



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

“ESTUDIO DESCRIPTIVO Y EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA MULTICANALIZADO EN LONGITUD DE ONDA”

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

PRESENTA

JOSE MANUEL SANTOS CANSECO

DIRECTOR DE TESIS

DR. OLEXANDR GLOT

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAX., DICIEMBRE DE 2005

Tesis presentada el 16 de diciembre de 2005
Ante los siguientes sinodales:

C.Dr. Felipe de Jesús Rivera López

M.C. Maribel Tello Bello

C.Dr. Heriberto I. Hernández Martínez

Director de tesis:

Dr. Olexandr Glot

Dedicatoria

A Dios por permitirme vivir estos momentos al lado de mis seres queridos.

A mi madre, por darme la vida, alentarme y apoyarme en todo momento a pesar de todas las adversidades. Finalmente ¡lo hemos logrado!

A mi padre, por los esfuerzos realizados para darme el mayor de los tesoros y enseñarme a enfrentar los retos que se tienen en la vida.

A mis hermanos, que alegran mi vida con sus bromas y sus juegos, los quiero.

A mi abuela (Q.E.P.D.), quién siempre quiso que yo estudiara, y hacía ese objetivo que hoy culmina, me acompañó.

Agradecimientos especiales

Al M.C. Ramón Maldonado Basilio, quién me proporcionó de forma incondicional el apoyo y tiempo para la realización y culminación de este trabajo de tesis. Además, por enseñarme a valorar los logros propios y estar orgulloso de lo que uno realiza, inculcarme el valor de la responsabilidad y del tiempo, tanto el propio como el ajeno y recordarme que la mejor manera de conseguir las metas es a través del trabajo y el esfuerzo.

Al Dr. Olexandr Glot, por ayudarme a concluir con este trabajo de tesis y por sus atinadas sugerencias.

Agradecimientos

A la Sra. Margarita Salazar Díaz, al Sr. Miguel Ángel Ortega Castro, a la Sra. Edith Escobar Camacho, y a la familia Meléndez Santos de quienes siempre he recibido consejos y apoyos a lo largo de mi formación académica y personal.

A mis sinodales, por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo de tesis, así como por las observaciones realizadas para enriquecerlo.

A mis amigos, los del rebaño, las del racimo y a Vania, al ayudarme a multiplicar mis goces y dividir mis penas.

A Marisela, por brindarme su cariño, comprensión y compartir parte de su tiempo conmigo. Gracias chiquilla, siempre te recordaré.

A las familias Ramos Oledo, Rojas Sánchez, Villalba Othón, Palafox Alvarado y a Doña Elia, por sus atenciones que han tenido durante mi estancia en la Ciudad de Huajuapán de León y hacerme sentir como parte de su familia.

A todos mis profesores, quienes me proporcionaron parte de sus conocimientos, para lograr mi formación académica y profesional.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca, que mediante el proyecto denominado "Equipamiento de un Laboratorio de Comunicaciones Digitales" apoyo en la adquisición del equipo de medición empleado en la realización del presente trabajo.

Al Ing. Josué N. García Matías (Boti, para los amigos) y a Heriberto I. Hernández Martínez por los apoyos y sugerencias recibidas en la revisión de este documento.

A todas las personas, que de una u otra forma, siempre me brindaron palabras de aliento y apoyo en los momentos difíciles.

Por siempre gracias.

Jose Manuel

Índice General

Dedicatoria	i
Agradecimientos especiales.....	i
Agradecimientos.....	ii
Índice General	vi
Índice de Figuras	viii
Índice de tablas	xi
Resumen	xii
Abstract.....	xiii
1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Contenido del documento de tesis	3
2. Componentes para los sistemas de comunicación óptica	4
2.1. Antecedentes.....	4
2.2. Sistemas de comunicación óptica	6
2.3. Componentes de un sistema de comunicación óptica WDM	8
2.3.1. Fibra Óptica	8
2.3.1.1. Fibras monomodo y multimodo	10
2.3.1.2. Atenuación en la fibra óptica.....	12
2.3.1.3. Dispersión en la fibra.....	13
2.3.1.4. No linealidades en la fibra óptica	14
2.3.2. Fuentes de luz	14
2.3.2.1. Láser	14
2.3.2.2. Led.....	21
2.3.3. Multicanalizador óptico.....	22
2.3.4. Amplificador óptico.....	24
2.3.4.1. Amplificador óptico de semiconductor	25
2.3.4.2. Amplificador de fibra óptica dopada con erbio	26

2.3.5. Demulticanalizador óptico.....	29
2.3.6. Fotodetectores.....	29
2.3.6.1. Fotodiodo PIN	30
2.3.6.2 Fotodiodo APD.....	30
2.3.6.2. Comparación de los fotodiodos	31
3. Caracterización del sistema de comunicación óptica WDM	32
3.1. Caracterización de la fibra óptica	32
3.1.1. Medición de la apertura numérica	32
3.1.2. Medición de la atenuación de la fibra.....	36
3.2. Caracterización de las fuentes de luz.....	39
3.2.1. Caracterización eléctrica del láser	40
3.2.2. Caracterización eléctrica del led.....	40
3.2.3. Pérdidas de inserción	41
3.3. Caracterización del multicanalizador	43
3.3.1. Multicanalizador basado en lentes GRIN.....	43
3.3.2. Multicanalizador con acopladores direccionales.....	46
3.4. Caracterización del demulticanalizador.....	47
3.5. Caracterización del fotodetector.....	49
3.6. Caracterización de la interferencia entre canales (crosstalk).....	49
4. Resultados.....	50
4.1. Pérdidas totales del sistema WDM construido	50
4.2. Pruebas del sistema WDM construido.....	52
5. Conclusiones y líneas futuras de investigación	59
Bibliografía.....	62

Índice de Figuras

Figura 2.1. Progreso en las transmisiones por fibra óptica.	5
Figura 2.2. Diagrama general de un sistema de comunicación convencional por fibra óptica.	6
Figura 2.3. Diagrama general de un sistema de comunicación óptica WDM.	7
Figura 2.4. Estructura de la fibra óptica.	8
Figura 2.5. a) Fenómeno de refracción, b) Fenómeno de reflexión total interna y c) Ilustración de la introducción y propagación de un haz en una fibra óptica.	9
Figura 2.6. Diámetros de las fibras a) multimodo y b) monomodo.	11
Figura 2.7. Estructura del láser.	15
Figura 2.8. a) Modelo atómico simplificado. b) Bandas de energía para un material formado por un conjunto de átomos cercanamente espaciados.	17
Figura 2.9. a) Probabilidades de ocupación de electrones y huecos para un semiconductor tipo n y tipo p . b) Probabilidades de ocupación de electrones para una unión $n-p$ en equilibrio térmico. c) Probabilidades de ocupación de electrones y de huecos para una unión $n-p$ polarizada directamente (inversión de población).	18
Figura 2.10. a) Absorción, b) Emisión Espontánea y c) Emisión estimulada.	19
Figura 2.11. Curva característica de potencia óptica contra corriente eléctrica aplicada en un láser de semiconductor.	19
Figura 2.12. a) Led de emisión de superficie y b) Led emisión de borde.	21
Figura 2.13. Configuración típica de un acoplador direccional.	23
Figura 2.14. Campo evanescente en la fibra óptica.	24
Figura 2.15. Principio de funcionamiento de un amplificador óptico.	24
Figura 2.16. Amplificador Fabry Perot y amplificador de onda progresiva.	26
Figura 2.17. Principio de operación de un EDFA.	27
Figura 2.18. Estructura interna generalizada de un amplificador de fibra óptica contaminada con Erblio.	27
Figura 2.19. Espectro de ganancia de un EDFA.	28

Figura 2.20. Demulticanalizador óptico con un filtro incrustado en una barra de índice de gradiente gradual (GRIN).	29
Figura 2.21. Capas de un fotodiodo PIN.	30
Figura 2.22. Estructura de un fotodiodo APD.	31
Figura 3.1. a) Corte transversal sin fracturas y b) Corte transversal con fracturas.	33
Figura 3.2. Diseño para medición de la apertura numérica.	34
Figura 3.3. Medición de la apertura numérica con una fibra de longitud de 50 m.	36
Figura 3.4. Perturbador de modos.	37
Figura 3.5. Colocación de los componentes para la medición de la atenuación en la fibra.	38
Figura 3.6. Curva potencia-corriente del Láser.	39
Figura 3.7. Curva potencia-corriente del led.	40
Figura 3.8. Arreglo experimental para la inserción de la luz (láser y led) en los segmentos de fibra óptica.	41
Figura 3.9. Lente utilizado tamaño normal y ampliado por un microscopio.	42
Figura 3.10. Arreglo para la demulticanalización con lentes GRIN.	43
Figura 3.11. Ilustración de la unión de las fibras para el bloque del multicanalizador.	43
Figura 3.12. Fibras ópticas unidas vistas desde un microscopio.	44
Figura 3.13. Lente con filtro.	44
Figura 3.14. Configuración del multicanalizador basado en lentes GRIN.	45
Figura 3.15. Configuración de los puertos del acoplador direccional de la empresa Canstar.	45
Figura 3.16. Conector Splice.	47
Figura 3.17. Diagrama ilustrativo del demulticanalizador basado en lentes GRIN.	47
Figura 4.1. Diagrama del sistema WDM.	50
Figura 4.2. Esquema del sistema WDM.	51
Figura 4.3. Señal de entrada sinusoidal con el dispositivo láser con una frecuencia de 500 Hz y la señal obtenida a la salida del sistema.	53
Figura 4.4. Señal de salida obtenida con el dispositivo láser y los armónicos presentados, con una entrada de 500 Hz.	53
Figura 4.5. Señal de entrada sinusoidal con el dispositivo láser con una frecuencia de 1 kHz y la señal obtenida a la salida del sistema.	54
Figura 4.6. Señal de entrada sinusoidal con el dispositivo láser con una frecuencia de 40 kHz y la señal obtenida a la salida del sistema.	54
Figura 4.7. Señal de entrada sinusoidal con el dispositivo led con una frecuencia de 500 Hz y la señal obtenida a la salida del sistema.	55
Figura 4.8. Señal de salida sinusoidal con ambos dispositivo a una frecuencia de 500 Hz.	55
Figura 4.9. a) Señal de entrada sinusoidal con el dispositivo led con una frecuencia de 100 Hz y la señal obtenida a la salida del sistema, b) Señal de entrada sinusoidal con el dispositivo led con una frecuencia de 1 kHz y la señal obtenida a la salida del sistema.	56
Figura 4.10. Señal de entrada cuadrada a 300 Hz y la salida generada para el láser.	57

Figura 4.11. Señal de audio en el láser.	58
Figura 4.12. Señal de audio en el led.	58

Índice de tablas

Tabla 2.1 Índice de refracción de diferentes materiales.	9
Tabla 2.2. Comparación de las características de fibras multimodo con fibras monomodo	12
Tabla 2.3. Atenuaciones para diversas longitudes de onda y diferentes fibras.	13
Tabla 2.4. Materiales utilizados en la construcción del medio activo de un láser.....	16
Tabla 2.5. Intervalo y tiempo de sintonización de los láseres sintonizables	21
Tabla 2.6. Potencias de salida de los láseres	21
Tabla 2.7. Comparación de las propiedades de emisión de láseres de semiconductor y led's comerciales	22
Tabla 2.8. Características de los EDFA's.....	28
Tabla 2.9. Comparación de los AOS's y los EDFA's.	28
Tabla 2.10. Comparación de los fotodiodos PIN y APD.....	31
Tabla 3.1. Mediciones de la potencia del haz láser con fibra óptica multimodo de 50 m. de longitud.	35
Tabla 3.2. Mediciones de las salidas del acoplador direccional con diferentes alineaciones.....	46
Tabla 3.3. Mediciones de potencia a la salida del demulticanalizador para diferentes longitudes de fibra.....	48
Tabla 4.1. Perdidas totales del sistema WDM construido.....	51

Resumen

En este trabajo de tesis se estudia y construye un sistema WDM simplificado, desde el punto de vista demostrativo y académico. Se utilizan sólo dos fuentes de información y como fuentes de luz un láser de 780 nm y un led de 830 nm, con potencias máximas de emisión de 25 mW y de 3 mW respectivamente. El multiplexor se implementó con un acoplador direccional mientras que el demultiplexor se construyó con un filtro óptico basado en lentes GRIN. Se caracteriza cada uno de los componentes funcionales del sistema, obteniendo experimentalmente sus parámetros principales. Se caracteriza también el sistema como un bloque completo. Se analizan las señales eléctricas obtenidas en el extremo receptor.

Este trabajo de tesis tiene una aplicación directa en la enseñanza de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica, realizada en la Universidad Tecnológica de la Mixteca, así como también, es útil para sentar las bases de nuevos proyectos y desarrollo afines al área de la optoelectrónica.

Abstract

This thesis study a simplified WDM system is analysed and implemented from a demonstrative and academic point of view. Only two sources of information are used with 780 nm and 830 nm led laser light sources, with maximum emission power of 25 mW and 3mW respectively. The multiplexor was implemented on a directional coupler while the demultiplexer component was built with an optic fiber based on GRIN lens. It was characterized each component and the whole system. The entry and exit electrical signals obtained on the receptor side are analysed.

This thesis, done at the Universidad Tecnológica de la Mixteca, can be applied directly in the teaching of fiber optic communication. Furthermore, it will be useful for establishing the bases of new projects and developments linked to the area of optoelectronics.

1. Introducción

Los seres humanos son sociales por naturaleza, es decir, necesitan de la comunicación; pues de otra manera vivirían completamente aislados. Así, desde los inicios de la especie, la comunicación fue evolucionando hasta llegar a las más sofisticadas tecnologías, para lograr acercar espacios y tener mayor velocidad en el proceso. Específicamente hablando, el campo de los sistemas de comunicación ópticas han presentado avances inimaginables a partir de la concepción de diversos descubrimientos. Uno de estos es la introducción de componentes optoelectrónicos, capaces de realizar desde operaciones simples, como una amplificación óptica, hasta operaciones complicadas como la conversión en longitudes de onda, la conmutación óptica [22], entre otras, todas ellas en realizadas en el dominio totalmente eléctrico.

De esta forma, con el advenimiento de componentes optoelectrónicos capaces de realizar una gran variedad de operaciones, se ha desarrollado una técnica conocida como Multicanalización por División de Longitud de Onda (WDM, Wavelength Division Multiplexing), que utiliza como medio de transmisión la fibra óptica.

En la actualidad los sistemas WDM se encuentran en pleno desarrollo, tanto a nivel de componentes optoelectrónicos individuales o independientes, como a nivel de la arquitectura de los sistemas WDM y consecuentemente de las normas y los protocolos de comunicación para este tipo de sistemas. Además se estima que el mercado mundial para la tecnología y el equipo de transmisión óptica WDM seguirá incrementándose en la medida que los proveedores de servicio comiencen a utilizar esta tecnología para convertirse en proveedores de banda ancha a bajo coste [12].

Aunado a lo anteriormente comentado, al enfocarse no al mercado mundial, sino a la infraestructura latinoamericana y nacional, se encuentra que son muy pocos países en los que se tienen instalados sistemas WDM [12], y hasta donde se tiene conocimiento, actualmente en México no existe ninguna empresa que utilice la tecnología WDM en sus enlaces dorsales. Así por ejemplo, Telmex, la empresa líder de telefonía en México, cuenta sólo con un sistema “E1 dorsal”, con únicamente 155 Mbps en su velocidad de transmisión [17].

De esta forma resulta imprescindible y motivante adentrarse en esta área de las comunicaciones ópticas, específicamente en los sistemas WDM, tanto de manera teórica como experimental, utilizando la tecnología disponible en nuestro país y específicamente la infraestructura y equipo disponible en la Universidad Tecnológica de la Mixteca. En este sentido, se presenta la caracterización e implementación de un sistema WDM, con la multicanalización de únicamente dos canales, utilizan-

do señales de audio como fuentes de información. En este punto se desea mencionar que en este trabajo de tesis no se intenta conseguir la multicanalización de un gran número de fuentes de información, sino mostrar de una manera descriptiva la estructura general de un sistema de comunicación óptica WDM. En otras palabras, el enfoque de este trabajo es meramente académico, ya que no se dispone de la infraestructura suficiente para perseguir objetivos más ambiciosos, pero se tiene el interés de fomentar esta línea de trabajo dentro de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

1.1. Objetivos

El presente trabajo de tesis tiene dos objetivos principales, el primero es describir los bloques funcionales de un sistema de comunicación por fibra óptica multicanalizado por división de longitud de onda (WDM); el segundo objetivo es la realización de un experimento ilustrativo que permita la observación funcional de un sistema WDM.

Es importante hacer notar que un estudio teórico detallado de los sistemas WDM, así como de su estado de arte, representa una ardua y extensa tarea. Esto, aunado a la carencia de la infraestructura necesaria para la construcción de este tipo de sistemas, resultaría una meta prácticamente imposible de alcanzar. Por lo que en la etapa descriptiva de este trabajo de tesis se realiza sólo un estudio descriptivo de un sistema WDM, mientras que en la etapa experimental el sistema a realizar esta compuesto por dos fuentes de información con un ancho de banda pequeño.

De manera específica, en la parte descriptiva se estudian y comprenden las características físicas, el principio de operación y las aplicaciones de cada uno de los siguientes componentes funcionales de un sistema WDM:

- 1) Las fuentes de emisión de luz (el LED y el Láser semiconductor).
- 2) El multicanalizador óptico basado en acopladores direccionales.
- 3) Los amplificadores ópticos, tanto de semiconductor como de fibra dopada con erbio.
- 4) Los filtros ópticos.
- 5) Los fotodetectores.

Otro punto importante es la elaboración de tablas comparativas que permita la identificación, selección y desempeño que presenta cada dispositivo dentro de un sistema WDM.

En la parte experimental se contemplan los siguientes objetivos específicos:

- 1) La caracterización de cada uno de los componentes o bloques funcionales necesarios para la realización de un sistema de comunicación óptica WDM, conformado por 2 fuentes de información que modulan independientemente a dos fuentes de luz (un láser a 780 nm y un LED a 830 nm), un multicanalizador óptico, un demulticanalizador óptico y 2 fotodetectores.
- 2) Probar experimentalmente dos formas de implementar el multicanalizador óptico, tanto con acopladores direccionales como con lentes para determinar el mejor desempeño en el sistema de comunicación óptica WDM propuesto y, en general, en cualquier sistema de este tipo.
- 3) La identificación y medición de los parámetros que determinan el desempeño del sistema de comunicación óptica WDM propuesto (las pérdidas de inserción y el *cross-talk*), estableciendo las condiciones de operación bajo las cuales se propician dichos parámetros.

1.2. Contenido del documento de tesis

El presente trabajo de tesis está dividido en cinco capítulos, los cuales abarcaran: la investigación para la descripción del sistema, la caracterización de los bloques funcionales, así como los resultados obtenidos. Después de un capítulo introductorio, se presenta la siguiente distribución de temas:

En el Capítulo 2 se describe de manera teórica cada uno de los bloques del sistema, así como los componentes ópticos que son requeridos en sistemas ópticos WDM, profundizando en sus características, propiedades y algunas aplicaciones.

En el Capítulo 3 se expone el trabajo realizado en el laboratorio, que consiste en los procedimientos, formas y consideraciones que se emplearon para elaborar el experimento, con la caracterización de cada uno de los bloques del sistema y su correspondiente desempeño.

En el Capítulo 4 se muestra la integración de todos los bloques del sistema, así como las pérdidas totales que resultan de su integración. También, se exponen los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al sistema WDM implementado.

Para finalizar el trabajo de tesis, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y comentarios obtenidos con su realización.

2. Componentes para los sistemas de comunicación óptica

2.1. Antecedentes

El concepto de comunicaciones ópticas se remonta tiempo atrás. El envío de mensajes por luz es tan antiguo como las señales de humo. Sin embargo, el primer trabajo relacionado con los sistemas de comunicación óptica fue realizado en 1880, cuando Alexander Graham Bell demostró la transmisión de un haz de luz a una distancia de 200 m. [2, 5]. Después del experimento de Alexander Graham Bell, se utilizaron diversos materiales para la transferencia de luz, en muchos de los cuales no se obtuvieron buenos resultados, por lo que se abandonaron sus investigaciones.

No obstante, el uso de la fibra óptica como medio de transmisión para actuales y futuros sistemas de comunicaciones se dio gracias a dos eventos, el primero fue la realización del primer láser en 1960; el segundo fue un desarrollo en el que los científicos Charles Kao y George A. Hockham propusieron la fibra óptica como medio de transmisión [2]. A partir de entonces, muchos grupos de investigación propusieron sus ideas, sin embargo fue hasta 1970 en que el grupo Corning Glass Work reportó transmisiones a muy poca distancia utilizando fibra óptica. En la actualidad, han sido realizadas transmisiones en el intervalo de cientos o miles de kilómetros. El progreso de la fibra óptica en comunicaciones es mostrado en la Figura 2.1 [5], en la cual se visualiza que a medida que pasa el tiempo, el porcentaje de transmisión de la luz en un km, va en aumento, alcanzándose en la actualidad transmisiones de luz cercanas al 100%, lo que trae como consecuencia una mejor transmisión de información.

De lo anteriormente mencionado se puede percibir que las tecnologías basadas en fibra óptica para la transmisión de datos han experimentado un indudable éxito, siendo en la actualidad líderes de comunicación de grandes volúmenes de información, e introduciéndose cada vez más en redes locales de datos [29]. Sin embargo, debido a las limitaciones de velocidad de un enlace de longitud de onda única, surgió la técnica conocida como WDM [25].

WDM proporciona el equivalente de múltiples líneas de transmisión en una sola fibra para enviar diversos canales de información. Las técnicas WDM se especifican en términos de la longitud de onda de sus canales (expresada en nanómetros) y con base en su configuración de transmisión-recepción [13].

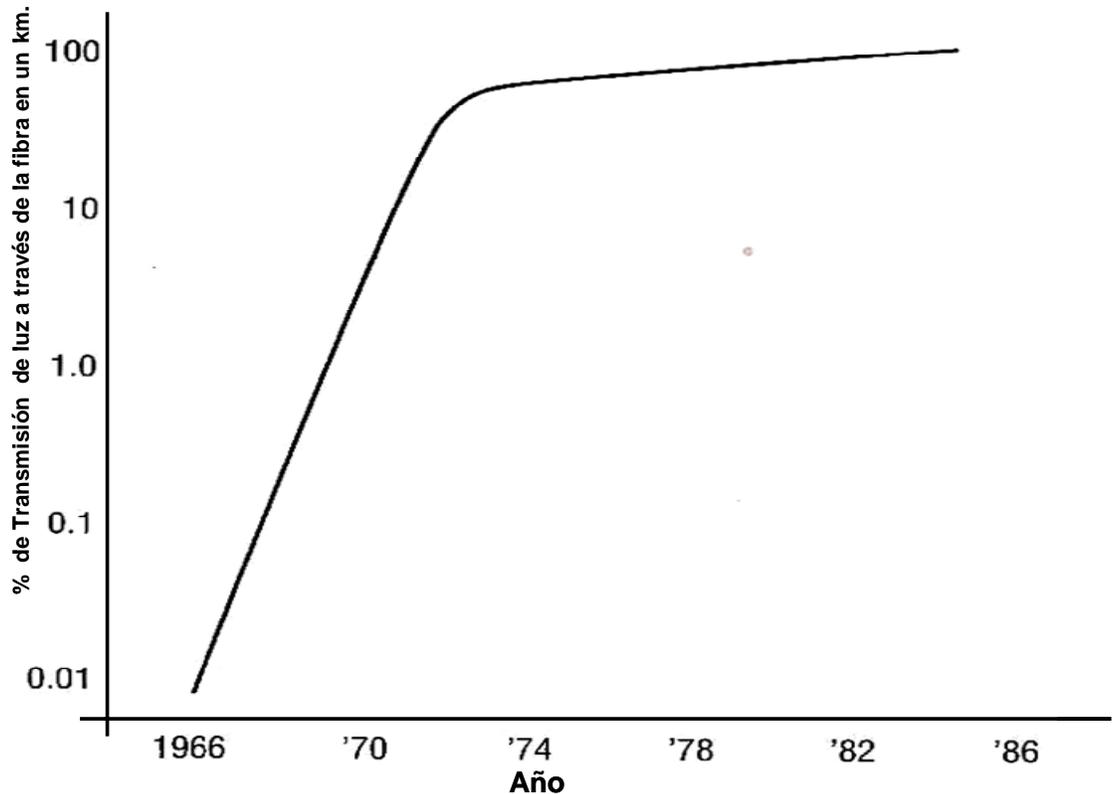


Figura 2.1. Progreso en las transmisiones por fibra óptica.

