50	1.13	12.40	BK7	K45-231	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K45-232	\$17.50	\$14.00	\$12.20	
0.0	30.0	29.14	1.30	1.01	15.50	BK7	K32-956	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K32-957	\$17.50	\$14.00	\$12.20	
0.0	36.0	34.95	1.60	1.36	18.61	BK7	K45-119	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K45-120	\$17.50	\$14.00	\$12.20	
0.0	48.0	46.95	1.60	1.42	24.81	BK7	K32-848	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K32-849	\$17.50	\$14.00	\$12.20	
0.0	72.0	70.97	1.60	1.48	37.22	BK7	K45-233	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K45-234	\$17.50	\$14.00	\$12.20	
0.0	9.0	7.32	3.00	1.38	7.06	SF11	K32-850	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K32-851	\$17.50	\$14.00	\$12.20	
0.0	12.5	11.94	2.60	1.40	9.32	SF5	K45-081	\$17.60	\$14.10	\$12.30		K45-082	\$18.40	\$14.70	\$12.90	
0.0	18.0	16.41	2.41	1.26	9.92	BK7	K32-009	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K32-010	\$17.50	\$14.00	\$12.20	
0.0	22.0	20.73	1.93	1.00	11.37	BK7	K32-008	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K31-854	\$17.50	\$14.00	\$12.20	
0.0	27.0	25.35	2.50	1.75	13.95	BK7	K45-235	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K45-236	\$17.50	\$14.00	\$12.20	
0.0	36.0	34.48	1.75	1.75	18.61	BK7	K32-958	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K32-959	\$17.50	\$14.00	\$12.20	
0.0	45.0	43.98	1.54	1.10	23.26	BK7	K45-121	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K45-122	\$17.50	\$14.00	\$12.20	
0.0	12.0	11.76	4.00	1.84	9.42	SF11	K45-358	\$16.60	\$13.30	\$11.60		K45-359	\$17.50	\$14.00	\$12.20	
0.0	15.0	12.03	4.50	1.66	7.75	BK7	K45-083	\$18.30	\$14.70	\$12.80		K45-084	\$19.20	\$15.30	\$13.40	
0.0	18.0	16.71	3.00	1.41	12.12	SF5	K45-302	\$18.30	\$14.70	\$12.80		K45-303	\$19.20	\$15.30	\$13.40	
0.0	24.0	22.15	2.80	1.25	12.42	BK7	K32-006	\$17.50	\$14.00	\$12.20		K32-007	\$18.10	\$14.50	\$12.70	
0.0	30.0	28.02	3.00	1.79	15.50	BK7	K32-011	\$17.50	\$14.00	\$12.20		K31-855	\$18.10	\$14.50	\$12.70	
0.0	36.0	34.04	3.00	2.02	18.83	KS	K45-085	\$17.50	\$14.00	\$12.20		K45-086	\$18.10	\$14.50	\$12.70	
0.0	42.0	40.22	2.70	1.85	21.71	BK7	K32-933	\$17.50	\$14.00	\$12.20		K32-887	\$18.10	\$14.50	\$12.70	
0.0	48.0	46.36	2.50	1.76	24.82	BK7	K45-123	\$17.50	\$14.00	\$12.20		K45-124	\$18.10	\$14.50	\$12.70	
0.0	54.0	52.02	3.00	2.35	27.91	BK7	K32-852	\$17.50	\$14.00	\$12.20		K32-853	\$18.10	\$14.50	\$12.70	
0.0	60.0	58.37	2.50	1.91	31.02	BK7	K45-304	\$17.50	\$14.00	\$12.20		K45-305	\$18.10	\$14.50	\$12.70	
0.0	72.0	70.42	2.40	1.91	37.21	BK7	K32-854	\$17.50	\$14.00	\$12.20		K32-855	\$18.10	\$14.50	\$12.70	
0.0	84.0	82.39	2.50	2.08	43.43	BK7	K45-125	\$17.50	\$14.00	\$12.20		K45-126	\$18.10	\$14.50	\$12.70	
0.0	100.0	98.35	2.50	2.15	51.68	BK7	K32-856	\$17.50	\$14.00	\$12.20		K32-857	\$18.10	\$14.50	\$12.70	