Los principios de WDM se remontan a finales de la década de 1980, usando dos longitudes de onda muy espaciadas, una en 1310 nm y otra en 1550 nm. Este sistema también es llamado WDM de banda ancha, que realiza una comunicación bidireccional utilizando dos fibras. Una de ellas se usa para transmitir en un sentido y la otra en el sentido contrario. En efecto, ésta es la disposición más eficiente y la que se encuentra normalmente en los sistemas troncales WDM [2].

A principios de la década de los 90's tuvo lugar la segunda generación de WDM, a veces llamada WDM de banda estrecha, en la cual se usaban de 2 a 8 canales [2]. Estos canales están espaciados en un intervalo de unos 400 GHz en la ventana de 1550 nm. A mediados de la década de 1990, los sistemas WDM que surgieron consistían de 16 a 40 canales con un espaciamiento de 100 a 200 GHz. A finales de la misma década los sistemas WDM habían evolucionado hasta el punto de que son capaces de tener de 64 a 160 canales y espaciados cada 50 o 25 GHz [2].

El incremento de la densidad de los canales de la tecnología WDM ha tenido un dramático impacto en la capacidad de transporte de la fibra. En 1995, cuando los primeros sistemas de 10 Gbps aparecieron, la tasa de incremento en capacidad fue de un múltiplo lineal de cuatro veces cada cuatro años [2].

Desde la perspectiva técnica y económica, la posibilidad de suministrar potencialmente una capacidad de transmisión ilimitada es la ventaja más obvia de la tecnología WDM. A medida que la demanda cambia, se puede proporcionar más capacidad, ya sea actualizando el equipamiento o aumentando el número de longitudes de onda dentro de la fibra sin costo de actualización.

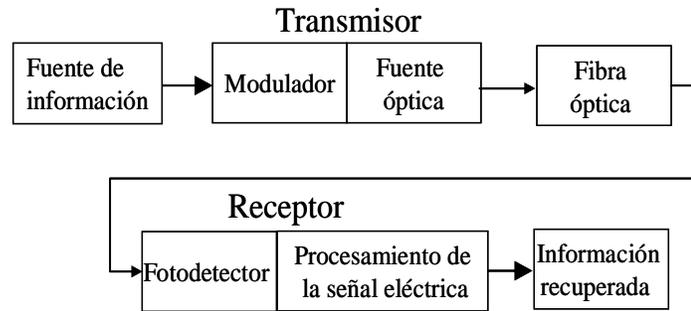


Figura 2.2. Diagrama general de un sistema de comunicación convencional por fibra óptica.

Sin embargo, la tecnología WDM no hubiera sido posible sin el desarrollo de los diferentes componentes optoelectrónicos necesarios para integrarla a un sistema de comunicación óptica. Este desarrollo abarca desde los componentes activos como las fuentes de luz, los amplificadores y los fotodetectores, hasta los componentes pasivos como los multicanalizadores y filtros, además de la herramienta e infraestructura adecuada para la instalación y mantenimiento del sistema. Aunque de manera comercial aún no se tiene tanto desarrollo de este tipo de equipamiento, a nivel de investigación todos los componentes utilizados en sistemas de comunicación óptica WDM están en pleno auge, puesto que WDM se perfila como el sistema de comunicación troncal del futuro [2]. Por este motivo, existe un interés creciente en la descripción de componentes y circuitos que conforman este tipo de sistemas [2, 8]. De esta manera, en el presente capítulo se realiza un estudio descriptivo de diferentes componentes optoelectrónicos, tomando en cuenta sus características básicas de operación y los parámetros asociados a los sistemas WDM.

2.2. Sistemas de comunicación óptica

Para adentrarse en el estudio de los sistemas de comunicaciones ópticas, es necesario conocer los elementos funcionales que lo conforman, los cuales pueden ser representados de manera general por el diagrama a bloques de la Figura 2.2 [31].

Este diagrama está compuesto de tres bloques: el transmisor, el canal y el receptor, útiles para transferir información entre puntos localizados remotamente [31]. Como se observa en la Figura 2.2, la entrada al bloque transmisor corresponde a la fuente de información. En este aspecto, la gran diversidad de fuentes de información posibles resulta en diferentes formas de mensajes, estos pueden ser formas de onda variables en el tiempo ó símbolos digitales, entre otras. Por consiguiente, antes de transmitir un mensaje, éste es transformado mediante modulación en una portadora óptica, para enviarlo en una forma conveniente a través de la fibra para su propagación [31]. Posteriormente, el transmisor y el receptor se encuentran interconectados a través de la fibra óptica. Por otro lado, en el receptor se extrae el mensaje que fue transmitido, mediante el uso de un fotodetector, que transforma la potencia óptica instantánea en una señal eléctrica, la cual es posteriormente procesada (por ejemplo: amplificada ó filtrada). Además, debido a que regularmente la distancia que separa al transmisor del receptor es considerable (varios km o cientos de km), es necesaria la utilización de amplificadores ópticos.

Sin embargo, en un sistema de comunicación óptica WDM, contrario a un sistema de comunicación óptica básico, se pueden contar con dos o más canales de información, por lo tanto se utiliza más de una fuente de luz, como se ilustra en el diagrama de la Figura 2.3, En éste caso, cada fuente de luz entrega en su salida un haz a una longitud de onda diferente.

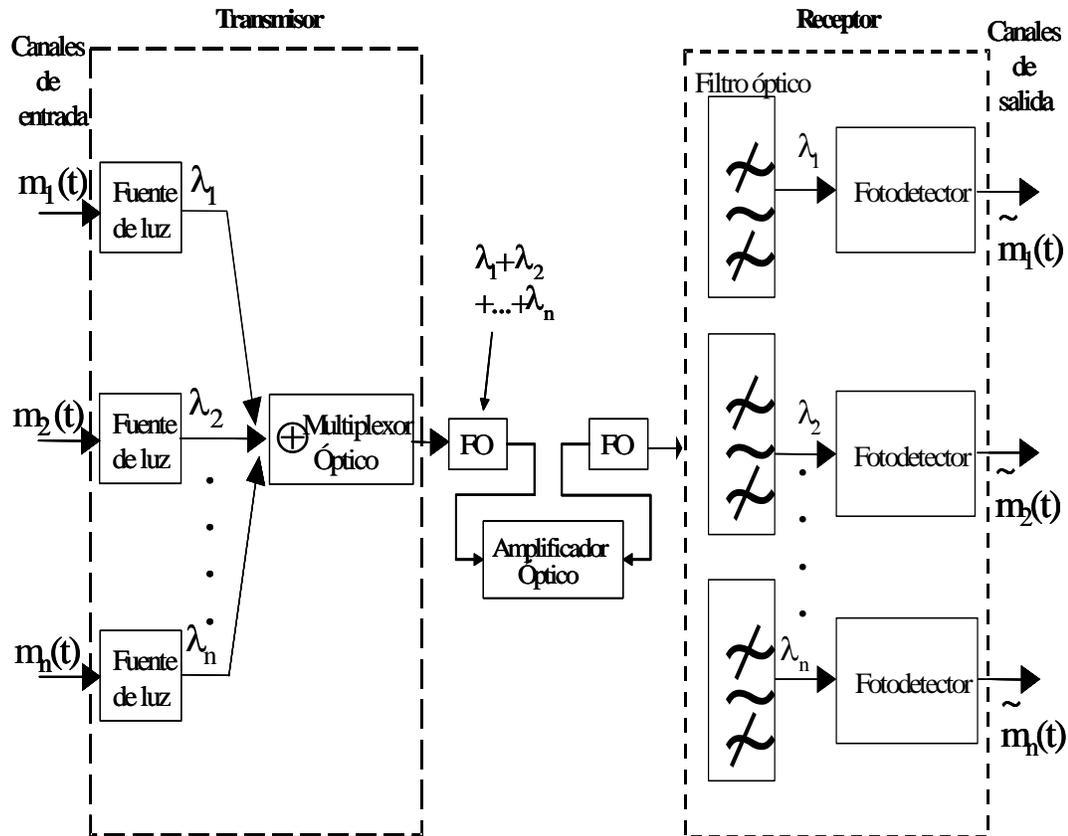


Figura 2.3. Diagrama general de un sistema de comunicación óptica WDM.

Dado que un sistema WDM envía señales de diferentes fuentes sobre una sola fibra, deben incluirse algunos mecanismos para combinar estas señales y enviarlas a través de un mismo medio. Esto lo realiza un multicanalizador, que en sus entradas tiene longitudes de onda de múltiples fibras y las agrupa en una sola fibra.

Al igual que en cualquier sistema de comunicación en donde la distancia entre el extremo transmisor y el extremo receptor es significativa, es necesario amplificar ó regenerar la señal original. Esta acción la llevan a cabo los amplificadores ópticos, tales como los amplificadores de fibra óptica dopada con erbio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*) o los amplificadores ópticos de semiconductor.

El bloque receptor de un sistema WDM está conformado básicamente por filtros ópticos y fotodetectores. Los filtros ópticos constituyen un importante dispositivo para el sistema WDM, pues realizan el proceso de selección de un determinado canal en los bloques receptores, en otras palabras, realizan la demulticanalización óptica.

Por último, se encuentra el fotodetector que realiza la acción antes descrita. Cabe hacer mención que las conexiones existentes entre el multicanalizador, el amplificador óptico, el filtro óptico y el fotodetector son realizadas mediante segmentos de fibra óptica.

Cada componente tiene su propia estructura y modo de funcionamiento, así como su importancia en el desempeño del sistema, por lo que a continuación se llevará a cabo una descripción de cada dispositivo y bloque que conforma un sistema de comunicación óptica WDM.

2.3. Componentes de un sistema de comunicación óptica WDM

2.3.1. Fibra Óptica

Antes de discutir los componentes ópticos, es esencial entender las características de la fibra óptica. La fibra óptica posee diversas propiedades que la convierten en un excelente medio físico para redes de transmisión de alta velocidad, entre las diversas características se encuentran: baja atenuación, alta capacidad de transmisión, inmunidad a la interferencia electromagnética, aislamiento eléctrico y sin pérdida de información en la transmisión [24].

La fibra óptica es básicamente un delgado filamento de vidrio que actúa como guía de onda óptica. La estructura de una fibra se muestra en la Figura 2.4 y corresponde a un núcleo central de vidrio encapsulado en un recubrimiento de plástico. La parte más importante de la fibra es el núcleo, ya que a través de él se realiza la propagación de la luz. El revestimiento es la parte que rodea y protege al núcleo. El conjunto de núcleo y revestimiento está a su vez rodeado por una funda o cubierta exterior de plástico u otros materiales que lo resguardan contra la humedad, la deformación, los roedores y otros riesgos del entorno.

La propagación de la luz a través de la fibra óptica, se logra gracias al fenómeno físico de reflexión total interna [19, 39, 10]. Para entender este fenómeno, es necesario conocer algunos conceptos ópticos básicos.

Para comenzar, la luz viaja a través del vacío a una velocidad (C_0) de 3×10^8 m/s. La luz también puede propagarse a través de algún material transparente, pero su velocidad de propagación será menor. El cociente determinado por la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en un material transparente es conocido como índice de refracción del material (n), es decir $n_{\text{mat}} = c_0 / c_{\text{mat}}$. A manera de referencia, en la tabla 2.1 se muestran los índices de refracción de diferentes materiales, donde está incluido el índice de refracción del material que conforma al núcleo de la fibra óptica (Fibra de vidrio).

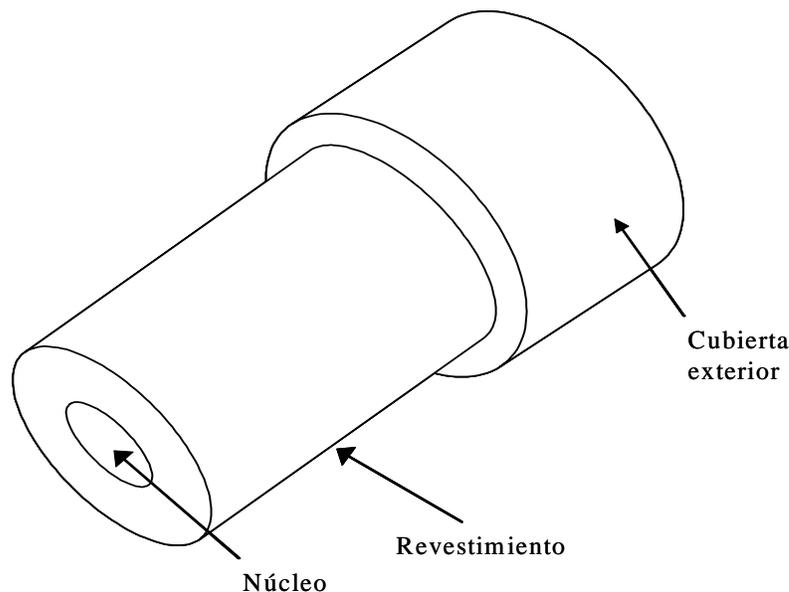


Figura 2.4. Estructura de la fibra óptica.

Tabla 2.1 Índice de refracción de diferentes materiales.

<i>Medio</i>	<i>Índice de refracción</i>
Vacío	1.0
Aire	1.0003 (≈ 1.0)
Agua	1.33
Alcohol etílico	1.36
Cuarzo fundido	1.46
Fibra de vidrio	1.5-1.9
Diamante	2.0-2.42
Silicio	3.4
Galio-arsenuro	3.6

Cuando la luz viaja de un material determinado a un material diferente, ambos con índices de refracción distintos, el ángulo de transmisión de la luz en el segundo material depende de los índices de refracción de los dos materiales, así como también del ángulo de incidencia de la luz sobre la frontera entre los dos materiales. Desde el punto de vista de óptica geométrica, esta dependencia se determina por las leyes de reflexión y refracción. La ley de refracción, también conocida como ley de Snell establece que [19]:

$$n_a \text{ sen } \theta_a = n_b \text{ sen } \theta_b \quad (1)$$

Donde n_a y n_b son los índices de refracción del primer y segundo medio de transmisión, respectivamente; θ_a es el ángulo de incidencia y θ_b es el ángulo de la luz transmitida en el segundo medio de transmisión. De esta manera, tal como se muestra en la Figura 2.5a [24], la introducción de un haz de luz en una fibra óptica obedece a la ley de Snell, donde el primer medio de transmisión está formado por el aire y el segundo medio de transmisión por el núcleo de la fibra.

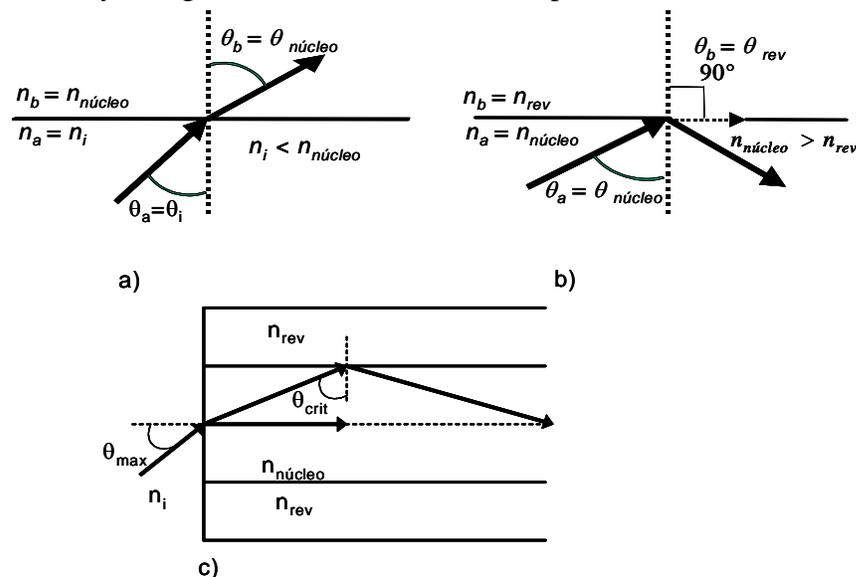


Figura 2.5. a) Fenómeno de refracción, b) Fenómeno de reflexión total interna y c) Ilustración de la introducción y propagación de un haz en una fibra óptica.

Después de que el haz de luz ha sido introducido en la fibra, su propagación a través de ella es debida a reflexiones sucesivas en la frontera núcleo-revestimiento. Cada reflexión es denominada “reflexión total interna”. Esto significa que todo el haz incidente es reflejado nuevamente hacia el núcleo, pero no hay ningún haz de luz transmitido hacia el revestimiento de la fibra, como se observa en la Figura 2.5b [24].

El ángulo sobre el cuál toma lugar la reflexión total interna es conocido como el ángulo crítico y está determinado también por la ley de Snell, donde $\theta_b = \theta_{rev} = 90^\circ$. Es decir, el ángulo crítico se obtiene de:

$$\theta_{crit} = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_{rev}}{n_{núcleo}}\right) \quad (2)$$

Por lo tanto, para la reflexión total interna:

$$\theta_{crit} \geq \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_{rev}}{n_{núcleo}}\right) \quad (3)$$

Por otro lado, la definición del ángulo crítico puede ser usada para encontrar el tamaño del cono de incidencia de luz que puede ser aceptado por una fibra óptica. Si el ángulo máximo de incidencia es θ_{max} y el índice de refracción n_i , como se muestra en Figura 2.5c [24], por la ley de Snell se tiene:

$$n_i \text{sen} \theta_{max} = n_{núcleo} \text{sen} \theta_{núcleo}$$

Expresando $\theta_{núcleo}$ en función de θ_{crit} y utilizando identidades trigonométricas se tiene:

$$\begin{aligned} n_i \text{sen} \theta_{max} &= n_{núcleo} \text{sen}(90^\circ - \theta_{crit}) \\ n_i \text{sen} \theta_{max} &= n_{núcleo} \cos(\theta_{crit}) \\ n_i \text{sen} \theta_{max} &= n_{núcleo} \sqrt{1 - \text{sen}^2(\theta_{crit})} \end{aligned} \quad (4)$$

De acuerdo a la ecuación 3, expresando θ_{crit} en función de los índices de refracción del núcleo y del revestimiento se obtiene:

$$n_i \text{sen} \theta_{\theta_{max}} = \sqrt{n_{núcleo}^2 - n_{rev}^2} \quad (5)$$

Esta última cantidad, llamada apertura numérica (NA, *Numerical Aperture*) es una medición de la cantidad de luz que puede ser captada por un sistema óptico, específicamente por una fibra óptica.

Los valores típicos de NA para fibras ópticas utilizadas en comunicaciones se encuentran en el intervalo de 0.1 para fibras monomodo, de 0.2 a 0.3 para fibras multimodo y cercano a 0.5 para fibras de un núcleo muy grande [38].

2.3.1.1. Fibras monomodo y multimodo

De la sección anterior, aunque se mostró que la reflexión total interna puede ocurrir por algún ángulo $\theta_{núcleo}$ mayor que θ_{crit} , la luz no necesariamente se propaga por todos estos ángulos. Para algunos de estos, la luz no puede propagarse debido a la interferencia destructiva entre la luz inci-

dente y la luz reflejada en la interfaz núcleo-revestimiento dentro de la fibra. Para otros ángulos de incidencia, la onda incidente y la onda reflejada en la interfaz núcleo-revestimiento interfiere constructivamente para mantener la propagación de la onda. Los ángulos para los cuales se propagan las ondas corresponden justamente a los modos en una fibra óptica. Por tanto, un modo corresponde a una de las múltiples maneras en las que una onda puede propagarse a través de la fibra óptica. También puede ser vista como una onda estacionaria en el plano transversal de la fibra. Formalmente, un modo corresponde a una solución de la ecuación de onda derivada de las ecuaciones de Maxwell y sujeta a las condiciones de frontera impuestas por la guía de onda de la fibra óptica [2, 10].

De esta manera, si más de un modo puede propagarse a través de la fibra óptica, la fibra es llamada multimodo. En general, un gran diámetro del núcleo o una gran frecuencia de operación permiten un mayor número de modos.

El número de modos soportados por una fibra óptica multimodo está relacionada con la frecuencia normalizada V , que se encuentra definida como [38]:

$$V = k_o a NA = k_o a \sqrt{n_{\text{núcleo}}^2 - n_{\text{rev}}^2} \quad (6)$$

Donde $k_o = 2\pi/\lambda_0$, a es el radio del núcleo y λ_0 es la longitud de onda de la luz propagada en el vacío. De esta forma, el número de modos m está dado aproximadamente por [10]:

$$m \approx \frac{1}{2} V^2 \quad (7)$$

La ventaja de la fibra multimodo, con respecto a la monomodo, es que el diámetro de su núcleo es relativamente más grande, tal como se muestra comparativamente en la Figura 2.6. Como resultado, se pueden obtener pérdidas mínimas de acoplamiento al introducir un rayo de luz dentro de una fibra multimodo.

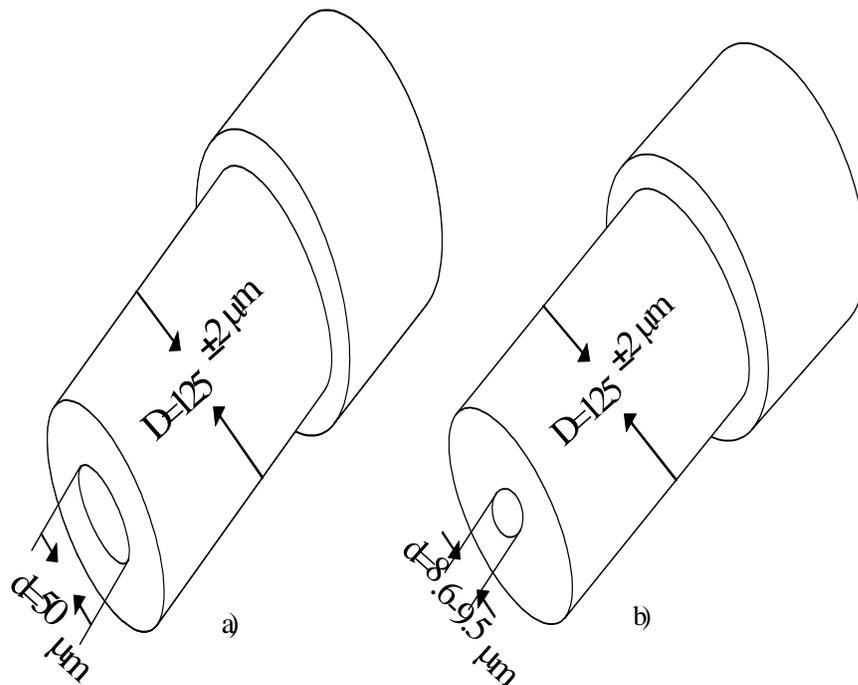


Figura 2.6. Diámetros de las fibras a) multimodo y b) monomodo.

La desventaja de la fibra multimodo es que produce el fenómeno de dispersión intermodal [10]. Este fenómeno se describe en la siguiente sección. Una manera de limitar la dispersión intermodal es reducir el número de modos. De las ecuaciones 6 y 7, se observa que puede obtenerse una disminución en el número de modos al reducir el diámetro del núcleo, disminuyendo la apertura numérica o incrementando la longitud de onda del rayo de luz.

Reduciendo el núcleo de la fibra a un diámetro lo suficientemente pequeño y disminuyendo la apertura numérica, es posible obtener sólo un modo en la fibra. La fibra monomodo usualmente tiene un núcleo de alrededor de 10 μm de diámetro, mientras que la fibra multimodo tiene normalmente un diámetro de núcleo de 50-100 μm .

Dentro de las fibras multimodo se realiza la clasificación en: fibras multimodo de Salto de índice y de Índice de gradiente gradual.

Las fibras multimodo de salto de índice son aquellas en las que el índice de refracción permanece constante en toda su sección. Son las menos usadas en telecomunicaciones, utilizadas únicamente en aplicaciones con pequeños anchos de banda.

Las fibras multimodo de índice de gradiente gradual presentan un índice de refracción radialmente variable en el núcleo, siendo máximo en el centro y disminuyendo hacia la periferia.

Una Fibra de salto de índice puede soportar una fibra monomodo si V en la ecuación 4 es menor que 2.4048 [38]. De esta manera, la fibra monomodo elimina la dispersión intermodal y puede soportar transmisiones a distancias mucho más grandes [10].

En la tabla 2.2 [31] se muestra una comparativa entre las características de las fibras monomodo y las fibras multimodo.

Tabla 2.2. Comparación de las características de fibras multimodo con fibras monomodo

Características	Fibras Multimodo		Fibras monomodo
	Salto de índice	Índice de gradiente gradual	
Diámetro del núcleo	100 μm -600 μm	50 μm -100 μm	8 μm -10 μm
Diámetro de cubierta	140 μm -1000 μm	25 μm -150 μm	125 μm
Apertura numérica	0.3	0.20 a 0.27	
Índice de refracción	Constante	Gradual	Decreciente
Atenuación 0.85 μm	8 a 20 dB/Km		
Atenuación 1.3 μm		2.5 a 4 dB/Km	0.3 a 0.5 dB/Km
1.55 μm		0.6 a 1.5 dB/Km	0.150 a 0.3 dB/KM

2.3.1.2. Atenuación en la fibra óptica

La pérdida de potencia y la distorsión que sufre un rayo de luz al propagarse por la fibra óptica repercuten significativamente en el diseño de un sistema de comunicación óptica. En este sentido, uno de los parámetros más importantes es la atenuación en la fibra óptica, entendida como la reducción de potencia de la señal óptica a medida que se propaga a lo largo de la fibra, expresada en dB/km. Por consiguiente, la atenuación determina la máxima distancia de propagación a lo largo de la fibra, para una determinada potencia de transmisor y sensibilidad de receptor [10]. La atenuación en la fibra depende de diferentes factores, tales como las fluctuaciones del índice de refracción, las

imperfecciones de la fibra y las impurezas contenidas en el material de construcción de la fibra óptica. De esta forma, la atenuación (también llamada constante de atenuación $\alpha(\lambda)$ o coeficiente de atenuación Γ) se obtiene de [24]:

$$P(L) = 10^{\frac{-\alpha L}{10}} P(0) \quad (8)$$

Donde $P(0)$ es la potencia óptica a la entrada de la fibra y $P(L)$ es la potencia óptica a una distancia L (km) de propagación. Para una longitud de enlace L , evidentemente $P(L)$ es menor que $P(0)$, no obstante debe ser mayor ó igual que la sensibilidad del receptor P_r . De la ecuación 8, se tiene:

$$L_{\max} = \frac{10}{\alpha} \log_{10} \frac{P(0)}{P_r} \quad (9)$$

De acuerdo a la expresión anterior, la máxima distancia entre el transmisor y el receptor, depende mayormente de la constante α y no de la potencia óptica a la entrada de la fibra, es decir, no depende esencialmente de la potencia de la fuente de luz. Por otro lado, la constante de atenuación $\alpha(\lambda)$, en general, presenta una dependencia no lineal con la longitud de onda del haz de luz que se propaga en la fibra y se determina mediante la siguiente expresión [24]:

$$\alpha(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^4} + C_2 + A(\lambda) \quad (10)$$

Donde C_1 es una constante debida a la dispersión Rayleigh, C_2 es una constante debida a las imperfecciones de la fibra y $A(\lambda)$ es una función que describe la absorción de la luz a la longitud de onda de operación debida a las impurezas en la fibra. De aquí se deduce que la constante de atenuación es única para cada tipo diferente de fibra óptica y para cada longitud de onda de operación. De acuerdo a normas internacionales (ITU-T G.652) [24], en la tabla 2.3 se presentan algunos valores de atenuación permitidas para fibras monomodo y multimodo.

Tabla 2.3. Atenuaciones para diversas longitudes de onda y diferentes fibras.

	Longitud de onda	Atenuación
Fibra multimodo 50/125	830 nm	Entre 3 y 3.2 dB/km
Fibra monomodo estándar	1300 nm	Entre 0.7 y 0.8 dB/km
	1300 nm	De 0.4 a 1.0 dB/km
	1550 nm	De 0.25 a 0.5 dB/km

2.3.1.3. Dispersión en la fibra

Otro de los parámetros importantes es la dispersión en la fibra, entendida como el ensanchamiento temporal de un pulso conforme se propaga a través de ella [10]. Dicho ensanchamiento puede llegar a ser lo suficientemente grande como para interferir con un pulso adyacente. De esta manera, la dispersión limita el espaciamiento entre pulsos y por tanto la velocidad de transmisión máxima en un enlace de fibra óptica.

Como fue mencionado anteriormente, la dispersión intermodal es una forma de dispersión causada por la propagación simultánea de múltiples modos a diferentes velocidades a lo largo de la fibra. Evidentemente, la dispersión intermodal no sucede en la fibra monomodo.

Otra forma de dispersión es la material, también llamada dispersión cromática. Este fenómeno se presenta en un medio dispersivo, es decir, un medio en el que su índice de refracción es función de la longitud de onda [2, 10]. De esta manera, si la señal transmitida consiste de más de una longitud de onda, ciertas longitudes de onda se propagaran mucho más rápido que otras.

Un tercer tipo de dispersión es la de guía de onda y se presenta debido a que la propagación de las diferentes longitudes de onda es dependiente de las características de la fibra óptica, tales como su índice de refracción, la geometría del núcleo y del revestimiento de la fibra [2, 10].

Cabe hacer mención que existen otras causas por las que el desempeño de los sistemas de comunicación óptica no es el deseado, las que básicamente están constituidas por las pérdidas de acoplamiento. Por la importancia que tienen en la implementación de los sistemas reales, serán mencionadas posteriormente.

2.3.1.4. No linealidades en la fibra óptica

Los efectos no lineales en la fibra pueden tener potencialmente un impacto negativo en el desempeño de los sistemas de comunicación óptica WDM generando una significativa atenuación, distorsión e interferencia. En un sistema WDM, estos efectos imponen las restricciones en el espaciado entre los canales adyacentes, limitando la potencia máxima en cada canal y la tasa máxima de transmisión. Los efectos no lineales más importantes son la automodulación de fase (SPM, *Self Phase Modulation*), la modulación de fase cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*), la dispersión estimulada Raman (SRS, *Stimulated Raman Scattering*), la dispersión estimulada Brillouin y la mezcla de cuatro ondas (FWM, *Four Wave Mixing*) [10].

2.3.2. Fuentes de luz

De manera general, las fuentes de luz utilizadas en comunicaciones ópticas tienen la función de generar un haz de luz con una potencia variable, determinada por un canal de información. En este sentido, las fuentes de luz pueden verse como transductores que convierten señales eléctricas en señales ópticas para su propagación a través de la fibra óptica [38]. Las fuentes de luz generalmente utilizadas para estas aplicaciones son los diodos emisores de luz (LED, *Light Emission Diode*) y los diodos láser de inyección (ILD, *Injection Laser Diode*), también llamados láseres de semiconductor [2]. Cada una de estas fuentes de luz posee sus características propias, de manera que la selección de un dispositivo sobre otro se determina por los requerimientos económicos y de rendimiento del sistema de comunicación [36].

2.3.2.1. Láser

La palabra láser es una abreviación de la expresión en inglés que describe a un dispositivo en el que se presenta el fenómeno conocido como amplificación de luz por emisión estimulada de radiación (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) [7]. La concepción de estos dispositivos ha sido el producto de una evolución continua en la generación de fuentes de radiación coherente. El primer paso fue el máser (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) que se desarrolló en la década de los cincuenta. Posteriormente, con el conocimiento del bombeo óptico, la evolución de los primeros láseres en los años sesenta presentó un crecimiento constante. El primer láser realizado se basaba en un cristal de rubí iluminado por una lámpara de destello. A partir del primer láser hasta la fecha, se han empleado una gran variedad de materiales para su construcción, diferentes mecanismos de bombeo y estrategias de diseño. De igual manera, las aplicacio-

nes de estos dispositivos han sido muy variadas, tanto en áreas científicas como en ingeniería. Debido a esto, en numerosas referencias se encuentran descritas sus características intrínsecas [42], su principio de operación [39] y sus aplicaciones en el área de comunicaciones ópticas [14, 2]. Por consiguiente, en este trabajo de tesis no se pretende una explicación exhaustiva de estos dispositivos, sino la extracción de las principales características que permiten su aplicación en los sistemas WDM.

2.3.2.1.1. Principio de operación de un láser

En general, los láseres son dispositivos que generan o amplifican luz. En este caso, debe entenderse a la luz en un sentido general, es decir, como una representación de energía electromagnética, sin importar si se encuentra dentro o fuera del espectro visible. Como se muestra en la Figura 2.7, los elementos esenciales para la operación de un láser son: 1) la presencia de un medio amplificador, conformado por una colección apropiada de átomos, moléculas, iones o estructuras cristalinas; 2) un proceso de bombeo para excitar a estos átomos hacia diferentes niveles de energía (de niveles de energía estables a niveles de energía superiores) y 3) un mecanismo de retroalimentación óptica que permita la propagación repetida de la radiación generada hacia el medio activo. Cada uno de los elementos esenciales para la operación láser se encuentran en una gran variedad de formas y estilos, aunque una clasificación importante se enfoca sobre el material de construcción del medio amplificador, también conocido como medio activo o región activa, como se muestra en la tabla 2.4.

Una vez que se han conjuntado los elementos necesarios, se deben propiciar condiciones apropiadas para la operación láser. La primera condición es el establecimiento de átomos excitados en la región activa. Es decir, el proceso de bombeo debe asegurar que una gran cantidad de átomos de la región activa tengan electrones en sus orbitales de excitación. Ésta condición es conocida como inversión de población y se consigue únicamente si el mecanismo de bombeo es suficientemente intenso. Después de que se ha alcanzado la inversión de población, mediante el proceso de emisión estimulada, es posible la amplificación coherente de radiación electromagnética en un estrecho intervalo de frecuencias, si dicha radiación se propaga a través del medio activo. En este caso, la frecuencia de radiación depende de los materiales de construcción del medio activo.

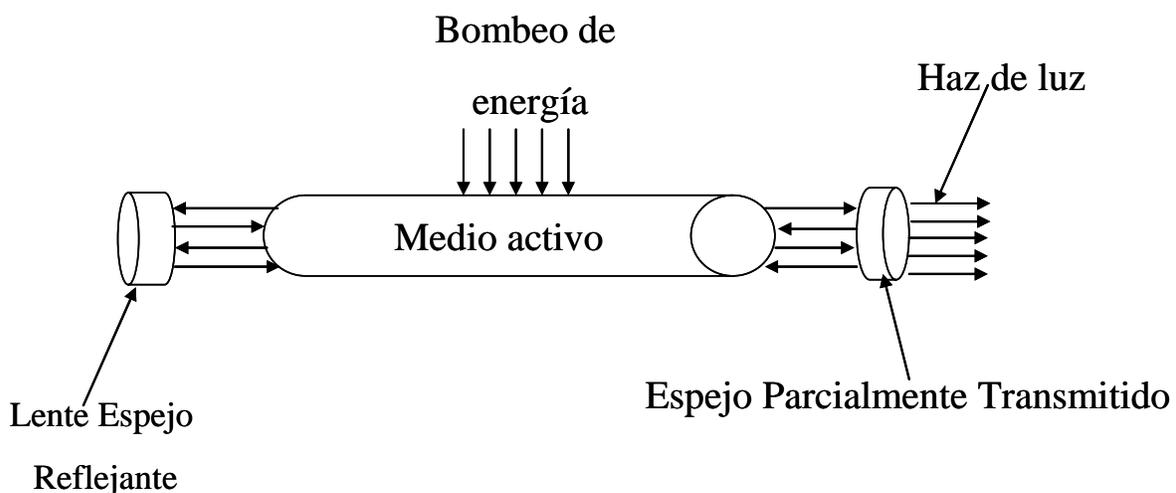


Figura 2.7. Estructura del láser.

Tabla 2.4. Materiales utilizados en la construcción del medio activo de un láser.

Material Láser	Longitud de onda (μm)
Estado sólido	
GaAs	0.87
InGaAs	1.0-1.3
InGaAsP	0.9-1.7
AlGaAs	0.8-0.89
Rubí	0.694
Nd-Yag	1.06
Gas	
CO ₂	10.6

En esta descripción, debe entenderse a la amplificación coherente como la propiedad que tiene un amplificador para entregar en su salida una señal con las mismas características de la señal de entrada, con un inherente incremento en amplitud. Continuando con las condiciones para la operación láser, el proceso para provocar una oscilación sostenida es la combinación de la amplificación coherente con el mecanismo de retroalimentación óptica. Esta retroalimentación es proporcionada mediante la inserción de espejos reflectores en los extremos o paredes de la región activa. Dichos espejos deben estar cuidadosamente alineados para permitir que la reflexión genere la menor cantidad posible de pérdidas de la onda radiada reflejada. De esta forma, si la amplificación total dentro de la cavidad óptica (es decir, la amplificación total dentro del sistema región activa-espejos) excede las pérdidas totales (incluyendo las de reflexión y las de dispersión dentro de la región activa), entonces es posible el establecimiento de una oscilación óptica sostenida en el dispositivo láser.

Al establecerse la oscilación coherente, el haz generado es fuertemente direccional y monocromático. Este haz puede ser acoplado al exterior del dispositivo láser modificando uno de los espejos de la región activa, construyéndolo de forma que no tenga una reflectividad total, es decir, que sea un espejo parcialmente reflejante. De esta forma, el haz generado a la salida del láser presentará las características de ser monocromático, coherente y relativamente potente.

Para finalizar esta sección, es necesario mencionar que el principio de operación de los láseres es aplicable a cualquiera de ellos, sin importar el material de su región activa. Por lo que, el tipo de medio activo, aunado a la estructura geométrica y al proceso de bombeo, es lo que determina la clasificación de los láseres y sus aplicaciones. Por lo tanto, en la siguiente sección se describen, a nivel general, las principales características intrínsecas y de operación de los láseres de semiconductor, dispositivos aplicables en el área de comunicaciones ópticas.

2.3.2.1.2. Láseres de semiconductor

Para comenzar, el medio activo de un láser de semiconductor está formado por un conjunto de átomos con características especiales. Dichas características pueden entenderse considerando un modelo atómico simplificado, formado por un núcleo con electrones girando a su alrededor en órbitas discretas, como se muestra en la Figura 2.8a [4]. Cada electrón tiene asociada una energía potencial en relación con su órbita de desplazamiento. En condiciones normales y con ausencia de energía externa, los electrones se aglutinan en los niveles más bajos de energía y están imposibilitados para emigrar a una órbita energética superior. En estas condiciones, los orbitales normalmente vacíos de electrones se denominan orbitales de excitación. Sin embargo, en un escenario diferente en el que se proporciona energía externa al átomo, los electrones tienen la posibilidad de emigrar a un orbital superior, convirtiéndolo en un átomo excitado.

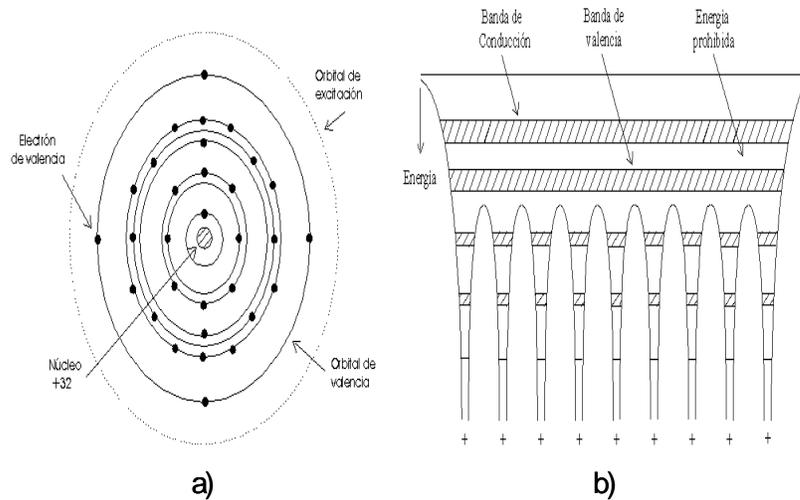


Figura 2.8. a) Modelo atómico simplificado. b) Bandas de energía para un material formado por un conjunto de átomos cercanamente espaciados.

Evidentemente, el modelo atómico simplificado es una situación hipotética, ya que la región activa del láser no está formada por un átomo individual, sino por un conjunto muy grande de átomos cercanamente espaciados. En estas condiciones, el sistema multi-atómico no posee “niveles de energía” como los que contiene un átomo individual, sino poseerá “intervalos de energía” o “bandas de energía”, como se muestra en la Figura 2.8b [4]. La banda que bajo condiciones normales (esto es, con ausencia de energía externa) se encuentra llena o parcialmente llena de electrones se denomina “banda de valencia” y la banda que se encuentra vacía de electrones se denomina “banda de conducción”. Con base a esto se establece la existencia de una banda prohibida entre la de conducción y la de valencia, es decir, un intervalo de energías en el cual no hay niveles de energía permitidos para los electrones, denominada “banda prohibida” o “banda gap”. Tomando en cuenta estos conceptos, se puede definir a un semiconductor como un material sólido, cristalino o amorfo, con una energía prohibida moderada, cuya magnitud se encuentra entre las energías prohibidas correspondientes a los conductores y a los aislantes.

Siguiendo con la descripción, una de las peculiaridades de los semiconductores es que pueden combinarse con átomos de materiales con una cantidad diferente de electrones de valencia, llamados átomos de impureza, formando así semiconductores extrínsecos. Solo existen dos combinaciones posibles, en una de ellas se realiza la agregación de átomos de impureza con una cantidad mayor de electrones de valencia, formando un semiconductor extrínseco tipo n. La otra combinación se realiza con la agregación de átomos de impureza con una cantidad menor de electrones de valencia, formando un semiconductor extrínseco tipo p. En el primer caso, los átomos de impureza aportan electrones a la banda de conducción, mientras que en el segundo se aportan huecos (ausencia de electrones) en la banda de valencia.

Con estos antecedentes referentes a la estructura atómica y a los materiales semiconductores, se está en posibilidad de describir las características de la región activa de un láser de semiconductor. En este sentido, el medio activo de este tipo de láseres se encuentra justamente en la unión de dos semiconductores extrínsecos diferentes, es decir, en la unión n-p. De esta manera, la unión n-p es el escenario donde se llevan a cabo todos los procesos físicos necesarios para la acción de un láser de semiconductor, desde la inversión de población hasta la absorción, la emisión espontánea y la emisión estimulada.

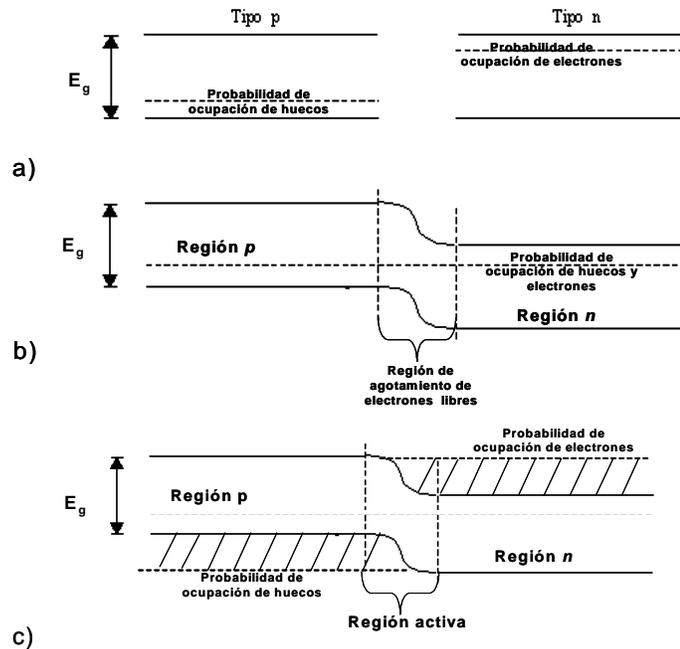


Figura 2.9. a) Probabilidades de ocupación de electrones y huecos para un semiconductor tipo n y tipo p . b) Probabilidades de ocupación de electrones para una unión $n-p$ en equilibrio térmico. c) Probabilidades de ocupación de electrones y de huecos para una unión $n-p$ polarizada directamente (inversión de población).

Por lo tanto, teniendo el medio idóneo para la región activa, es necesario el establecimiento de la inversión de población mediante el bombeo de electrones hacia dicha región. El bombeo eléctrico se realiza mediante la polarización directa de la unión $n-p$, rompiendo así el equilibrio termodinámico presente en la región activa en ausencia de energía externa. En dichas condiciones de bombeo eléctrico, en la banda de conducción se tendrá una gran cantidad de electrones que pueden interactuar con los huecos presentes en la banda de valencia. De manera ilustrativa, en la Figura 2.9 [32] se muestra un diagrama simplificado de bandas de energía en los diferentes estados o condiciones que se presentan en una unión $n-p$ hasta conseguir el establecimiento de la inversión de población.

La interacción de electrones y huecos dentro de la región activa puede presentarse de diferentes maneras, como se muestra en la Figura 2.10. En una de ellas, un electrón de valencia puede adquirir la energía necesaria para ascender a la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia. Si la energía de excitación es proporcionada por un fotón (energía luminosa), entonces se presenta el fenómeno de absorción.

Otra posibilidad de interacción se presenta en la recombinación espontánea de un electrón excitado con un hueco de la banda de valencia. Si el exceso de energía es liberado en forma de un fotón, se presenta el fenómeno de emisión espontánea. En este caso, el fotón emitido posee una energía, estado de polarización y dirección de propagación aleatorias. Finalmente, la otra posibilidad, considerada como la más importante para la acción láser es la recombinación no espontánea entre un electrón excitado y un hueco de la banda de valencia, provocada por la incidencia de un fotón sobre dicho electrón. Si el exceso de energía es liberado en forma de un fotón, se presenta el fenómeno de emisión estimulada. A diferencia de la emisión espontánea, el fotón emitido posee la misma energía, la misma polarización y la misma dirección de propagación que el fotón incidente. Como resultado de la emisión estimulada, por cada fotón incidente se provoca la generación de dos fotones con las mismas características.

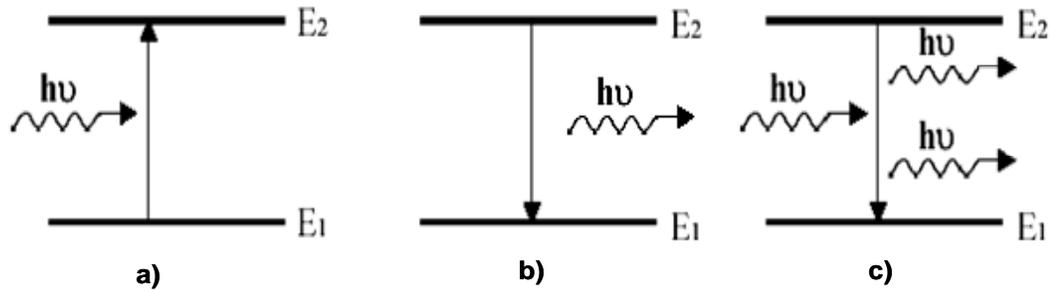


Figura 2.10.a) Absorción, b) Emisión Espontánea y c) Emisión estimulada.

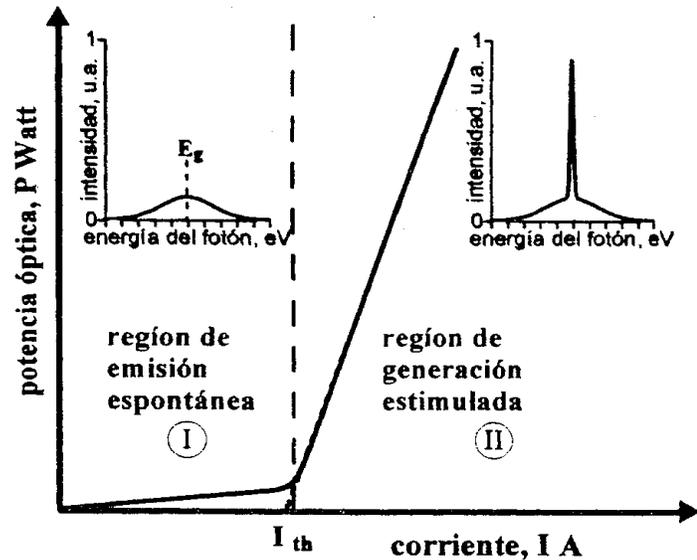


Figura 2.11. Curva característica de potencia óptica contra corriente eléctrica aplicada en un láser de semiconductor.