0.0	120.0	117.1	5.50	2.16	10.09	SF5	K45-274	\$17.50	\$14.00	\$12.20		K45-275	\$18.10	\$14.50	\$12.70	
0.0	150.0	120.30	3.35	1.36	15.72	SF5	K45-093	\$19.70	\$15.20	\$13.80	Call For OEM Quantity Pricing	K45-094	\$20.30	\$16.20	\$14.20	Call For OEM Quantity Pricing
0.0	30.0	27.90	3.18	1.23	15.52	BK7	K32-004	\$18.70	\$15.00	\$13.10		K31-856	\$19.50	\$15.60	\$13.60	
0.0	40.0	38.02	3.00	1.59	20.67	BK7	K45-095	\$18.70	\$15.00	\$13.10		K45-096	\$19.50	\$15.60	\$13.60	
0.0	60.0	58.65	2.05	1.13	31.11	BK7	K45-435	\$18.70	\$15.00	\$13.10		K45-436	\$19.50	\$15.60	\$13.60	
0.0	75.0	73.79	1.83	1.10	38.76	BK7	K45-360	\$18.70	\$15.00	\$13.10		K45-359	\$19.50	\$15.60	\$13.60	
0.0	100.0	98.02	3.00	2.45	51.68	BK7	K45-259	\$18.70	\$15.00	\$13.10		K45-260	\$19.50	\$15.60	\$13.60	
0.0	18.0	17.20	10.33	3.47	9.33	BK7	K45-437	\$19.70	\$15.20	\$13.80		K45-438	\$20.30	\$16.20	\$14.20	
0.0	27.0	24.73	3.80	1.42	18.16	SF5	K32-001	\$18.70	\$15.00	\$13.10		K32-002	\$19.50	\$15.60	\$13.60	
0.0	36.0	33.65	3.57	1.26	18.67	BK7	K32-008	\$18.70	\$15.00	\$13.10		K31-857	\$19.50	\$15.60	\$13.60	
0.0	54.0	52.02	3.00	1.51	27.91	BK7	K45-306	\$18.70	\$15.00	\$13.10		K45-307	\$19.50	\$15.60	\$13.60	
0.0	72.0	70.05	3.00	1.90	37.22	BK7	K32-859	\$18.70	\$15.00	\$13.10		K32-860	\$19.50	\$15.60	\$13.60	
0.0	20.0	17.42	4.60	1.00	15.70	SF11	K45-237	\$20.50	\$16.40	\$14.40		K45-238	\$21.40	\$17.10	\$14.90	
0.0	30.0	27.30	4.50	1.84	20.10	BoF10	K45-239	\$20.50	\$16.40	\$14.40		K45-240	\$21.40	\$17.10	\$14.90	
0.0	40.0	36.77	4.90	2.32	20.67	BK7	K32-960	\$19.80	\$15.80	\$13.80		K32-961	\$20.40	\$16.30	\$14.30	
0.0	50.0	47.87	3.23	1.22	25.84	BK7	K45-362	\$19.80	\$15.80	\$13.80		K45-361	\$20.40	\$16.30	\$14.30	
0.0	60.0	57.03	4.50	2.84	31.07	BK7	K32-962	\$19.80	\$15.80	\$13.80		K32-963	\$20.40	\$16.30	\$14.30	
0.0	70.0	68.03	3.00	1.59	36.18	BK7	K32-936	\$19.80	\$15.80	\$13.80		K32-937	\$20.40	\$16.30	\$14.30	
0.0	80.0	78.45	2.35	1.13	41.46	BK7	K45-439	\$19.80	\$15.80	\$13.80		K45-440	\$20.40	\$16.30	\$14.30	
0.0	100.0	97.13	4.30	3.37	51.68	BK7	K32-475	\$19.80	\$15.80	\$13.80		K32-476	\$20.40	\$16.30	\$14.30	
0.0	150.0	148.02	3.00	2.35	57.57	BK7	K45-276	\$19.80	\$15.80	\$13.80		K45-277	\$20.40	\$16.30	\$14.30	
0.0	25.0	20.22	8.00	2.43	16.82	SF5	K45-097	\$21.70	\$17.30	\$15.20		K45-098	\$23.30	\$18.60	\$16.30	
0.0	30.0	24.69	8.06	1.72	15.50	BK7	K45-364	\$21.70	\$17.30	\$15.20		K45-363	\$23.30	\$18.60	\$16.30	
0.0	35.0	30.42	7.01	2.00	18.11	BK7	K45-145	\$21.70	\$17.30	\$15.20		K45-146	\$23.30	\$18.60	\$16.30	
0.0	40.0	36.31	5.60	1.39	20.67	BK7	K45-278	\$21.70	\$17.30	\$15.20		K45-279	\$23.30	\$18.60	\$16.30	
0.0	50.0	46.75	4.90	1.68	25.84	BK7	K32-177	\$20.70	\$16.60	\$14.50		K32-478	\$21.90	\$17.50	\$15.30	
0.0	60.0	56.90	4.70	2.07	31.07	BK7	K45-127	\$20.70	\$16.60	\$14.50		K45-128	\$21.90	\$17.50	\$15.30	
0.0	75.0	72.00	4.70	2.42	38.76	BK7	K32-479	\$20.70	\$16.60	\$14.50		K32-480	\$21.90	\$17.50	\$15.30	