De esta manera, mediante la emisión estimulada se genera una gran cantidad de fotones con las mismas propiedades, que al propagarse a través de la región activa y experimentar la retroalimentación óptica, logran generar un haz de luz coherente a la salida del láser.

Una forma de ilustrar experimentalmente los mecanismos internos para la acción láser se fundamenta en la observación de la curva característica de potencia emitida contra corriente de polarización, también llamada “característica watts-amperios”, como se muestra en la Figura 2.11 [34]. Como puede observarse, la gráfica está dividida en dos regiones bien definidas. La primera región corresponde al régimen de emisión espontánea, donde la corriente de polarización es muy pequeña y la cantidad de electrones excitados no es lo suficientemente grande como para asegurar una oscilación láser. En estas condiciones, el ancho espectral de la radiación emitida es relativamente amplio pero la potencia de emisión es casi despreciable, alcanzando un máximo que corresponde con la energía prohibida del medio activo.

La segunda región, que se presenta a partir de una corriente eléctrica determinada, llamada corriente de umbral (I_{th}), corresponde al régimen de emisión estimulada amplificada. En este caso, el fuerte bombeo eléctrico asegura una inversión de población y por consiguiente una oscilación láser sostenida. Como consecuencia de la emisión estimulada, el espectro de emisión es bastante reducido y la potencia óptica a la salida del láser crece proporcionalmente con la corriente eléctrica. De esta curva característica y de las propiedades intrínsecas de la región activa, se derivan muchas otras

cualidades de los láseres de semiconductor que determinan su comportamiento estático (también llamado de onda continua) y su comportamiento dinámico (modulación en pequeña señal). Entre las más importantes se encuentran la potencia óptica máxima de emisión, la pureza espectral del haz emitido (ancho de línea) y la longitud de onda de operación.

Con respecto a la longitud de onda de operación, esta característica es determinante para el uso de un láser en una aplicación real de un sistema de comunicación óptica WDM, ya que en este tipo de redes de comunicación se requiere del envío de información a través de diferentes longitudes de onda portadoras. En este sentido, no sólo es necesaria la construcción de láseres a diferentes frecuencias de operación, también se requiere que estos dispositivos tengan la capacidad de emitir un haz a una longitud de onda deseada dentro de un intervalo determinado, es decir, que sean sintonizables.

Para la construcción de láseres sintonizables, en la actualidad se dispone de diferentes estrategias entre las que se encuentran: láseres sintonizados mecánicamente, láseres sintonizados acusto-ópticamente o electro-ópticamente, láseres sintonizables por inyección de corriente. Los detalles específicos de operación y construcción de estos dispositivos están fuera del alcance de este trabajo de tesis, sin embargo, a continuación se describe de manera muy general su principio de sintonización.

Un láser sintonizado mecánicamente usa una cavidad Fabry-Perot adyacente al medio activo (por ejemplo, una cavidad externa) para filtrar determinadas longitudes de onda. La sintonización es llevada a cabo ajustando físicamente la distancia entre las dos lentes en cualquier extremo de la cavidad, de tal manera que solamente la longitud de onda deseada interfiera constructivamente con sus reflexiones múltiples dentro de dicha cavidad. Las longitudes de onda de sintonización se encuentran dentro del espectro de ganancia de un láser semiconductor y el tiempo de sintonización, que se encuentra en el orden de los milisegundos, está limitado por la naturaleza mecánica de la sintonía y por la longitud de la cavidad [10].

Los láseres sintonizados acusto-ópticamente y electro-ópticamente utilizan un filtro sintonizable controlado mediante ondas de sonido y corriente eléctrica, respectivamente, con el objetivo de establecer un cambio en el índice de refracción. Este cambio de índice resulta en la transmisión de luz a diferentes frecuencias. En estos tipos de láseres sintonizables, el tiempo de sintonización está limitado por el tiempo requerido por la luz para establecer la cavidad en la nueva frecuencia. De manera comparativa, un láser acusto-óptico combina un intervalo de sintonización moderado con tiempo de sintonización razonable. Esto significa que mientras no se requiera una gran rapidez para la conmutación de paquetes con canales multigigabit por segundo (MGbps), los 10 μ s del tiempo de sintonización representan una enorme mejoría sobre los láseres sintonizados mecánicamente [10]. Por otro lado, los láseres sintonizados electro-ópticamente poseen un tiempo de sintonización en el orden de nanosegundos.

Finalmente, los láseres sintonizables por inyección de corriente forman parte de la familia de transmisores ópticos que permiten la selección de la longitud de onda mediante una rejilla de difracción. Los láseres de cavidad distribuida (DFB, *Distributed Feedback laser*) usan una rejilla de difracción localizada en el medio activo. Esta rejilla consiste de una guía de onda en la que su índice de refracción alterna periódicamente entre dos valores. De esta forma, el láser es sintonizado al inyectar una corriente que cambia el índice de la rejilla. Si la rejilla es desplazada al exterior del medio activo, se tiene un láser reflector de Bragg distribuido (DBR, *Distributed Bragg Reflector*). En estos láseres, los tiempos de sintonización son bastante pequeños, menores a los 10 ns [10].

A manera de resumen, en las tablas 2.5 y 2.6 se muestran comparaciones de diversas características de los láseres como son: el tiempo de sintonización, el intervalo de sintonización, la potencia de emisión y el ancho de línea.

Tabla 2.5. Intervalo y tiempo de sintonización de los láseres sintonizables

Láseres Sintonizables	Intervalo de sintonización	Tiempo de sintonización
Mecánico (Cavidad externa)	500 nm	1-10 ms
Acusto-Óptico	83 nm	10 μ s
Electro-Óptico	7 nm	1-10 μ s (estimado)
Inyección de corriente (DFB y DBR)	10 nm,	1-10 μ s

Tabla 2.6. Potencias de salida de los láseres

Tipos de Láser	Potencia de salida	Ancho de línea (nm)
Diodos		
Led	0.1-10 mW	20-100
Diodo láser	1- 40 mW	1-5
Láser Feedback	1-40 mW	0.1
Tubos		
CO ₂	1-5 W	0.01-1.0
HeNe	50-100 mW	0.01-1.0

2.3.2.2. Led

Al igual que un láser de semiconductor (LS), un led está compuesto por una unión p-n, pero la diferencia fundamental radica en la ausencia de la cavidad resonante. Expresado en otras palabras, el proceso responsable para la generación de luz en un led es la emisión espontánea y no la emisión estimulada. Con este hecho, la luz emitida es no coherente, posee un ancho espectral relativamente amplio (30-60 nm), presenta una dispersión angular amplia con un perfil Lambertiano y la potencia de emisión es considerablemente inferior a la potencia de un láser de semiconductor [2, 39].

Con respecto a su estructura interna, dependiendo de la región de emisión de luz, estos dispositivos se clasifican en led's de emisión de superficie y en led's de emisión de borde, como se muestra en la Figura 2.12 [41]. En el primer tipo de led's, la luz es emitida a través de una de las facetas paralelas al plano de la unión n-p, mientras que la luz emitida por la faceta opuesta es reflejada hacia la región activa a través del sustrato y del contacto metálico del dispositivo. Por otro lado, en los led's de emisión de borde, la luz es emitida a través del borde de la unión n-p.

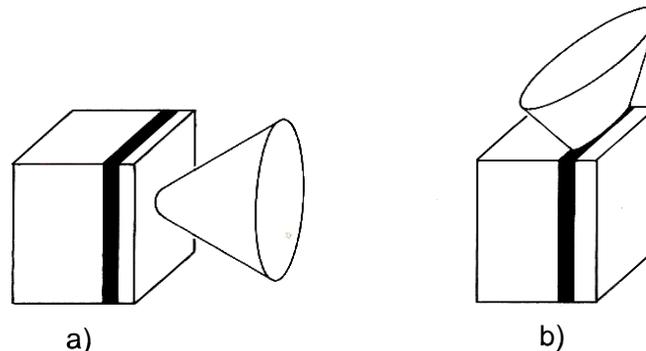


Figura 2.12. a) Led de emisión de superficie y b) Led emisión de borde.

De manera comparativa, los led's de emisión de borde se caracterizan por un haz cuya divergencia es menor que la presente en un led's de emisión de superficie, permitiendo un acoplamiento considerable de luz hacia una fibra óptica [36]. Además de esto, los led's de emisión de borde po-

seen un ancho de banda generalmente más grande que el de los led's de emisión de superficie, del orden de 200 MHz. Por otro lado, con la finalidad de mejorar el desempeño de los led's de emisión de superficie y aplicarlos eficientemente en las comunicaciones ópticas, una variante de estos dispositivos es denominada tipo Burrus [36], en donde se realiza la interconexión directa con un segmento de fibra óptica. En este diseño, el área de emisión se encuentra en una pequeña región cuyas dimensiones son comparables con el núcleo de una fibra óptica. Con esto se logra acoplar más del 1% de la potencia generada internamente hacia la fibra y por lo tanto se reducen considerablemente las pérdidas por acoplamiento que presentan estos dispositivos.

Con la información proporcionada en la tabla 2.7 [30], se puede comprobar que para las mismas longitudes de onda de operación, la potencia promedio de un láser de semiconductor es mayor a la potencia promedio de un led, mientras que el ancho espectral de un láser es mucho menor que el de un led.

Para finalizar esta sección y con la finalidad de resaltar las principales propiedades comparativas de las fuentes de luz utilizadas en comunicaciones, en la tabla 2.7 se presentan las características principales de los láseres de semiconductor y de los led's disponibles comercialmente.

Con esto se concluye que para los sistemas WDM, las fuentes de luz evidentemente deben estar conformadas por láseres de semiconductor, ya que proporcionan una mayor potencia de emisión y un menor intervalo espectral, lo que permite una mayor distancia de propagación y una mayor cantidad de canales multiplexados en longitud de onda.

2.3.3. Multicanalizador óptico

Los multicanalizadores ópticos son dispositivos especializados que combinan una cierta cantidad de rayos ópticos en distintas longitudes de onda y permiten enviarlas por un canal de fibra óptica simple [25]. En ocasiones, esta combinación necesita no ser uniforme para todas las longitudes de onda; esto es, algunas veces se requiere combinar 25 % de la potencia de una longitud de onda y 75 % de otra fuente. Un componente que presenta estas características es un acoplador direccional, que en el caso de este trabajo de tesis fue el dispositivo empleado para realizar la multicanalización óptica. Sin embargo, cabe hacer mención que no es el único componente utilizado como multicanalizador óptico, pero debido a la gran diversidad de estos, resulta una tarea fuera del alcance de este trabajo de tesis presentar cada uno y únicamente se describirá el acoplador direccional.

Tabla 2.7. Comparación de las propiedades de emisión de láseres de semiconductor y led's comerciales

Intervalo de Longitud de onda	Tipo de fuente	Máxima potencia	Ancho espectral	Comentarios/ Aplicaciones
400-500 nm	led	4-6 mW	30-60 nm	
	Láser de semiconductor	5-10 mW	< 3 nm	
630-690 nm	led	0.5-1 mW	20-60 nm	Comunicaciones ópticas
	Láser de semiconductor Fabry Perot (FP)	1-50 mW	< 3 nm	Uso extendido
780-860 nm	led	60 μ W	50-80 nm	Comunicaciones ópticas
	FP	> 2 kW	< 3 nm	Uso extendido
910-1100 nm	FP	> 160 mW	< 3nm	Bombeo
1300-1550 nm	led	17-70 μ W	60-200 nm	
	FP	1-5 mW	2-2.5 nm	Comunicaciones ópticas

Como introducción a los acopladores direccionales, se puede mencionar que estos tienen muchas aplicaciones interesantes, por ejemplo, son utilizados en multicanalización-demulticanalización por división de longitud de onda, división de la polarización, etc. [33, 30, 27].

Los acopladores direccionales están constituidos generalmente de dos fibras monomodo fusionadas en algún punto, como se ilustra en la Figura 2.13. En otras palabras, los núcleos de las dos fibras están fusionadas y dentro de la misma cubierta, presentándose una alta eficiencia de acoplamiento y por consiguiente un intercambio de energía de una fibra a otra [31].

Para lograr el acoplamiento entre las fibras existen diversas técnicas, pero la más utilizada es la llamada técnica de fusión y estiramiento. En esta técnica, las dos fibras ópticas son trenzadas y posteriormente calentadas a aproximadamente 1500 °C; mientras las fibras están siendo calentadas son sometidas a una tensión que provoca su estiramiento. Este estiramiento incrementa el acoplamiento entre los dos núcleos de las fibras ópticas por dos mecanismos. El primero ocurre cuando la fibra óptica es estirada con lo que el revestimiento de la fibra se va adelgazando, causando que los dos núcleos de las fibras se vayan uniendo. El segundo ocurre como consecuencia del adelgazamiento del mismo núcleo, provocándose un decremento en la frecuencia normalizada de la fibra, la cual fue mencionada en la sección 2.3.11. De esta manera, lo que se propicia es el traslape de los campos evanescentes entendiéndose esto último como el fenómeno experimentado por la luz en los límites de algún material con cambios de índices de refracción. Es decir, la luz puede ser totalmente reflejada por el límite de algún material, parte del campo eléctrico puede atravesar el otro límite, ocupando ambos medios. Éste es el caso para la fibra óptica, en la cual la luz es guiada por el medio interno de más alto índice de refracción (núcleo), pero realmente una pequeña porción del campo eléctrico $E(x)$ viaja en el revestimiento, como se muestra en la Figura 2.14 [30]. Por tal motivo, en la construcción de un acoplador direccional es deseable que los campos evanescentes se traslapen ya que cuando esto ocurre la energía entre las dos fibras se comparte y puede ser transferida de una a otra, permitiendo además que exista un mayor acoplamiento de potencias entre éstas.

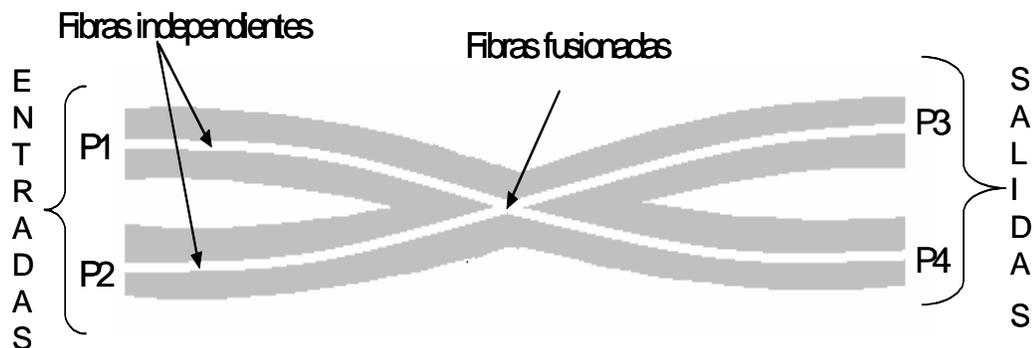


Figura 2.13. Configuración típica de un acoplador direccional.

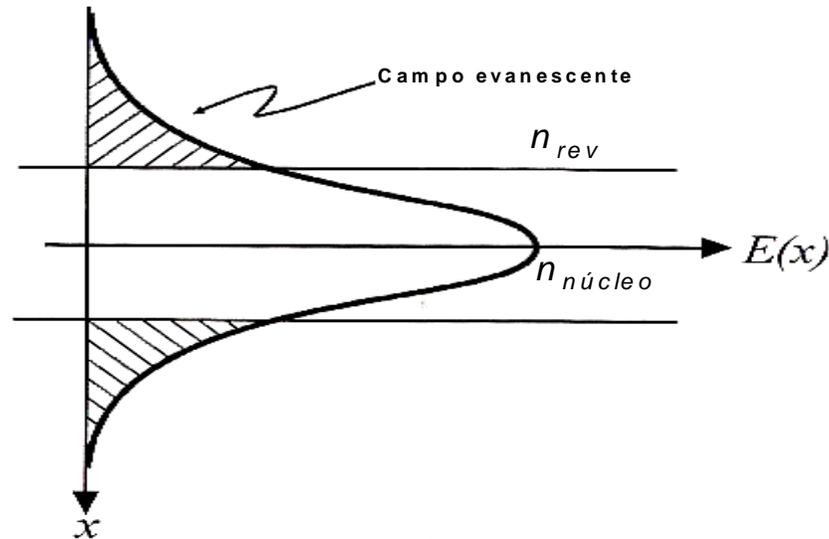


Figura 2.14. Campo evanescente en la fibra óptica.

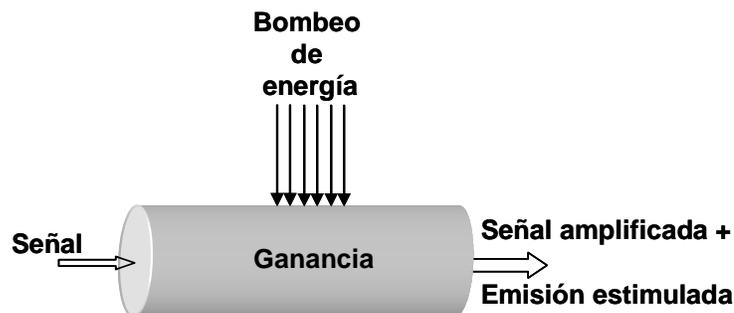


Figura 2.15. Principio de funcionamiento de un amplificador óptico.

Una configuración típica de los acopladores direccionales son los denominados 2X2, llamados de esta manera porque cuentan con dos entradas (P1 y P2) y dos salidas (P3 y P4), como se observa en la Figura 2.13. El modo de funcionamiento de este componente cuando se utiliza como multicanalizador óptico es el siguiente: a las entradas del componente (P1 y P2) se tienen señales ópticas con determinadas potencias. Mediante el proceso anteriormente descrito, éstas son combinadas, teniéndose en las salidas (P3 y P4) las potencias combinadas de las señales de entrada con determinado porcentaje de éstas. Este porcentaje va a depender de la característica que presente el acoplador direccional. La combinación típica de potencias es 50:50; dicha notación se utiliza para indicar que a la salida se tendrá el 50% de cada señal de entrada, esta combinación es la que presenta el acoplador direccional utilizado en este trabajo de tesis.

2.3.4. Amplificador óptico

Como se mencionó en la sección 2.2., la etapa de amplificación óptica es esencial para el diseño de las redes de comunicaciones ópticas y en especial en las redes WDM. Esto se debe a que un amplificador tiene la función de restaurar el nivel de potencia de la señal óptica generada en el bloque transmisor, atenuada a consecuencia de su propagación a través de la fibra óptica y de los diversos componentes del enlace.

El principio de operación de un amplificador óptico es similar al de un láser, pero en este caso se minimiza o elimina el efecto de la cavidad resonante, es decir, se reduce la reflectividad de los espejos colocados en los extremos de la región activa. Con esto, la amplificación óptica debida a la emisión estimulada se produce por la propagación del rayo de información en un único paso por el medio activo, como se ilustra en la Figura 2.15.

A diferencia de un láser, donde se emite un rayo con una longitud de onda definida, ya sea fija o variable, la virtud de un amplificador es su habilidad para proporcionar mayor intensidad a una señal óptica en un intervalo suficientemente grande de longitudes de onda.

Esto permite la amplificación simultánea de un canal de información compuesto por múltiples portadoras y por lo tanto es un dispositivo idóneo para su aplicación en sistemas WDM.

Algunos parámetros de interés en un amplificador óptico son: la ganancia, el ancho de banda en el régimen de ganancia, la potencia de saturación, la sensibilidad de la polarización y el ruido del amplificador. La ganancia, también llamada ganancia lineal o de pequeña señal, entendida en su forma general, se define como el cociente de la potencia de salida de una señal con respecto a la potencia de entrada, obtenida a la longitud de onda de máxima respuesta [2, 10]. Otro de los parámetros, el ancho de banda en el régimen de ganancia, se refiere al intervalo de longitudes de onda para las cuales el amplificador es funcional [39, 2, 10]. Expresado en otras palabras, el ancho de banda en el régimen de ganancia se define como el intervalo de longitudes de onda en las que se proporciona al menos la mitad de la ganancia máxima (FWHM, *Full Width at Half Maximun*). Con respecto a estos parámetros, es sumamente deseable que la ganancia del amplificador sea uniforme para un ancho de banda relativamente grande, es decir, que su respuesta en frecuencia no presente un perfil Lorentziano.

Por otro lado, a medida que la potencia del rayo de entrada se incrementa arriba de un nivel determinado, el amplificador queda imposibilitado para proporcionar la ganancia lineal estimada y presenta el comportamiento de saturación. En estas condiciones, se define a la potencia de saturación como aquella potencia de salida en la que se reduce la ganancia por un factor de 2 con respecto a la ganancia lineal [2]. Otro de los parámetros importantes, la sensibilidad de la polarización, se refiere a la dependencia de la ganancia sobre la polarización de la señal óptica de entrada al amplificador. En este caso, también es deseable que el amplificador sea insensible a la polarización, pero debido a la naturaleza intrínseca del medio activo de estos dispositivos, esta propiedad no se obtiene de manera simplificada [2, 30]. Finalmente, el ruido del amplificador se presenta en la señal de salida debido a las componentes de frecuencia no deseadas generadas por la emisión espontánea [10]. Este parámetro se acentúa al colocar amplificadores en cascada.

Con respecto a los amplificadores ópticos utilizados en aplicaciones reales de sistemas WDM, se dispone de dos variantes: los amplificadores ópticos de semiconductor (AOSs) y los amplificadores de fibra contaminada con erbio (EDFAs, *Erbium Dopped Fiber Amplifier*).

2.3.4.1. Amplificador óptico de semiconductor

Los dos tipos básicos de amplificadores ópticos de semiconductor son el amplificador Fabry-Perot, el cual es básicamente un láser modificado de semiconductor y el amplificador de onda progresiva (TWA, *Traveling Wave Amplifier*). La principal diferencia entre estos dispositivos radica en la reflectividad de los espejos colocados en su cavidad resonante.

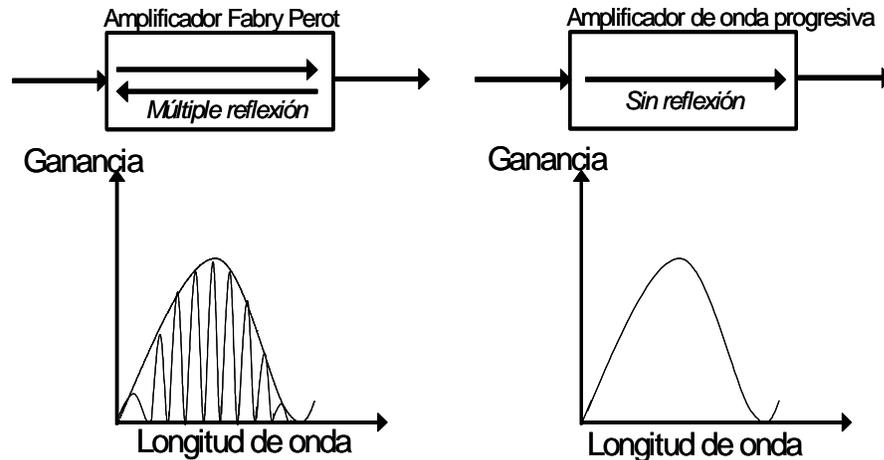


Figura 2.16. Amplificador Fabry Perot y amplificador de onda progresiva.

Los amplificadores Fabry-Perot tienen una reflectividad alrededor del 30 %, mientras que los TWA tienen una reflectividad aproximada del 0.01 % [37, 10]. De esta forma, debido a la reflectividad presente en los amplificadores Fabry-Perot se ocasiona el efecto de resonancia, resultando un intervalo de amplificación en el orden de los 5 GHz, como se muestra en la Figura 2.16. Este fenómeno es indeseable para los sistemas WDM, donde se requiere un ancho de banda continuo de amplificación. Por lo tanto, los amplificadores ópticos de onda progresiva son más apropiados para su aplicación en este tipo de sistemas al reducir la reflectividad y evitar el efecto de resonancia.

Los amplificadores de semiconductor, en general, pueden proporcionar ganancias de 25 dB con una potencia de saturación de 10 dBm, sensibilidad de polarización de 1 dB y un ancho de banda de 40 nm [10]. Una ventaja de los amplificadores de semiconductor es su habilidad natural para integrarse con otros componentes y circuitos integrados. Sin embargo, al hablar de múltiples canales de información, como es el caso de los sistemas WDM, es deseable que cada portadora de información sea amplificada por la misma cantidad. No obstante, en la práctica se presentan diversos fenómenos no lineales en los AOS's que introducen interferencias entre canales (crosstalk intercanal). Dicho fenómeno se refiere a la interferencia existente entre canales que se encuentran alejados, tal que la frecuencia entre ellos excede el ancho de banda permitido por el receptor. Como resulta evidente, ésta característica no es deseable en los sistemas de comunicaciones ópticas WDM, por lo que, para realizar operaciones de amplificación, los amplificadores de semiconductor no son demasiado utilizados en este tipo de comunicaciones ópticas.

2.3.4.2. Amplificador de fibra óptica dopada con erbio

Los EDFA's representan un tipo diferente de amplificador con respecto a los AOS's. En este caso, se observan dos diferencias esenciales. La primera radica en que la región activa del EDFA está constituida por un tramo de decenas de metros de fibra óptica contaminada con tierras raras, específicamente con Erblio. La segunda diferencia importante es que, desde la perspectiva de niveles de energía, un EDFA no es un sistema a dos niveles, sino un sistema de 4 niveles, como se muestra en la Figura 2.17 [32]. En ese sentido, se requiere de un bombeo óptico (no eléctrico, como en el caso del AOS) mediante el uso de un láser auxiliar operando en emisión continua. La longitud de onda de este láser auxiliar se selecciona apropiadamente con la finalidad de desplazar a los electrones del Erblio hacia el estado excitado (nivel 4). Debido a las propiedades intrínsecas de la fibra contaminada, los electrones excitados permanecen un tiempo muy corto en este nivel energético y de-

caen rápidamente al estado meta-estable (nivel 3), donde pueden permanecer un tiempo aproximado de 10 ms. Es en este estado en donde el medio activo tiene la capacidad de amplificar una señal óptica incidente a través de la emisión estimulada. Después de este proceso, los electrones regresan rápidamente a su estado estable al decaer del nivel 2 al 1. El tiempo de decaimiento del nivel 2 al 1 es muy corto, similar al tiempo de decaimiento del nivel 4 al 3.

Por otro lado, como se muestra en la Figura 2.18, la realización de estos dispositivos, además del láser auxiliar, requiere de aisladores ópticos, de un acoplador direccional y de un filtro óptico. Los aisladores se utilizan para evitar que puedan ser amplificadas las posibles reflexiones en dirección contraria a la propagación del rayo incidente. El acoplador direccional se utiliza para inyectar simultáneamente a la fibra tanto el rayo del láser auxiliar como la señal de información por amplificar. El filtro óptico se utiliza para suprimir o eliminar el láser auxiliar y obtener a la salida sólo la señal de información amplificada. De esta forma, las características más importantes de los EDFA's disponibles para aplicaciones en sistemas WDM se resumen en la tabla 2.8 [30].

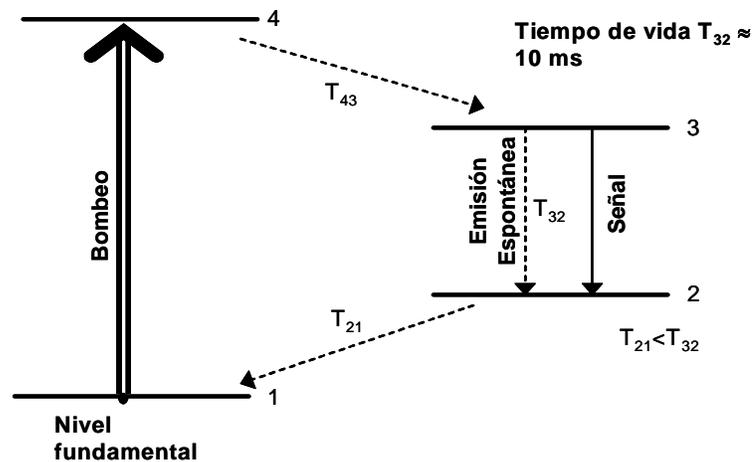


Figura 2.17. Principio de operación de un EDFA.

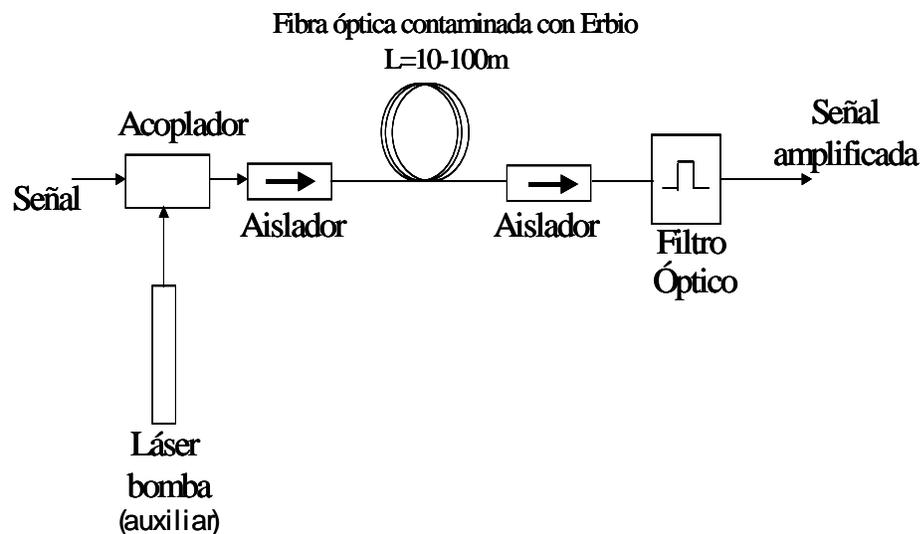


Figura 2.18. Estructura interna generalizada de un amplificador de fibra óptica contaminada con Erbio.

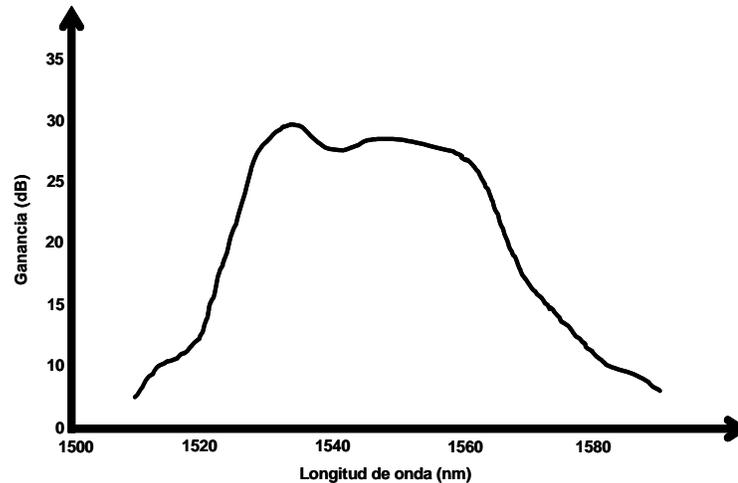


Figura 2.19. Espectro de ganancia de un EDFA.

Tabla 2.8. Características de los EDFA's.

Características	
Ganancia Típica	25-40 dB
Ancho de banda	35 nm
Potencia de saturación	10-20 dBm
Potencia de bombeo	20-100 mW
Figura de ruido	3.5-6 dB

Con respecto a los dos primeros parámetros de la tabla 2.8 [30] en la Figura 2.19 [32] es mostrada gráficamente la ganancia de los EDFA's, en donde es posible visualizar su amplio ancho espectral que presentan los EDFA's. Por consiguiente y conforme a lo expresado al principio de esta sección, se puede deducir que el ancho de banda en el régimen de ganancia resulta ser mayor que el de los AOS's. A manera de comentario, se puede mencionar que la ganancia espectral presente en los EDFA's se debe a un gran número de parámetros tales como la concentración de erbio, la longitud y el radio del núcleo de la fibra que constituye al amplificador y la potencia del láser auxiliar de bombeo[40].

En la tabla 2.9 [30], en la cual se presenta un resumen de las características de los AOS's y de los EDFA's. De esta tabla se puede deducir que los EDFA's presentan algunas ventajas sobre los AOS's, como son: mayor ancho de banda, no introducen crosstalk, presentan una mayor ganancia. Debido a esto, la comercialización de los EDFA's para su aplicación en sistemas WDM va en aumento [30].

Tabla 2.9. Comparación de los AOS's y los EDFA's.

	AOS's	EDFA's
Potencia de saturación por canal en sistemas de N canales	1/N	1/N
Crosstalk entre canales	Sí (FWM, Four Wave Mixing)	No presenta para frecuencias mayores a 10 kHz en los canales de información
Ganancia (pequeña señal)	~30 dB	~30 a 40 dB
Ancho de banda	40 nm	40 nm a 80 nm
Potencia de saturación	20 dBm	20 dBm

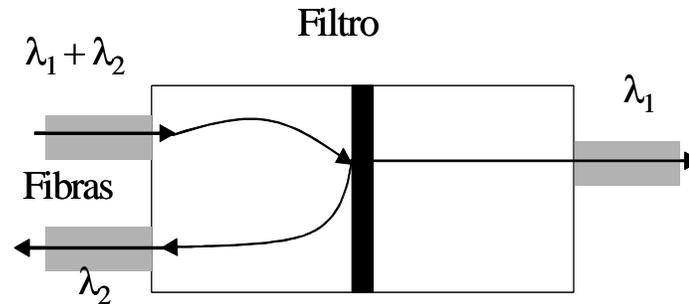


Figura 2.20. Demultiplexador óptico con un filtro incrustado en una barra de índice de gradiente gradual (GRIN).

2.3.5. Demultiplexador óptico

La principal función de un demultiplexador óptico es recibir de una fibra óptica un haz de luz consistente de múltiples longitudes de onda y separarlas; una vez separadas, cada una es acoplada a una fibra diferente.

Existen dos clasificaciones de demultiplexadores ópticos, los pasivos y los activos. Los demultiplexadores pasivos están basados en prismas, rejillas de difracción y filtros espectrales. Los demultiplexadores activos son fundamentados en una combinación de un componente pasivo y un detector sintonizable, cada detector sintoniza una frecuencia específica.

Para el caso de este trabajo de tesis son de especial interés los filtros espectrales, dichos filtros se posicionan en el camino óptico de la señal. La Figura 2.20 muestra un filtro espectral formado por una lente en la cual se encuentra incrustada una barra de índice de gradiente (GRIN). Dependiendo del material de construcción de la barra GRIN, materiales con alto y bajo índice de refracción (óxidos o fluoruros metálicos), el filtro rechaza determinadas longitudes de onda y deja pasar las que no se encuentren dentro del rango de la barra GRIN. Este tipo de demultiplexadores son ocupados en los sistemas WDM con dos canales de información, siendo el caso de este trabajo de tesis. Por cada canal nuevo que se quiera añadir o suprimir debe incorporarse un nuevo filtro.

2.3.6. Fotodetectores

Como fue expresado al principio de este capítulo, el fotodetector es un dispositivo esencial en el bloque receptor de un sistema de comunicación óptico ya que recibe una señal óptica y la convierte en señal eléctrica. En su forma más simple de operación, el fotodetector es básicamente una unión p-n, con una pequeña energía prohibida y polarizada inversamente. Sin embargo, el fundamento detrás del proceso de fotodetección es la absorción óptica. De esta manera, cuando sea aplicado un campo eléctrico a algún material provocará que un fotón incidente en la unión tenga suficiente energía para permitir la creación de un par electrón-hueco [39], con la consecuente producción de una corriente eléctrica en el circuito eléctrico del fotodetector, denominada fotocorriente. La fotocorriente (I_p) producida es directamente proporcional a la potencia óptica incidente P_{in} teniendo:

$$I_p = R P_{in} \quad (11)$$

Donde R es la responsividad de los fotodetectores (en unidades de A/W). Dicha responsividad es una característica de los fotodetectores que se incrementa con la longitud de onda debido a la existencia de una mayor cantidad de fotones para la misma potencia óptica [39, 2].

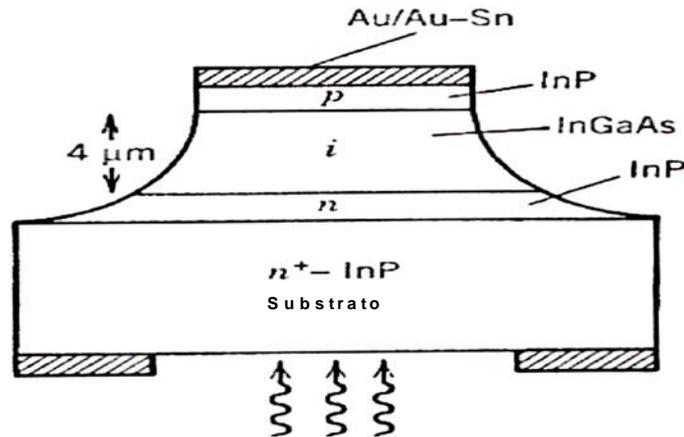


Figura 2.21. Capas de un fotodiodo PIN.

Además de la responsividad existen otras características en los fotodetectores, como el ancho de banda del fotodetector, determinado por la rapidez ante las variaciones de la potencia óptica incidente. Así, de acuerdo con sus características, existe una gran diversidad de fotodetectores, algunos de ellos con fácil acceso comercialmente hablando, por lo que resultan económicos. Dentro de estos tipos se encuentran los fotodiodos PINs y los fotodiodos Avalancha (APDs) [24].

2.3.6.1. Fotodiodo PIN

El fotodiodo PIN es el detector más utilizado en los sistemas de comunicación óptica, debido a que es relativamente fácil de fabricar, altamente fiable, tiene bajo ruido y es compatible con circuitos amplificadores de tensión.

En su construcción interna, el fotodiodo PIN es un diodo de unión p-n en el que se inserta una capa intrínseca entre las capas p⁺ y n⁻ que opera en polarización inversa [2]. La Figura 2.21 [2] muestra cada una de las capas que conforman un fotodiodo PIN. Su principal virtud es la rapidez con la que se realiza la detección de una señal óptica.

Los fotodiodos PIN comúnmente utilizados en los sistemas ópticos están constituidos con base en InGaAs para la capa media y InP para la capa que rodea al material tipo p y tipo n [2], como se muestra ilustrativamente en la Figura 2.21 [2].

Este tipo de dispositivos tienen un gran ancho de banda debido a que no tiene mecanismo de ganancia. En la actualidad, los fotodetectores PIN presentan un ancho de banda de 310 GHz en la región espectral de 1.55 μm.

2.3.6.2 Fotodiodo APD

Un fotodiodo de avalancha es un dispositivo que amplifica internamente la fotocorriente por un proceso de avalancha. En la estructura de un APD, mostrada en la Figura 2.22 [2], se introduce una capa p más entre la estructura PIN, provocando la generación de un voltaje más elevado. En efecto, el voltaje en polarización inversa de los APD es típicamente mayor de 100 V. Este voltaje causa que los electrones inicialmente generados por el fotón incidente se aceleren y se muevan a través de la región activa del APD. Cuando estos electrones chocan con otros electrones en el material semiconductor, se forma un conglomerado de electrones que constituye la fotocorriente. Este proceso es conocido como multiplicación de avalancha. La multiplicación de avalancha continua hasta que los electrones abandonan la región activa del APD.

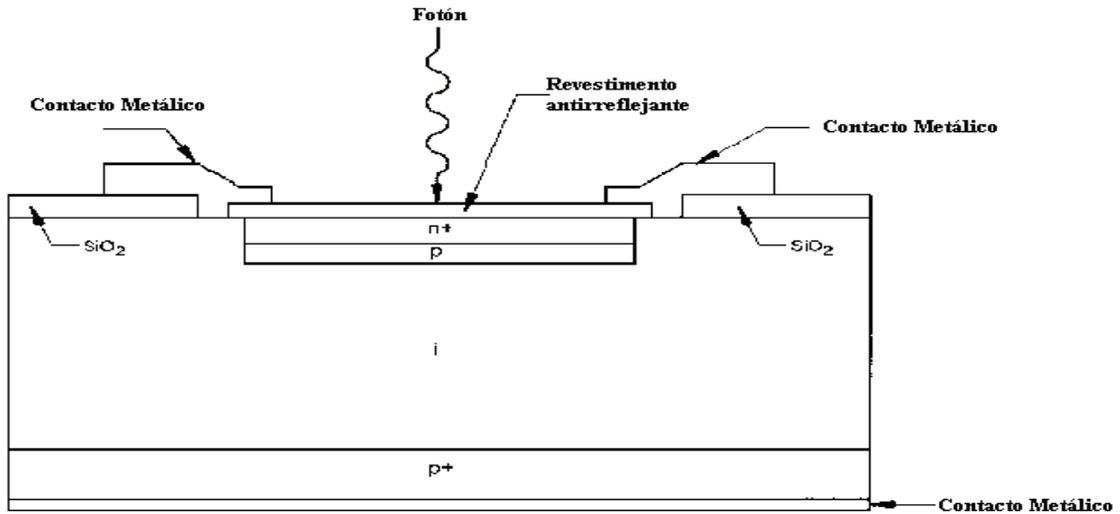


Figura 2.22. Estructura de un fotodiodo APD.

La ganancia interna de un APD puede ser modificada cambiando el voltaje de polarización inversa. Un voltaje mayor resulta en una ganancia más grande. Sin embargo, un voltaje mayor también resulta en un incremento en el nivel de ruido. El ruido excesivo limita la ganancia útil del APD.

Además de la limitante anteriormente mencionada, el tiempo de respuesta de un APD es mayor debido al tiempo ocupado para que se lleve el proceso de avalancha. Con esto se reduce el ancho de banda y por consiguiente los dispositivos APD no son muy utilizados en los sistemas de comunicación óptica WDM.

2.3.6.2. Comparación de los fotodiodos

Los fotodetectores son caracterizados por ciertos parámetros claves. Entre ellos están la respuesta espectral, la fotosensitividad, la eficiencia cuántica, la corriente de oscuridad, ruido de retorno, la potencia equivalente de ruido, la capacitancia terminal, el tiempo de respuesta (tiempo de rizo y tiempo de caída), frecuencia de ancho de banda y la frecuencia de corte, por lo que en la tabla 2.10 se presentan valores típicos correspondientes a algunos parámetros.

De la siguiente tabla se puede visualizar que el mejor desempeño en términos de ancho de banda y sensibilidad se puede obtener utilizando un diodo PIN, por tal razón son los empleados en los sistemas de comunicaciones ópticas, específicamente en los sistemas WDM.

Tabla 2.10. Comparación de los fotodiodos PIN y APD.

Tipo de fotodiodo	Longitud de onda (μm)	Eficiencia cuántica (%)	Tiempo de respuesta	Corriente de saturación (nA)
Si PIN	0.4-1.1	90	0.1-5.0 ns	1-50
Si APD	0.4-1.1	85	0.05-0.3 ns	20-100
Ge APD	0.6-1.6	85	0.1 ns	20-100
Ge PIN	1.0-1.6	60	2.5 ns	100
InGaAs APD	1.0-1.6	80	100-200 ps	50
InGaAs PIN	1.0-1.6	70	20 ps	10

3. Caracterización del sistema de comunicación óptica WDM

En este capítulo se describen los procesos, consideraciones y formas mediante los cuales se lleva a cabo la caracterización de cada uno de los bloques funcionales que integran un sistema de comunicación óptica WDM.

En el capítulo 2, se mencionaron las características importantes que evalúan el rendimiento de la fibra óptica como son la apertura numérica y la atenuación en la fibra. Esta sección, como parte de la caracterización de la fibra óptica, explica la manera en que se lleva a cabo la medición de dichos parámetros.

3.1. Caracterización de la fibra óptica

Antes de comenzar con cualquier descripción y debido a que en este trabajo de tesis son utilizados diferentes tipos de láseres, es importante mencionar que se debe tener precaución extrema en su manejo, evitando observar directamente el haz luminoso emitido, ya que puede provocar daños irreversibles en el ojo humano.

3.1.1. Medición de la apertura numérica

La fibra usada en este experimento y en todo este trabajo de tesis es fibra óptica multimodo F-MLD, con un diámetro de núcleo de 100 μm y 140 μm de diámetro del revestimiento, fabricado por la empresa Newport. En el caso de la medición de la apertura numérica se utilizó un rollo de 50 m de fibra.

La primera etapa en la medición de dicho parámetro consiste en la preparación de la fibra, es decir, realizar un corte preciso en cada uno de los extremos o puntas del segmento de fibra. Para llevar a cabo el corte, se debe retirar parte de la cubierta exterior, aproximadamente de 4 cm de longitud. En este caso pueden utilizarse sustancias que contengan cloruro de metileno, así que un removedor de barniz funciona perfectamente para este propósito.

Posteriormente, haciendo uso de un clivador (fiber cleaver F-CL1), se debe realizar una pequeña fisura en la punta de la fibra, para después jalarla firmemente y por consiguiente realizar el corte. Una observación importante está en el cuidado de no realizar un mal corte, de tal manera que no aparezcan fracturas en la sección transversal de la fibra, ya que esto repercute en pérdidas de inserción de la fibra; dicho corte transversal puede ser corroborado con un microscopio.

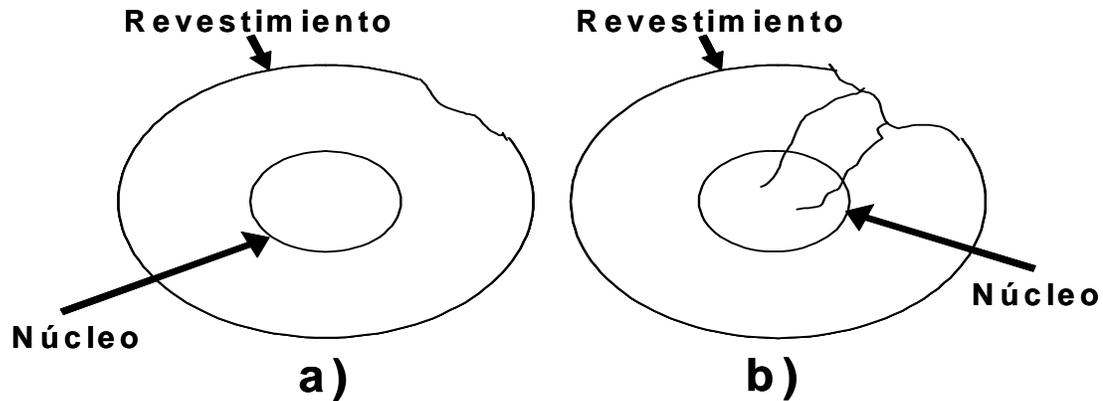


Figura 3.1. a) Corte transversal sin fracturas y b) Corte transversal con fracturas.

Así por ejemplo, en la Figura 3.1a se muestra un corte con una superficie sin fracturas, contrario a la visualizada en la Figura 3.1b, en donde se muestran fracturas en la fibra, las cuales son indeseables para cualquier sistema en el que se utilice fibra óptica.

Después de la preparación de la fibra, se está en condiciones de llevar a cabo la medición de la apertura numérica. Los componentes necesarios en este punto son un láser de gas de He-Ne (Helio-Neón), con una potencia de 1.5 mW y que genera un haz luminoso a una longitud de onda de 633 nm, un medidor de potencia óptica (OPM 815), una plataforma giratoria (*Stage Rotation RSX-2*), así como el elemento primordial que es el objeto de caracterización, la fibra óptica, con una longitud de 50 m. Se desea hacer notar que todos los componentes utilizados tanto en la medición de la apertura numérica como en el resto de las caracterizaciones, son de la firma Newport. Por consiguiente, las matriculas o números de parte asociados a los componentes son especificados por el fabricante.

Primeramente, se coloca el láser de He-Ne en la mesa de sujeción a una distancia de aproximadamente 21.5 cm de la plataforma giratoria, de tal manera que el haz del láser incida en el centro del soporte donde será colocada la fibra. Esto resulta útil ya que facilita la alineación posterior de la fibra. Es conveniente mencionar que la distancia entre el láser y la plataforma giratoria no repercute en la medición de la apertura numérica, ya que fue seleccionada arbitrariamente para la mejor manipulación de los componentes.

Después de posicionar apropiadamente el láser y la plataforma giratoria RSX-2, se procede a colocar un extremo de la fibra en un soporte para sujetarlo a la plataforma giratoria, mientras que el otro extremo se situará en otro posicionador de fibra, de tal manera que pueda ser medida la cantidad de luz recuperada a la salida de la fibra óptica, tal como se ilustra en la Figura 3.2. Es importante mencionar que el medidor de potencia óptica se encuentra a una distancia aproximada de 2 mm con respecto a la punta de salida de la fibra. Esto se hace para evitar demasiadas pérdidas de recuperación del haz de luz.

Como siguiente paso, se alinea el haz de luz láser con respecto al eje de la fibra, para lo cual es necesario que la plataforma se encuentre perpendicularmente con respecto al haz de luz y que éste incida exactamente en el centro de la fibra.

Para realizar una correcta medición y tener un estimado de la potencia que se obtendrá a la salida de la fibra, es necesaria la medición de la potencia a la entrada de la fibra, la cual dio como resultado 0.854 mW.

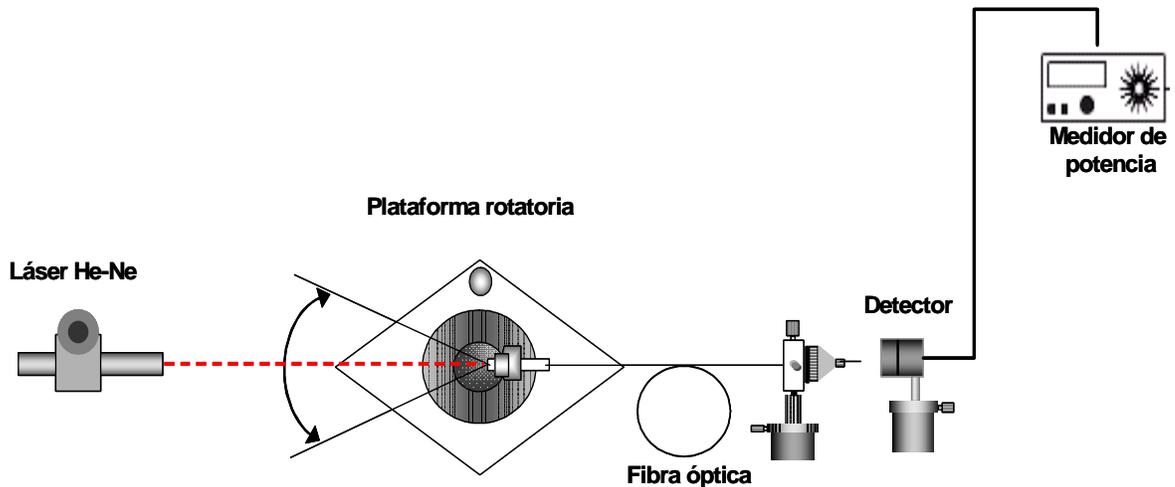


Figura 3.2. Diseño para medición de la apertura numérica.

También es necesaria la estimación de las pérdidas de inserción, que de acuerdo a [1], no deben ser mayores a 2 dB cuando la inserción de luz es fibra a fibra. Sin embargo, teniendo en cuenta que existe una separación entre la salida del láser y la punta de entrada de la fibra, así como entre la punta de la fibra y el medidor de potencia, se consideró un total de 5 dB de pérdidas de inserción tanto a la entrada como a la salida de la fibra. Adicionalmente deben considerarse las pérdidas por la atenuación en la fibra, que de acuerdo a la información proporcionada por el fabricante [5] no excede los 5 dB/km. De esta forma, las pérdidas totales que se consideraron fueron de 15 dB, por lo que en el medidor de potencia se estima obtener una medición de: $0.854 \text{ mW} / 31.62 \approx 27 \text{ } \mu\text{W}$, ó expresado en decibelios: $-0.68 \text{ dBm} - 15 \text{ dB} = -15.68 \text{ dBm}$.

Para corroborar la cantidad de luz estimada a la salida, se procedió a alinear apropiadamente la fibra con el haz del láser y se obtuvo una medición en el OPM 815 de aproximadamente $22 \text{ } \mu\text{W}$, por lo que se comprueba que la estimación de pérdidas fue correcta.

Teniendo todos los factores anteriormente descritos, se procede a la manipulación de la plataforma giratoria, la cual permite cambiar el ángulo de incidencia del haz láser y por consiguiente variar la cantidad de luz entrante en la fibra. Dicha variación repercute en la potencia óptica medida a la salida de la fibra y por lo tanto en el ángulo de incidencia de la luz sobre la sección transversal a la entrada de la fibra.

Para la correcta medición de la apertura numérica es conveniente manipular la plataforma giratoria con ángulos tanto positivos como negativos. En este caso se toma como referencia el ángulo tomando como cero el ángulo en el cual la plataforma giratoria se encuentra perpendicular al haz de luz, ángulos positivos a los que se encuentren a su derecha y ángulos negativos a su izquierda. Además, con la finalidad de tener el referente del ruido ocasionado por el ambiente, resulta adecuado tomar la potencia óptica sin la fuente de luz en operación. La cantidad obtenida será restada a las demás mediciones.

La primera medición se realiza con el haz de luz láser incidiendo perpendicularmente en el detector del medidor de potencia. Posteriormente, se comenzó a girar la plataforma giratoria en el sentido positivo, tomándose las mediciones de la potencia óptica. Los intervalos de incremento en la plataforma giratoria fueron de 1° a 2° aproximadamente. Al finalizar las mediciones se retornó la posición de la base nuevamente al centro y se tomaron las mediciones, pero ahora realizando el giro en sentido opuesto.

Los resultados obtenidos para la medición de la apertura numérica son mostrados en la tabla 3.1, donde se visualiza cada una de las potencias obtenidas a la salida de la fibra, así como la potencia de error que corresponde a la medición tomada con el láser apagado.

En la tabla 3.1 se muestran también los resultados del cálculo de los valores del seno (θ) y el porcentaje que representa cada potencia teniendo como base la mayor potencia medida.

De acuerdo con la asociación de industrias electrónicas (EIA, 1993) [5, 15], la cual toma como base el ángulo en que la potencia aceptada representa el 5 % de la potencia máxima aceptada, como la definición para determinar experimentalmente la apertura numérica, la NA encontrada es 0.224, con un ángulo de 13° . El fabricante Newport indicó una apertura numérica de 0.29, con lo cual se ve una aproximación entre los valores del fabricante y los conseguidos en este trabajo.

Tabla 3.1. Mediciones de la potencia del haz láser con fibra óptica multimodo de 50 m. de longitud.

Angulo de incidencia del haz láser ($^\circ$)	Potencia Medida (μW)	Potencia de error (μW)	Potencia Real (μW)	Sen θ	%
-9	1.37	0.660	0.710	-0.156	3.82
-8	1.58	0.660	0.920	-0.139	4.95
-7	2.32	0.660	1.66	-0.121	8.92
-6	2.57	0.660	1.91	-0.104	10.3
-5	5.40	0.660	4.74	-0.0871	25.5
-4	7.02	0.660	6.36	-0.0697	34.2
-2	13.1	0.660	12.4	-0.0348	66.9
-1	17.2	0.660	16.5	-0.0174	88.9
0	19.3	0.660	18.6	0	100
1	16.8	0.660	16.1	0.0174	86.8
3	13.2	0.660	12.5	0.0523	67.4
4	11.0	0.660	10.3	0.0697	55.5
5	7.05	0.660	6.39	0.0871	34.4
6	4.60	0.660	3.94	0.104	21.2
7	4.17	0.660	3.51	0.121	18.9
9	3.50	0.660	2.84	0.156	15.3
10	3.09	0.660	2.43	0.173	13.1
11	2.54	0.660	1.88	0.19	10.1
12	2.14	0.660	1.48	0.20	7.96
13	1.87	0.660	1.21	0.2249	6.51
15	1.54	0.660	0.880	0.2588	4.75

En la Figura 3.3 se muestra la gráfica de los resultados obtenidos, donde se muestra el porcentaje de luz aceptada en la fibra como función del ángulo de aceptación.

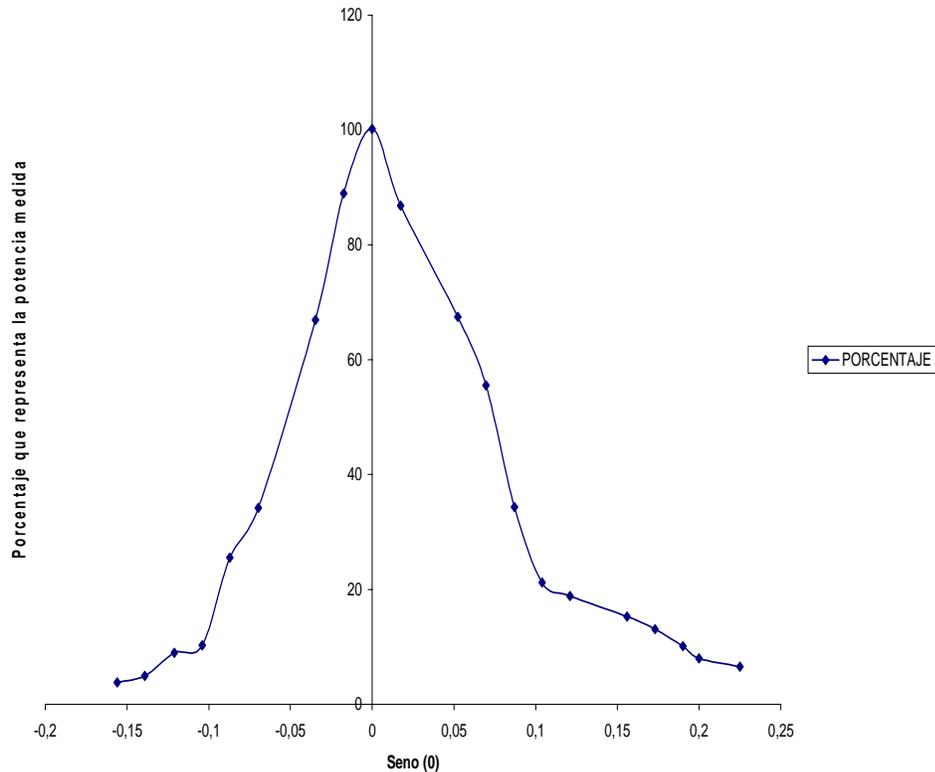


Figura 3.3. Medición de la apertura numérica con una fibra de longitud de 50 m.

3.1.2. Medición de la atenuación de la fibra

Otro de los parámetros a medir en este trabajo de tesis es la atenuación en la fibra. Las técnicas más comunes para medir la atenuación en fibra son el método cutback o método reducido, la fibra referenciada y el método de la reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR). El método de fibra referenciada y el OTDR son dos métodos de medida de atenuación no destructivos. El método cutback es un método destructivo ya que requiere el corte de la fibra empleada en el experimento. Este último método es el utilizado en este trabajo de tesis, dado que no necesita de otro equipo, más que de un clivador y de un perturbador de modos, equipo que se encuentra disponible en la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Dado un segmento de fibra de longitud total L_t el método cutback consiste en: a) introducir un rayo de luz a la entrada de la fibra y medir la potencia óptica en su salida; b) cortar un fragmento de longitud L_p de la fibra bajo prueba, sin alterar el arreglo de la introducción de luz en la fibra; y c) medir la potencia óptica a la salida del fragmento cortado. Con las mediciones obtenidas de la potencia óptica a la salida del segmento de longitud L_t y a la salida del segmento $L_t - L_p$, se obtiene la atenuación en dicha fibra.

El método de cutback funciona correctamente para fibras de altas pérdidas, con un coeficiente de atenuación Γ del orden de 10 a 100 dB/km. Sin embargo, es difícil una medición precisa en fibras de bajas pérdidas. Es decir, fibras ópticas de alta calidad presentan pérdidas del orden de 1 dB/km, de manera que al cortar un segmento de fibra de 1 km, se tendría una disminución de la potencia transmitida menor al 20 %, suponiendo que la medición se realiza con precisión [5].

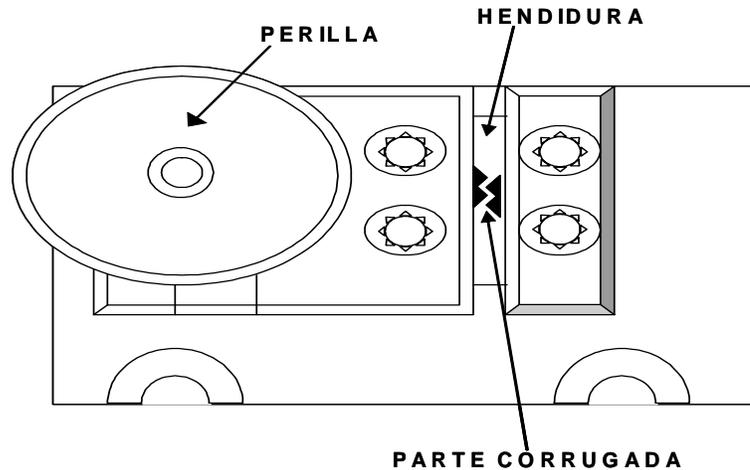


Figura 3.4. Perturbador de modos.

En este punto es conveniente resaltar que las características del rayo de luz introducido y propagado a través de la fibra influyen directamente en la medición de las pérdidas, especialmente por los modos de propagación. Para resolver este problema es necesario crear una distribución modal estable inmediatamente después de introducir la luz a la fibra. La distribución modal estable consiste en una distribución de potencias que se desarrolla dentro del núcleo de la fibra independiente de la distancia de propagación [13]. Una aproximación de la distribución modal estable se logra gracias a un perturbador de modos, el cual se muestra en la Figura 3.4.

El arreglo empleado para la medición de la atenuación en la fibra, se requiere la preparación previa de la fibra, que en este caso corresponderán a dos tramos de ésta, una de longitud de 500 m y otra de 3.42 m. La colocación del láser de He-Ne se realiza de forma similar a la realizada en la medición de la apertura numérica, excepto que la distancia elegida entre el láser y la punta de la fibra fue de 10 cm. Con la finalidad de lograr una alta colimación del rayo de luz a la entrada de la fibra, se empleó un objetivo de microscopio 20x, colocado entre el láser y la fibra. Enseguida, se coloca el perturbador inmediatamente después del posicionador de la fibra como se visualiza en la Figura 3.5. La fibra es colocada dentro de la hendidura del perturbador, la cual se sujeta girando la perilla en dirección del sentido de las manecillas del reloj hasta que la parte corrugada de la hendidura haga contacto con la fibra. Al realizar esta acción, se debe tener cuidado de no girar demasiado la perilla, ya que puede fracturarse ó romperse la fibra.

Continuando con el desarrollo, en el extremo final de la fibra se realiza la medición de la potencia óptica, cuidando de tomar la lectura correcta, ya que de ello dependerá el cálculo de la atenuación de la fibra. Al finalizar este proceso se corta un segmento del extremo de entrada de la fibra, no mayor a un metro. Con la finalidad de asegurar que las pérdidas medidas sean únicamente debidas a la atenuación de la fibra es necesario que al momento de realizar el corte de la fibra no se modifique el arreglo experimental utilizado para introducir la luz. Por último, se mide la potencia óptica obtenida por el segmento restante de fibra; es de suma importancia medir la longitud del segmento de fibra cortado, ya que después esta cantidad será utilizada para el cálculo de la atenuación.

La configuración final para la medición del experimento es la que se muestra en la Figura 3.5, en la cual se visualizan todos los componentes y la forma en que fueron colocados dentro de la mesa de sujeción.

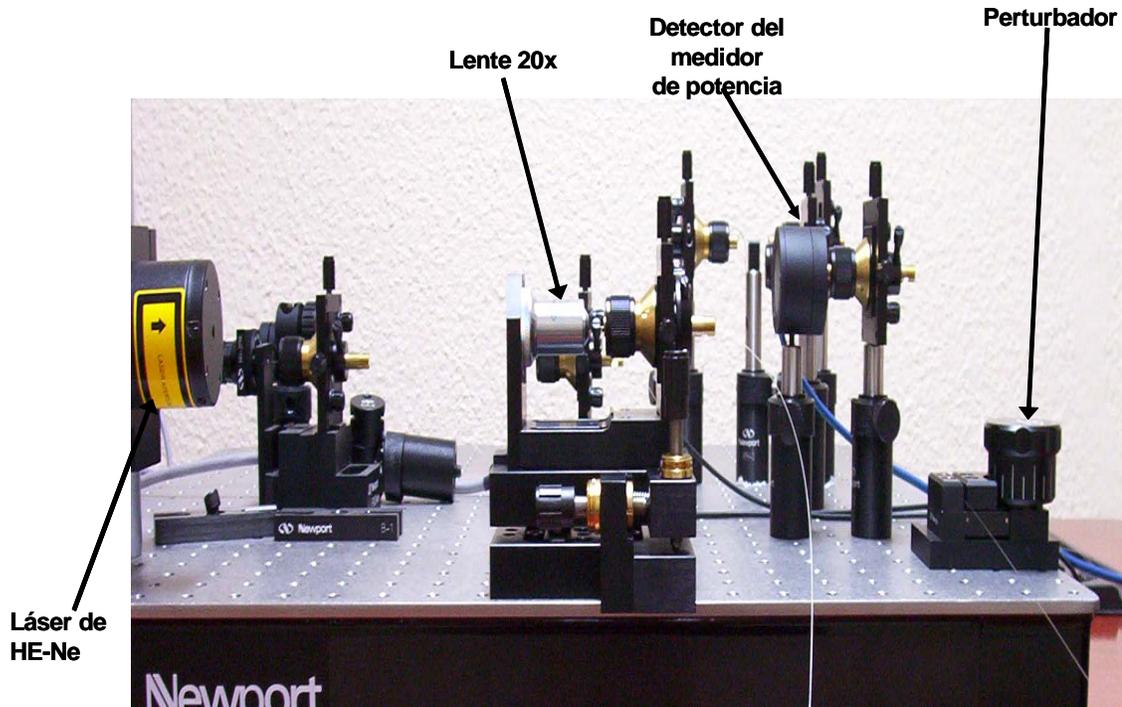


Figura 3.5. Colocación de los componentes para la medición de la atenuación en la fibra.

Como se mencionó anteriormente, se realizó la medición de la atenuación en dos tramos de fibra, uno con un rollo de fibra de 500 m y otra con una fibra de longitud de 3.42 m. Para la primera medición con el rollo de fibra de 500 m, se obtuvieron los siguientes datos:

Potencia antes del corte $P(0) = 33 \mu\text{W}$

Longitud de fibra cortada $L = (500 - 2.54) \text{ m} = 497.46 \text{ m}$

Potencia después del corte $P_r = 87 \mu\text{W}$

De esta forma, considerando la ecuación 9 del capítulo 2 se obtiene lo siguiente:

$$0.49746 \text{ km} = \frac{10}{\alpha} \log_{10} \frac{87 \mu\text{W}}{33 \mu\text{W}}$$

Por lo tanto, la atenuación obtenida en el rollo de fibra queda de la siguiente manera:

$$\alpha(\text{dB/km}) = \frac{10}{0.49746 \text{ km}} \log_{10} \frac{87 \mu\text{W}}{33 \mu\text{W}} = 8.4630 \text{ dB/km}$$

Para la medición realizada con el segmento de fibra de 3.42 m, se obtuvieron los datos que se muestran a continuación:

Potencia antes del corte $P(0) = 175 \mu\text{W}$

Longitud de fibra cortada $L = (3.42 - 1.15) \text{ m} = 2.27 \text{ m}$

Potencia después del corte $P_r = 177 \mu\text{W}$

$$\alpha(\text{dB/km}) = \frac{10}{0.00227 \text{ km}} \log_{10} \frac{177 \mu\text{W}}{175 \mu\text{W}} = 21.74 \text{ dB/km}$$

En el primer caso, el valor obtenido se asemeja al proporcionado por el fabricante [5], que corresponde a 5 dB/km. Sin embargo en el segundo caso, la atenuación en la fibra es mucho mayor a la esperada. Esto se debe a las variaciones de potencia presentadas al momento de la medición.

Es importante recordar que el método cutback funciona correctamente para fibras con altas pérdidas (10 a 100 dB/km.), no siendo este el caso. Aún así, a pesar de la imposibilidad de realizar la medición de la atenuación con algún método diferente, los resultados obtenidos con el método cutback muestran en el primer caso un buen marco de referencia con respecto a los datos proporcionados por el fabricante.

3.2. Caracterización de las fuentes de luz

Como parte del bloque funcional que conforma a un sistema WDM, se realizaron las caracterizaciones de las fuentes de luz (led y láser). En este caso, se utilizó un láser de semiconductor modelo FK-ILD de la firma Newport, con una longitud de 780 nm y una potencia óptica máxima nominal de 25 mW. Por otro lado, se utilizó un led modelo FK-LED de la misma firma, con una longitud de onda de 830 nm y una potencia óptica máxima nominal de 1.5 mW.

Las caracterizaciones de ambas fuentes de luz se hicieron bajo diversas condiciones de temperatura ambiente. Las diferentes condiciones se lograron tomando las mediciones a diversas horas del día y con el fotodetector del medidor de potencia lo más cerca posible al láser y al led, de tal manera que se presentara la menor cantidad posible provocado por la interacción con el medio ambiente.

Para la caracterización eléctrica del láser y led es necesario variar la corriente de polarización de cada componente [6, 35]. En este caso, considerando que ambos componentes disponen de un controlador de corriente, es suficiente manipular la perilla del controlador respectivo en un intervalo de corriente permitido por las fuentes de luz, que es de 0 a 120 mA. Es conveniente hacer notar que los controladores de corriente son módulos proporcionados por el fabricante para la adecuada operación del láser y del led. Por tanto, la descripción detallada de su operación se encuentra fuera del alcance de los objetivos de este trabajo de tesis. Por consiguiente, para una completa orientación del uso de estos módulos, es necesario consultar el manual de usuario correspondiente [7].

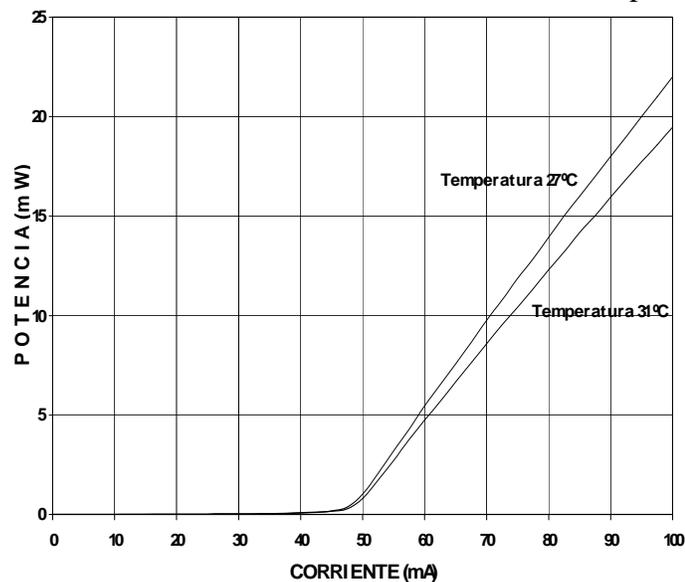


Figura 3.6. Curva potencia-corriente del Láser.

A pesar de esto, se puede mencionar en general, que para la operación de los controladores es preciso que se encuentren con el modo I activado. Una vez confirmado que dicho modo se encuentra activado, se realiza el ajuste de la corriente mediante la perilla correspondiente. Finalmente, para tener el rayo de luz a la salida del láser es indispensable que la llave de seguridad se encuentre encendida (ON), de la misma manera que el botón output.

3.2.1. Caracterización eléctrica del láser

El experimento consiste en obtener una gráfica de la potencia óptica emitida por la fuente de luz láser contra la corriente inyectada. En otras palabras, conectando el láser a su controlador de corriente y posicionándolo en el sujetador SP-2 sobre la mesa de sujeción, se coloca el medidor de potencia lo más cercano posible a la salida del láser. De esta manera, al cambiar la corriente de polarización se toma la medida correspondiente y se estructura una gráfica como la mostrada en la Figura 3.6. En esta gráfica se puede observar que se realizaron mediciones a 27 °C y a 31 °C, comprobándose la dependencia de la potencia óptica emitida en función de la temperatura. Asimismo, en la gráfica se puede visualizar una corriente de umbral de 44 mA que se obtiene en la intersección de la

proyección de la pendiente $\frac{\Delta P}{\Delta I}$. Esta corriente de umbral es característica del comportamiento de un láser de semiconductor, tal y como se mostró en la Figura 2.11.

3.2.2. Caracterización eléctrica del led

En el caso del led, se utilizó el mismo arreglo experimental y el mismo procedimiento que el seguido para el láser, que a diferencia del láser, no es demasiado dependiente de la temperatura [41] por lo que únicamente se realizaron mediciones a una temperatura de 28.9°. Al obtenerse la curva de potencia - corriente del led, se observa que el comportamiento de este dispositivo es lineal, tal como se visualiza en la Figura 3.7, y como se explicó en la sección 2.3.2.2.

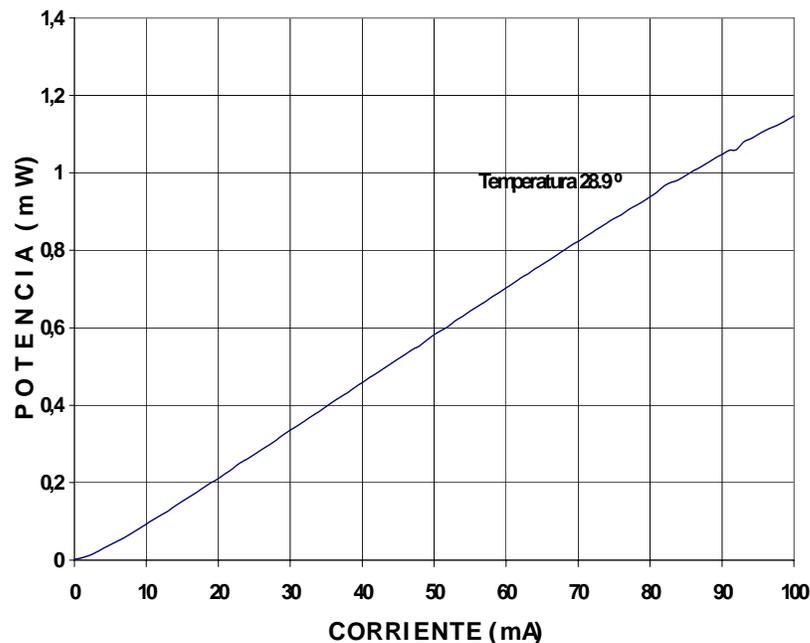


Figura 3.7. Curva potencia-corriente del led.

Una observación importante radica en la comparación de las gráficas de las Figuras 3.6 y 3.7, específicamente en lo referente a la potencia óptica máxima. En otras palabras, para la misma corriente de polarización de 100 mA, a la salida del láser se obtienen casi 23 mW, mientras que la salida del led presenta una potencia superior a 1 mW. Como se mencionó en el capítulo 2, esta diferencia de potencias entre un láser y un led determina la selección de dichos dispositivos y por consiguiente la operación de un sistema de comunicación óptica.

3.2.3. Pérdidas de inserción

En las dos secciones anteriores se explicó la caracterización eléctrica de las fuentes de luz, pero como pudo notarse, el medidor de potencia se colocó lo suficientemente cerca de las fuentes de luz para capturar toda la potencia óptica posible. Sin embargo, en una situación experimental real, donde la luz debe incidirse sobre la sección transversal de la fibra óptica, debe emplearse algún arreglo experimental que permita la mayor inserción posible de luz sobre la fibra. Para esto, debe tomarse en cuenta que la región activa de las fuentes de luz (láser y led) posee un área de sección transversal mayor que el área del núcleo de la fibra y que además, dichas fuentes de luz presentan un perfil de emisión cónico o lambertiano. Con esto, sólo una pequeña cantidad de la luz emitida es captada por la fibra.

Para superar esta desventaja, resulta conveniente el uso de lentes colocadas entre las fuentes de luz y la respectiva fibra óptica, tal como se muestra en el arreglo presentado en la fotografía de la Figura 3.8.

Para este experimento se utilizó una lente GRIN, modelo FK-GR29 de la firma Newport que presenta cambios radiales del índice de refracción, lo que permite que un rayo óptico siga una propagación sinusoidal a través de la lente. Además del cambio radial del índice de refracción, presenta como característica importante un factor de 0.29 pitch. Desde el punto de vista de óptica geométrica, el parámetro 1 pitch representa un periodo completo del rayo propagado sinusoidalmente a través de la lente. De esta manera, un factor de 0.29 pitch representa menos de la tercera parte de dicho periodo. Por lo tanto, al ser captada la luz a la entrada de la lente, experimenta una propagación sinusoidal y a la salida de la fibra experimentará una trayectoria horizontal con respecto al arreglo lente-fibra.

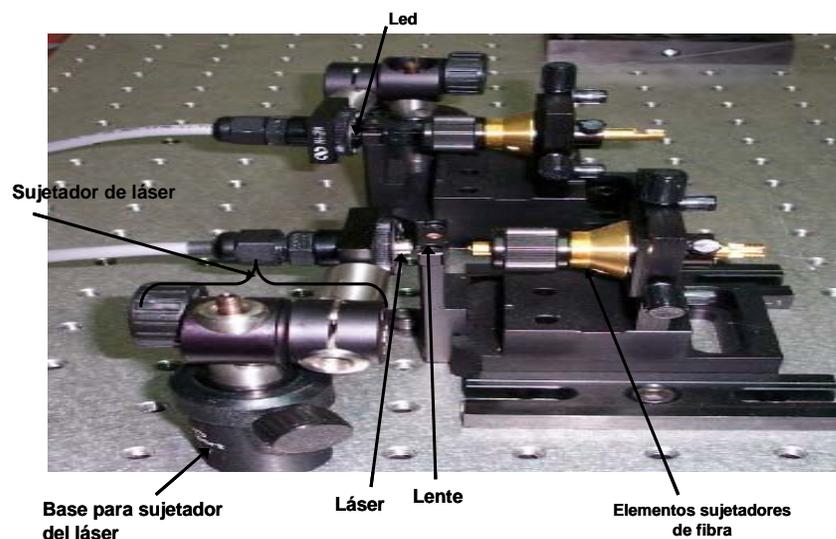


Figura 3.8. Arreglo experimental para la inserción de la luz (láser y led) en los segmentos de fibra óptica.

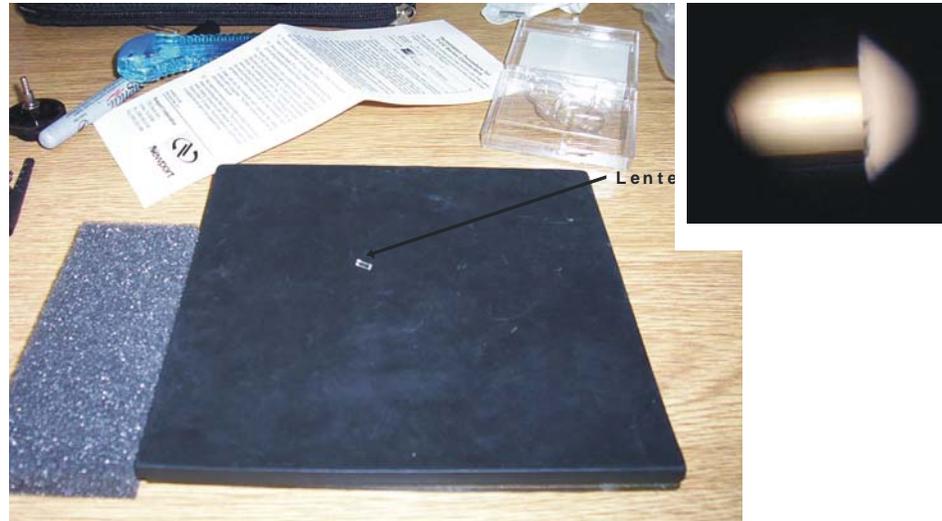


Figura 3.9. Lente utilizado tamaño normal y ampliado por un microscopio.

De esta forma, a la entrada de la fibra se tendrá un rayo con mayor intensidad de la que se tendría al no utilizar la lente. A manera de comentario, este tipo de lentes son empleadas para el acoplamiento fuente de luz-fibra, fibra-fibra y fibra-fotodetector. De la misma manera, solo como referencia visual, en la Figura 3.9 se muestra una fotografía de la lente GRIN 0.29 pitch utilizada para el acoplamiento fuente de luz-fibra, del experimento desarrollado en este trabajo.

Es importante mencionar el manejo cuidadoso que es necesario tener con las lentes; se debe evitar tocar la lente directamente con las manos, así como evitar que se raspe o que contenga polvo o algún otro material en su superficie. En el desarrollo de este trabajo, la lente fue manipulada con una delgada tela dispuesta en su recipiente de almacenamiento.

Posterior a la colocación de las lentes, se preparan dos tramos de fibra, uno para inserción del láser y otro para el led, que se usarán provisionalmente. Con esto ya se tiene el arreglo fuente de luz-lente-fibra y se está en condiciones de multicanalizarlas. Sin embargo, antes de realizar ésta operación, es necesario estimar las pérdidas de potencia óptica al insertar la luz de la fuente a la fibra. Para esto, se ajustó una corriente de 75 mA en ambos controladores, con lo que se tiene una potencia de emisión de 10.42 mW para el láser y 0.88 mW para el led. De esta forma, al medir la potencia óptica obtenida a la salida del arreglo fuente-lente-fibra, es decir, a la salida de la fibra, se obtuvo una potencia de 6.51 mW para el láser y 137.5 μ W para el led. En otras palabras, las pérdidas de inserción para el láser fueron de: $10.17 \text{ dBm} (=10.42 \text{ mW}) - 8.13 \text{ dBm} (6.51 \text{ mW}) = 2.04 \text{ dB}$. Mientras que para el led fueron de $-0.55 \text{ dBm} (=0.88 \text{ mW}) - (-8.61 \text{ dBm} (=137.6 \mu\text{W})) = 8.05 \text{ dB}$.

Con respecto a las mediciones obtenidas, las pérdidas de inserción para el láser son pequeñas si se toma en cuenta que en un principio se comentó que existen pérdidas de 2 dB cuando se tienen conexiones fibra a fibra no siendo este el caso, por lo que se esperaría una mayor pérdida de inserción del orden de los 4 dB [5]. No obstante, las pérdidas por inserción del led son muy altas, pero estos se debe al perfil lambertiano del led.

Como comentario final, no debe olvidarse que la estimación de las pérdidas reportada en esta sección se obtuvo al tener el sistema fuente-lente-fibra alineado de la mejor manera posible. Esto implica que una incorrecta alineación provocará una mayor cantidad de pérdidas.

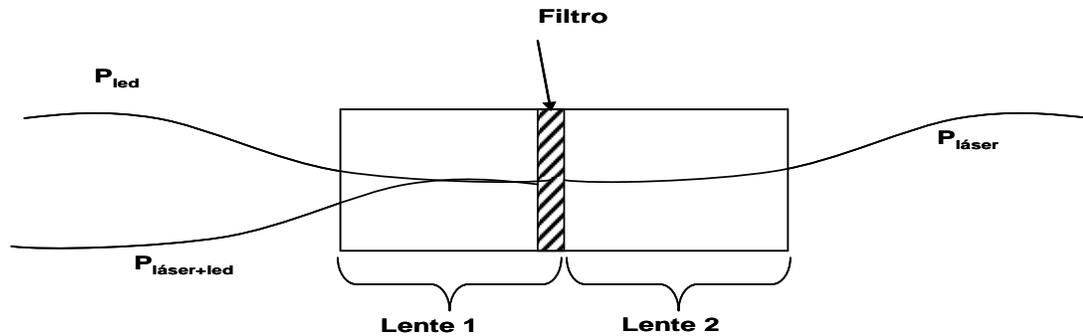


Figura 3.10. Arreglo para la demultiplexión con lentes GRIN.

3.3. Caracterización del multiplexor

Como se ha mencionado, la finalidad primordial de este trabajo de tesis es la realización de un sistema de comunicación óptica multiplexado en longitud de onda por lo que una parte muy importante de todo el sistema está conformada por el multiplexor. En este trabajo se realizó la caracterización de dos tipos de multiplexores, uno basado en lentes GRIN y otro basado en acopladores direccionales.

3.3.1. Multiplexor basado en lentes GRIN

Este multiplexor hace uso de dos lentes GRIN, similares a las utilizadas para introducir a la fibra óptica la luz emitida por el láser o el led. Sin embargo, las dos lentes no son iguales, una presenta un factor de 0.25 pitch, mientras que la otra posee un factor de 0.29 pitch y además tiene acondicionado un filtro óptico en la sección transversal de uno de sus extremos. Este filtro tiene la característica de reflejar cualquier rayo de luz que posea una longitud de onda de 830 nm y ser transparente para longitudes de onda diferentes. Esto último representa una característica importante ante la posibilidad de reflejar el rayo de luz emitido por el led, ya que al plantear algún arreglo como el mostrado ilustrativamente en la Figura 3.10, se obtendría la suma o multiplexión de ambos rayos de luz.

Sin embargo, para la implementación de este bloque, se requiere, además de la preparación de los tramos de fibra, la unión del extremo de la fibra que contiene al rayo del led con el extremo de la fibra que contendrá a la suma, como se muestra en la Figura 3.11.

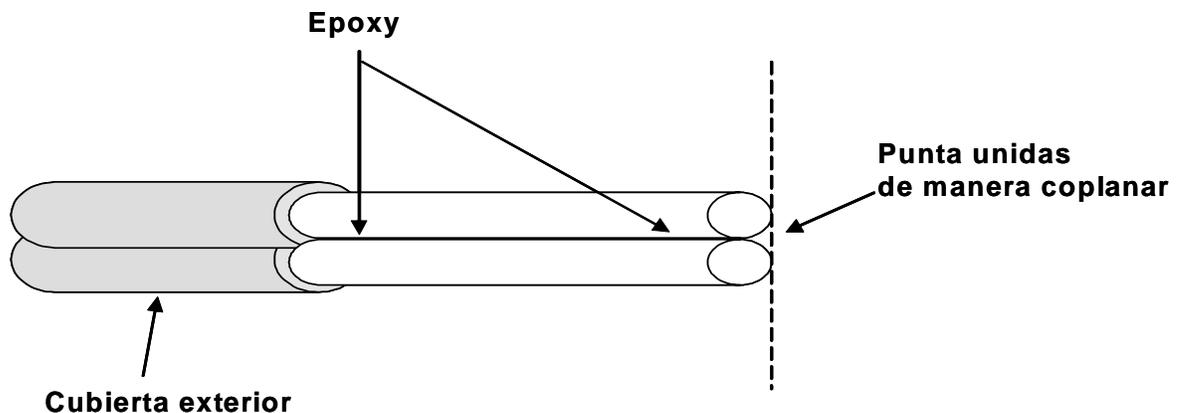


Figura 3.11. Ilustración de la unión de las fibras para el bloque del multiplexor.

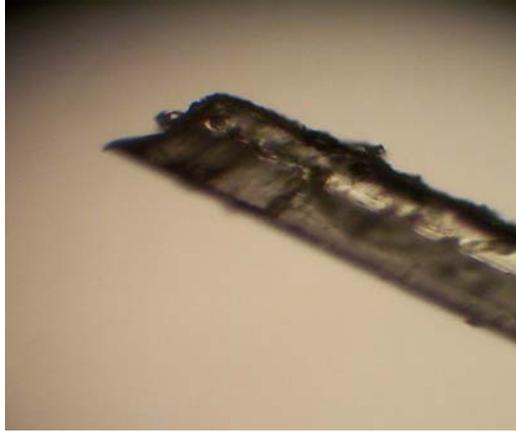


Figura 3.12. Fibras ópticas unidas vistas desde un microscopio.

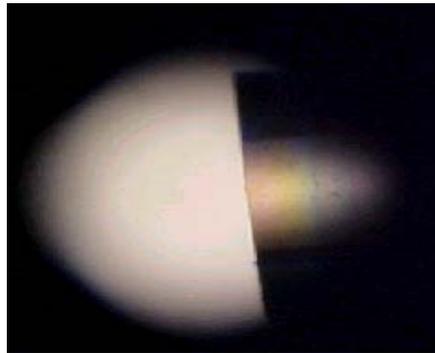


Figura 3.13. Lente con filtro.

Para mantener unidas las fibras y colocarlas suficientemente cerca de la lente, es conveniente pegarlas mutuamente con epoxy, un tipo de resina utilizado frecuentemente para este fin. Es importante hacer notar que al colocar la resina, no debe escurrirse hacia la punta de las fibras, ya que provocaría mayores pérdidas de inserción.

De manera ilustrativa, en la Figura 3.12 se muestra una fotografía ampliada de las fibras unidas, antes de ser colocadas en el arreglo experimental. De la misma forma, en la Figura 3.13 se muestra una fotografía ampliada de la lente GRIN que posee el filtro óptico. Dicho filtro se puede identificar por la presencia de diferente coloración en la sección transversal de la punta de la lente.

El arreglo experimental completo para la construcción y caracterización del multicanalizador basado en lentes GRIN se ilustra en la Figura 3.14. En esta Figura, se muestran las dos fuentes de luz y su disposición con respecto al multicanalizador. Es decir, en la cara derecha del demulticanalizador se introduce el rayo correspondiente al láser, mientras que en la cara izquierda se presente tanto la introducción del rayo correspondiente al led como la suma de los dos rayos, obviamente obtenidos en diferentes tramos de fibra óptica.

Para determinar la respuesta del multicanalizador, se le introdujo en la entrada la señal láser con una potencia de 1.53 mW y la señal del led con 57.6 μ W.

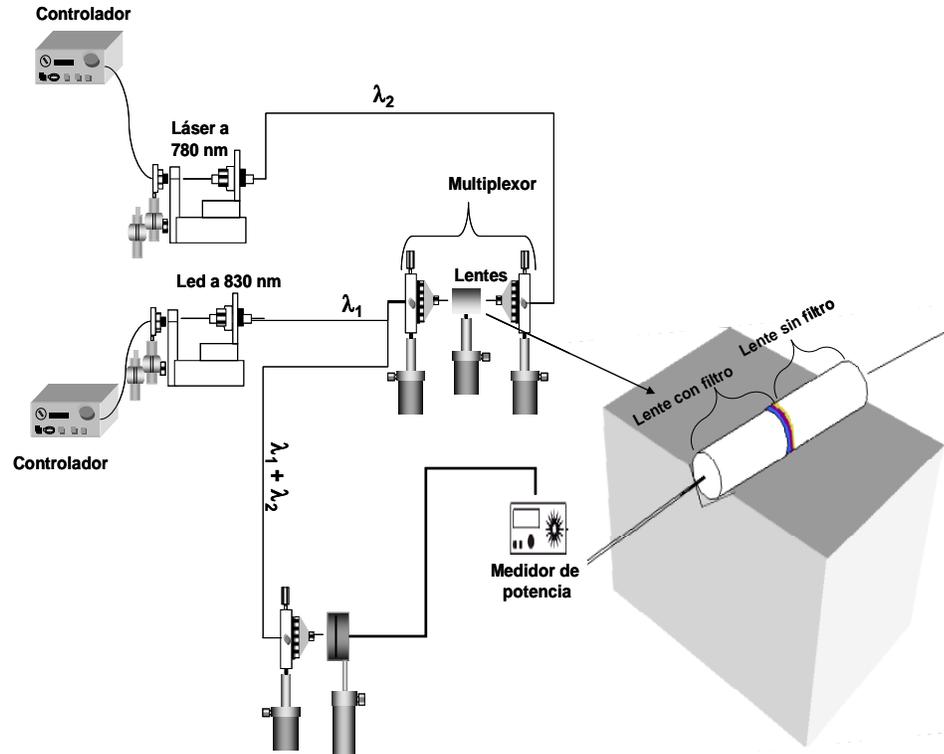


Figura 3.14. Configuración del multicanalizador basado en lentes GRIN.

Sin embargo, al realizarse la medición en la salida del multicanalizador, únicamente se logró obtener la señal del láser con una potencia de $4.76 \mu\text{W}$. La señal del led no pudo ser recuperada, ya que sólo se obtuvo la medición del ruido externo, que corresponde a $0.834 \mu\text{W}$. En este punto es importante recalcar que con la intención de obtener una potencia significativa correspondiente al led en la salida del multicanalizador, se incrementó la corriente de polarización en el controlador, pero no se logró ningún beneficio. En otras palabras, el controlador de corriente del led se mantenía en estado de saturación y por consiguiente, debido a la operación normal del controlador, se desactiva automáticamente el suministro de corriente al led.

Una de las posibles razones por lo que ocurrió este fenómeno se debe al arreglo del multicanalizador. Si se observa la Figura 3.14, la lente refleja la longitud de onda λ_1 y ésta retorna para introducirse en la fibra que contendrá ambas longitudes de onda; no obstante, parte de la potencia del led es introducida en la misma fibra de la que proviene, provocando interferencia destructiva y por consiguiente, disminución de potencia correspondiente al led.

En resumen, el multicanalizador basado en lentes GRIN no proporciona la operación esperada ya que la cantidad de pérdidas de potencias es muy grande.



Figura 3.15. Configuración de los puertos del acoplador direccional de la empresa Canstar.

3.3.2. Multicanalizador con acopladores direccionales

Para llevar a cabo la otra forma de multicanalización, se utilizó un acoplador direccional 2x2 y 50/50, modelo MO32318 de la firma Canstar [11], con un intervalo de trabajo de alrededor de 830 nm. Retomando la Figura 2.13 y con la finalidad de emplear la configuración proporcionada por el fabricante, en la Figura 3.15 se muestra esquemáticamente la distribución de puertos del acoplador direccional utilizado, como puede observarse, las dos entradas están marcadas con P1 y P4, mientras que las salidas son P2 y P3. Evidentemente, el par de entradas/salidas puede intercambiarse sin perjudicar la operación del dispositivo.

En la construcción del arreglo experimental para la caracterización de este componente las terminales P1 y P4, que en efecto son segmentos de fibra debidamente preparados, se deben colocar a la salida de las lentes dispuestas en el arreglo láser-lente y led-lente descrito en la sección 3.2.3.

Tabla 3.2. Mediciones de las salidas del acoplador direccional con diferentes alineaciones.

	Fuentes de luz	Salida P2 (Potencia medida)	Salida P3 (Potencia medida)
Alineación 1	Láser	66.7 μ W	83.6 μ W
	led	19.45 μ W	22.1 μ W
	Suma	86.16 μ W	105.7 μ W
Alineación 2	Láser	86.4 μ W	109.7 μ W
	led	38.2 μ W	46.3 μ W
	Suma	124.6 μ W	156 μ W
Alineación 3	Láser	1.12 mW	1.53 mW
	led	43.8 μ W	57.6 μ W
	Suma	1.16 mW	1.58 mW
Alineación 4	Láser	2.34 mW	2.87 mW
	led	50.7 μ W	67.1 μ W
	Suma	2.3 mW	2.93 mW
Alineación 5	Láser	NM*	3.01 mW
	led	NM*	70 μ W
	Suma		3.01 mW

*Nota: No se midió

De esta manera, teniendo el arreglo láser-lente-acoplador (P1) y led_lente_acoplador (P4), se especificó una corriente de 75 mA en ambos controladores de corriente, con lo que se tiene en la entrada P1 una potencia de 6.51 mW correspondiente al láser y en la entrada P4 una potencia de 137.6 μ W correspondiente al led.

Con esto, al medir la salida del acoplador se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.3. Como puede observarse, se están reportando diferentes mediciones en función de las alineaciones realizadas. Se desea mencionar que a pesar de parecer innecesario el reporte de todas las mediciones, lo que se pretende es resaltar la importancia que tiene la alineación de los arreglos experimentales realizados, que en este caso es el arreglo láser-lente-acoplador y led-lente-acoplador.

De esta forma, tomando como referencia las mediciones correspondientes a la alineación 5, la potencia óptica obtenida en el puerto P3 del acoplador direccional fue de 3.01 mW para el láser y de 70 μ W para el led. Esto representa el 46 % y el 50.8 % de las potencias de entrada respectivas al láser y al led. Con esto se corrobora que el acoplador direccional proporciona en su salida el 50% de la potencia óptica introducida en sus puertos de entrada. O bien, dicho en otras palabras, el costo por realizar la multicanalización con un acoplador direccional representa 3.35 dB para el láser y 2.9 dB para el led. Debe notarse que en estas cantidades se encuentran implícitas las pérdidas de inserción.

De cualquier forma, con respecto a las pérdidas totales de potencia, el multicanalizador basado en acopladores direccionales presenta un mejor desempeño que el multicanalizador basado en lentes GRIN.

Para terminar esta sección, debe notarse que en el puerto de salida P3 del acoplador direccional se encuentra la suma de las dos potencias, por lo que hasta este punto se terminan los bloques correspondientes al transmisor. Después de esto, viene la etapa del medio de transmisión, que está representado por un segmento de fibra óptica con una longitud determinada. En este caso se utilizó un tramo de fibra de 60 cm aproximadamente. La unión entre la fibra del acoplador y el segmento de fibra se realizó mediante un splice, dispositivo que permite la unión de dos fibras ópticas de manera sencilla, dicho dispositivo se muestra en la Figura 3.16. En este caso, se presentan un total de pérdidas de 1 dB de pérdidas en dicha unión.

3.4. Caracterización del demulticanalizador

El siguiente bloque a caracterizar es el demulticanalizador, cuya función es la contraparte del bloque multicanalizador. Es decir, en este bloque se realiza la separación de las potencias correspondientes al láser y al led. Para realizar esta separación, se requiere inevitablemente de algún filtro óptico, sintonizado ya sea a 830 nm ó 780 nm. Tomado en consideración todos los componentes optoelectrónicos con los que se dispone en el laboratorio de optoelectrónica de nuestra universidad, la única alternativa que se tiene es el filtro óptico basado en lentes GRIN, por lo que nuevamente se probará la configuración discutida en la sección 3.3.1, y mostrada nuevamente en la Figura 3.16, sólo que ahora operando como demulticanalizador.

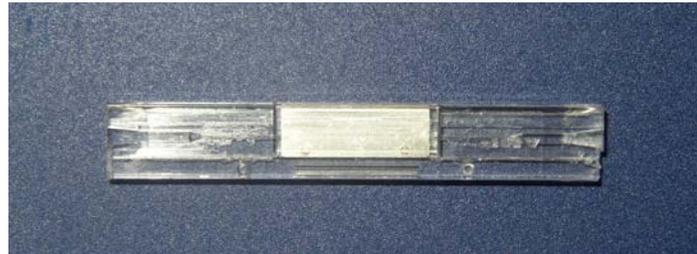


Figura 3.16. Conector Splice.

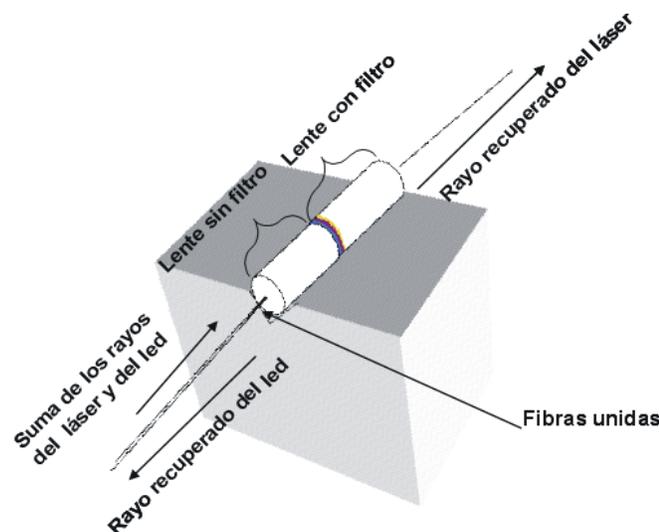


Figura 3.17. Diagrama ilustrativo del demulticanalizador basado en lentes GRIN.

En este caso punto es conveniente hacer notar que la insistencia por utilizar este bloque se debe a dos razones importantes: la primera se debe a que no se dispone de ningún otro tipo de filtro óptico, por lo tanto, se está obligado a trabajar con este arreglo; la segunda razón radica en la inferior potencia óptica que se introduce al filtro en comparación con la que se introducía al multicanalizador. Esto contribuye a una menor cantidad de luz reflejada y por lo tanto una menor cantidad de interferencia destructiva.

Continuando con el desarrollo, el demulticanalizador se caracterizó colocando en su entrada la señal correspondiente a la suma de las potencias del láser y led, es decir, colocando el P3 del acoplador direccional a la entrada del demulticanalizador. Además de esta prueba, entre el multicanalizador y el demulticanalizador se colocaron también un segmento de 5 m de fibra y un rollo de 50 m de fibra, por separado, de manera que pudiera analizarse el desempeño del arreglo en función de la longitud del medio de transmisión, es decir, de la longitud de la fibra entre el multicanalizador (transmisor) y el demulticanalizador (receptor).

Los resultados de las mediciones se muestran en la tabla 3.4. Estos datos fueron obtenidos al introducir al demulticanalizador una potencia de 3.01 mW correspondiente al láser y una potencia de 70 μ W correspondiente al led.

Tabla 3.3. Mediciones de potencia a la salida del demulticanalizador para diferentes longitudes de fibra.

	Conexión directa con el acoplador direccional		Rollo de 5 m entre el acoplador y el demulticanalizador		Rollo de 50 m entre el acoplador y el demulticanalizador	
	láser (Potencia obtenida)	led (Potencia obtenida)	láser (Potencia obtenida)	led (Potencia obtenida)	láser (Potencia obtenida)	led (Potencia obtenida)
Con ambos dispositivos encendidos	0.258 mW	25.3 μ W	0.102 mW	9.5 μ W	4.2 μ W	
Con el láser apagado	0.04 μ W	18.90 μ W		2.2 μ W		
Con el led apagado	0.258 mW	10.67 μ W	0.102 mW			

Como puede observarse en la tabla 3.4, la mayor potencia a la salida del demulticanalizador se obtiene en la configuración de conexión directa, mientras que en la configuración con un segmento de 50 m, sólo se obtuvo la salida correspondiente al láser, con apenas 4.2 μ W de potencia. Esto es una consecuencia directa proporcionada por la atenuación en la fibra óptica, que si bien es cierto no representa una cantidad de pérdidas, con los niveles de potencia especialmente pequeños con los que se trabajó en este experimento, cualquier pérdida de potencia resulta crítica.

Para finalizar esta sección, considerando la configuración de conexión directa entre el acoplador direccional y el demulticanalizador, las pérdidas de potencia experimentadas por la señal al pasar por este bloque fueron de 4.78 dBm (=3.01 mW) - [-5.88 dBm (=0.258 mW)] = 10.66 dB para el láser. Para el caso del led se obtuvieron pérdidas de -11.54 dBm (70 μ W) - [-17.23 dBm (=18.9 μ W)] = 5.68 dB. Al comparar las pérdidas experimentadas por ambas señales, se encuentra que la señal del láser presenta una mayor atenuación que la señal del led. Esta observación parece contradecir los resultados obtenidos en las secciones anteriores, donde ocurría lo contrario. Por consiguiente, se tiene la motivación de realizar una mejor alineación en el arreglo multicanalizador-demulticanalizador.

3.5. Caracterización del fotodetector

Realizada la demulticanalización y para finalizar el sistema WDM, se procede a la colocación del fotodetector, el cual, se posiciona uno lo más cerca posible para cada señal recuperada (láser y led), mostradas en la Figura 3.17.

Para realizar la caracterización del fotodetector es necesario conocer los parámetros de eficiencia cuántica y responsividad del dispositivo, para así obtener la razón potencia-corriente del fotodetector. Sin embargo, para obtener estos parámetros es necesario contar con láseres de potencia y un ancho de banda mayor a los proporcionados por el fotodetector, con los cuales no se cuenta, por lo que la caracterización de este bloque se deja pendiente para trabajos posteriores.

Las mediciones correspondientes a la etapa del fotodetector se presentarán como parte de los resultados obtenidos del sistema de comunicación óptica WDM.

3.6. Caracterización de la interferencia entre canales (crosstalk)

Una característica que es importante medir en los sistemas multicanalizados, es la interferencia existente entre un canal y otro, esta medición se denomina crosstalk. Así, el crosstalk de un canal X en un canal Y, es definido como la potencia recibida de la fuente X dividida por la potencia recibida de la fuente Y, cuando ambas son medidas en el canal Y [5].

Para calcular el crosstalk del láser en el led en el sistema construido, se tiene la potencia obtenida en el led con su fuente apagada entre la potencia obtenida en el led con la fuente láser apagada.

De la misma forma ocurre para el cálculo del crosstalk del led al láser, potencia obtenida en el láser con la fuente láser apagada entre la potencia obtenida en el láser con la fuente led apagada.

De tal manera, que tomando los datos que se muestran en la tabla 3.4, correspondientes a la conexión directa entre el acoplador direccional y el demulticanalizador, se realizan los cálculos para $CT_{\text{láser en led}}$, el cual es de -2.48 dB. Esta medición resulta en demasiada interferencia del láser en el led, teniendo en cuenta que por lo general el valor del crosstalk es de -20 db a -30 db [5]. Esto puede ser constatado en el capítulo 4, donde se presentan las gráficas de ambas señales. Además, se puede corroborar de manera auditiva cuando en la entrada de ambas fuentes de luz son introducidas señales de audio, en la recuperación del led en algunas ocasiones se alcanza a escuchar lo que se reproduce en la entrada del láser.

Para el $CT_{\text{led en láser}}$ calculado es de -38 dB, lo que indica que hay casi nula interferencia del led al láser. Como comentario final, el hecho de que exista una mayor interferencia del láser al led obedece a la mayor cantidad de potencia proporcionada por el láser, la cual, es significativa, si se tiene en cuenta que la potencia emitida por el led es muy poca.

4. Resultados

Después de la caracterización de todos los bloques funcionales, se realiza la integración de todos estos bloques, lo cual es representado por el diagrama que se visualiza en la Figura 4.1, que a su vez representa el sistema WDM.

4.1. Pérdidas totales del sistema WDM construido

La distribución física de todos los componentes utilizados para la construcción del sistema, así como todo el recorrido por el que pasan los haces de luz hasta la fotodetección que conlleva a la recuperación de la información, son mostrados en la Figura 4.2.

De la integración de todos los componentes, el primer resultado obtenido se refiere al total de pérdidas del sistema WDM, por lo que en la tabla 4.1 se muestran los datos obtenidos de cada uno de los bloques funcionales. La medición de las pérdidas se llevo a cabo con una potencia de emisión del láser de 6.51 mW (8.13 dBm) y una potencia de emisión del led de 137.5 μ W (-8.61 dBm).

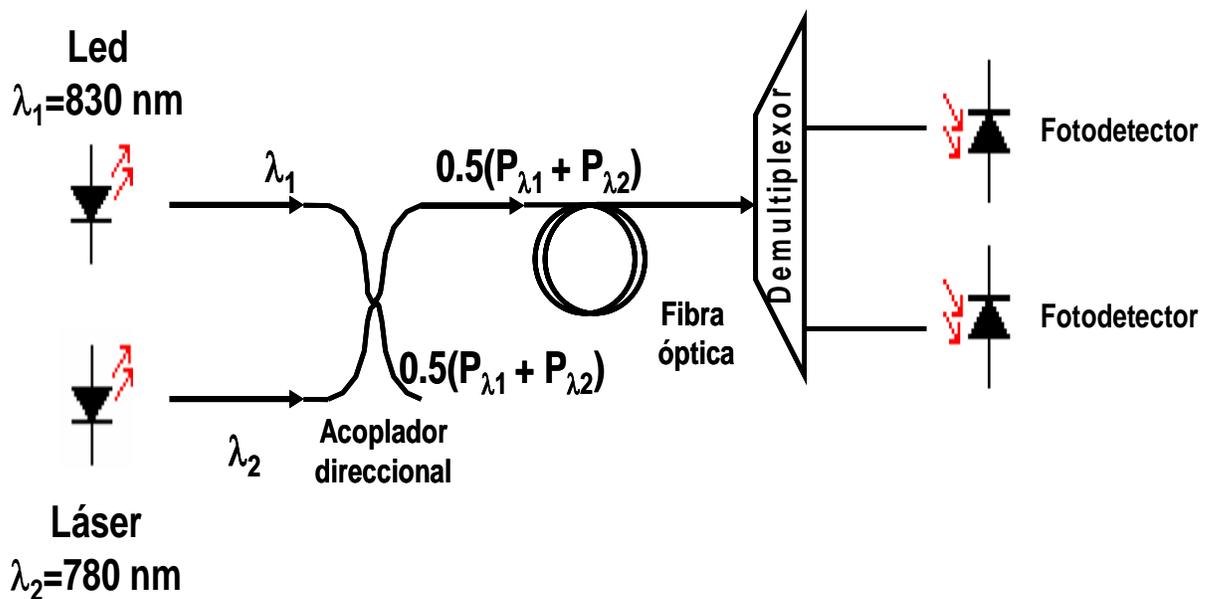


Figura 4.1. Diagrama del sistema WDM.

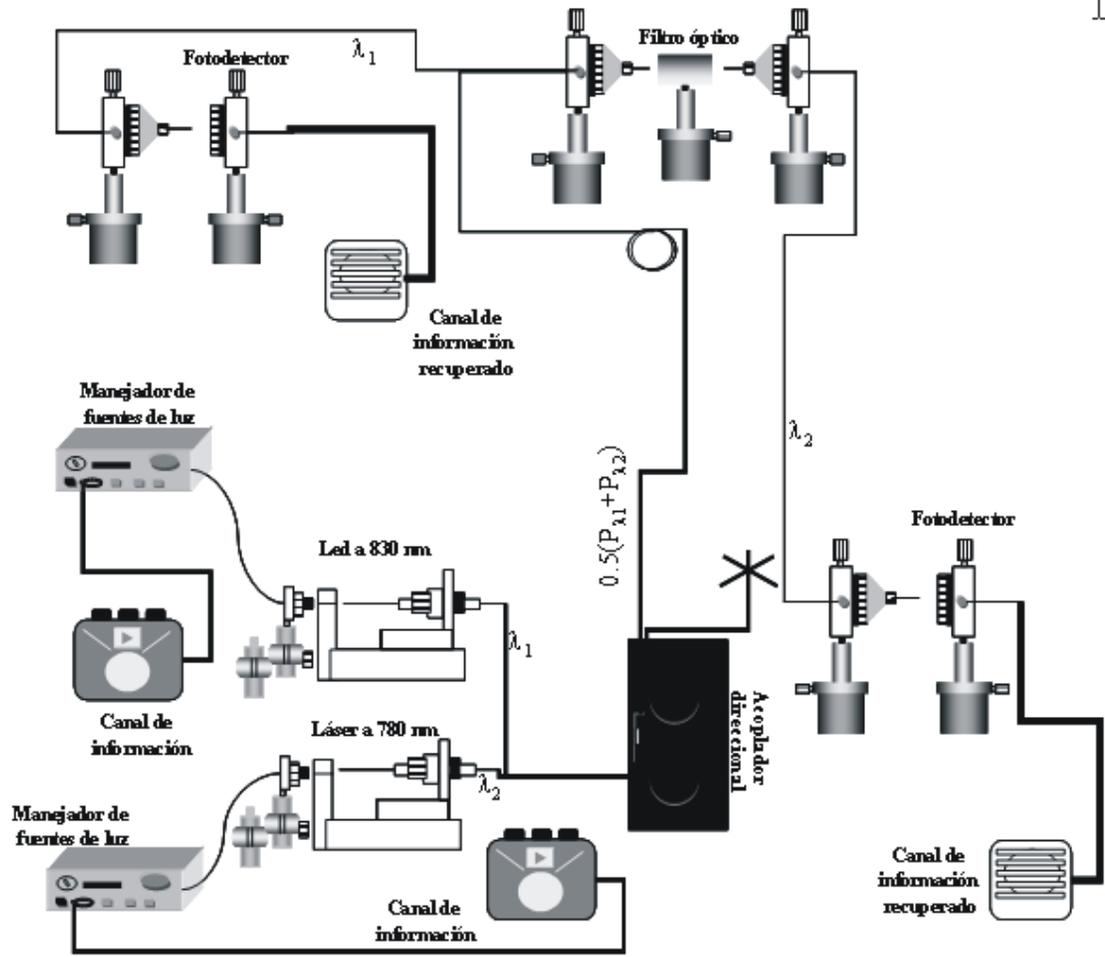


Figura 4.2. Esquema del sistema WDM.

De la tabla 4.1, se puede observar que las pérdidas para ambas fuentes son similares, existiendo una diferencia de tan solo 0.5 dB, que sin embargo debido a la baja potencia de emisión del led, resultan significativas las pérdidas ocasionadas en esta fuente de luz. También, es posible visualizar, que la mayor cantidad de pérdidas es ocasionada en la etapa del demultiplexador. Esto se debe a que existen mayores pérdidas por inserción de luz en la fibra óptica que en cualquier otro bloque del sistema ocasionado por el tipo del filtro óptico utilizado. Sin embargo, en comparación con sistemas WDM similares, con pérdidas en la fuente láser del orden de 10 dB y en el led de aproximadamente 25 dB [5], se puede decir que las pérdidas del sistema WDM construido se encuentra dentro de los estándares para este tipo de sistemas, tomando en consideración que quizá no se tengan las mismas condiciones de medición de los parámetros.

Tabla 4.1. Pérdidas totales del sistema WDM construido.

Pérdidas	Láser	Led
Fuente-Inserción en la fibra	2.04 dB	8.05 dB
Multiplexación	3.34 dB	2.85 dB
Demultiplexador	10.66 dB	5.68 dB
Pérdidas totales	16.04 dB	16.58 dB

4.2. Pruebas del sistema WDM construido

En la realización de pruebas del sistema completo se utilizaron señales producidas por generadores de funciones y audio generado por reproductores de cintas.

En las señales de los generadores de funciones se tuvieron señales sinusoidales y cuadradas con frecuencia constante, también, se efectuó un barrido en frecuencia, para obtener la función de transferencia del sistema.

Para llevar a cabo las mediciones mencionadas, es preciso que ambos controladores de las fuentes de luz se encuentren en modo P, éste modo permite la introducción de una señal externa a los controladores de las fuentes. También, es importante mencionar que todas las mediciones realizadas con los generadores se obtuvieron a la salida del fotodetector. No obstante, las señales de audio fueron obtenidas a la salida de las bocinas.

Las señales que son introducidas en el controlador de las fuentes de luz, deben de tener en el caso de las señales sinusoidales una máxima amplitud de 250 mVp, ya que esta amplitud proporciona una corriente promedio menor de 120 mA, lo cual se encuentra dentro del límite permitido para las fuentes de luz y con esto se evita la saturación de los controladores. En el caso de las señales cuadradas la máxima amplitud es de 150 mVp, sin embargo, debido a que en algunas ocasiones ocurren picos en la señal y provoca que se sature el controlador, es recomendable que la señal tenga una amplitud de 100 mVp.

En primera instancia, se realizaron mediciones en ambas fuentes de luz con señales sinusoidales. De esta forma, en la Figura 4.3, se muestra la gráfica correspondiente a la señal introducida al dispositivo láser, una señal sinusoidal a 500 Hz con amplitud de 200 mVp, así como la señal generada a la salida: La amplitud de la señal de entrada es de 200 mVp, obteniéndose a la salida 61 mVp, puede además observarse que la señal de salida muestra la misma frecuencia fundamental de 500 Hz, pero que tiene agregados armónicos de diferentes frecuencias que provocan distorsión. De ésta medición, se puede observar que la atenuación de la señal de salida representa menos del 50 % de la amplitud original. Sin embargo, en este caso y en condiciones similares siguientes, únicamente se realizara la estimación de la relación entrada-salida de las señales con respecto a la amplitud, ya que no es posible estimar con exactitud las pérdidas del sistema en razón de la proporción corriente-potencia, debido a que no se tiene la relación voltaje-corriente proporcionada por los controladores de las fuentes de luz.

También, en la misma Figura se puede notar que la señal de salida presenta armónicos de diferentes frecuencias lo cual agrega distorsión en la señal de salida.

La magnitud de las componentes de distorsión se muestran en la Figura 4.4, sin embargo, predomina la amplitud de la señal a 500 Hz, existiendo una diferencia de 10.9 dB entre la componente que le sigue en amplitud. Esto implica que tomando en cuenta el ancho de banda práctico de una señal de información no periódica [28], éste proceso puede considerarse como una recuperación exitosa de la señal original enviada desde el transmisor. Es conveniente aclarar que la presencia de estos armónicos se debe básicamente a la interferencia provocada entre las portadoras del láser y del led y a las no linealidades en la fibra [16, 18].

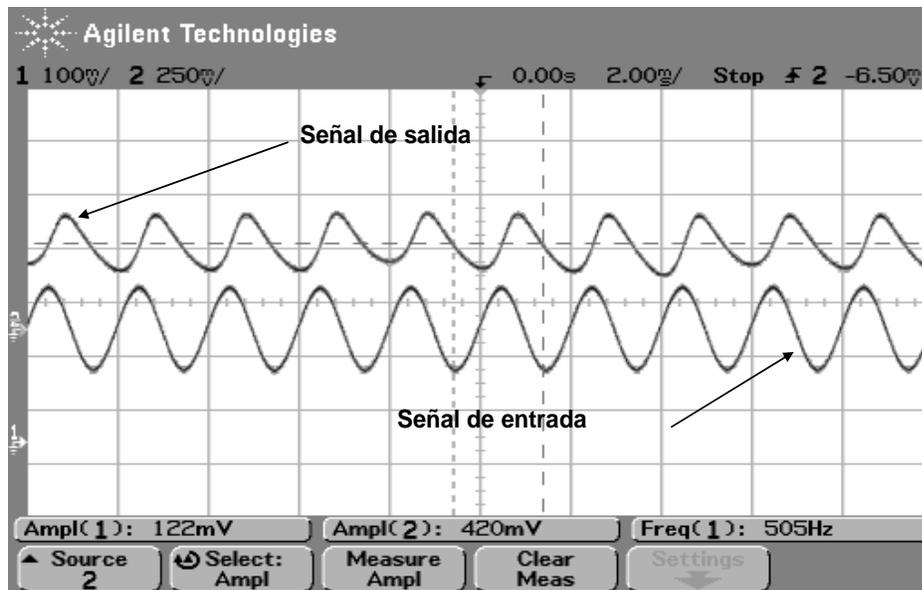


Figura 4.3. Señal de entrada sinusoidal con el dispositivo láser con una frecuencia de 500 Hz y la señal obtenida a la salida del sistema.

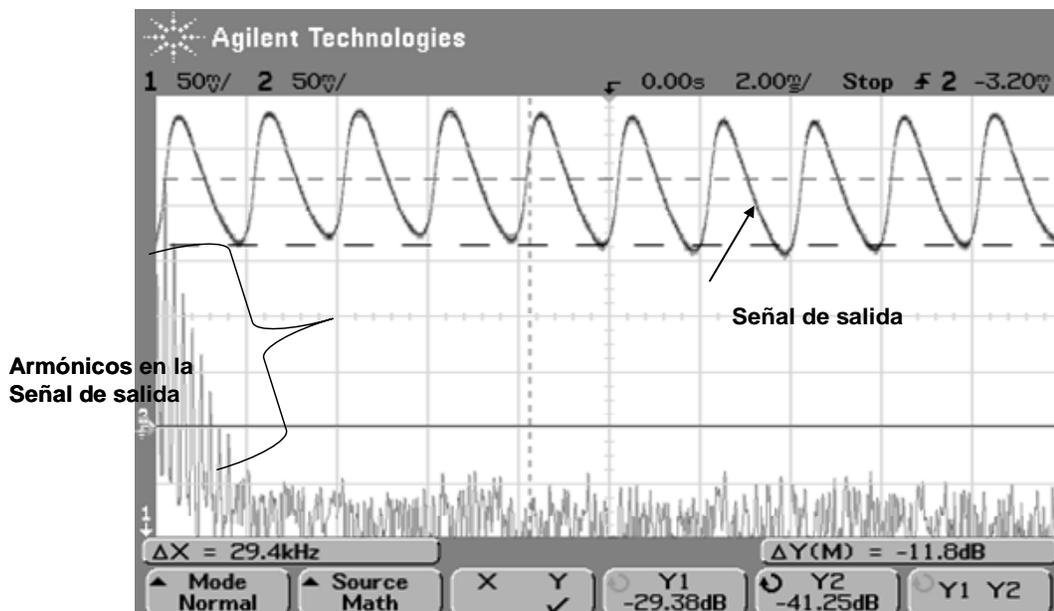


Figura 4.4. Señal de salida obtenida con el dispositivo láser y los armónicos presentados, con una entrada de 500 Hz.

Al aumentarse la frecuencia a 1 kHz, la señal obtenida es la que se expone en la Figura 4.5, el comportamiento a esta frecuencia es mejor que la observada en la Figura 4.3, dado que no presenta demasiada distorsión con respecto a la entrada, no obstante, la atenuación de la señal sigue estando presente. Sin embargo, teniendo una frecuencia mayor (40 kHz), la atenuación es demasiada, llegando a ser tan solo el 3% de la amplitud de la señal de entrada, además, de que se presenta demasiado ruido, tal como se visualiza en la Figura 4.6.

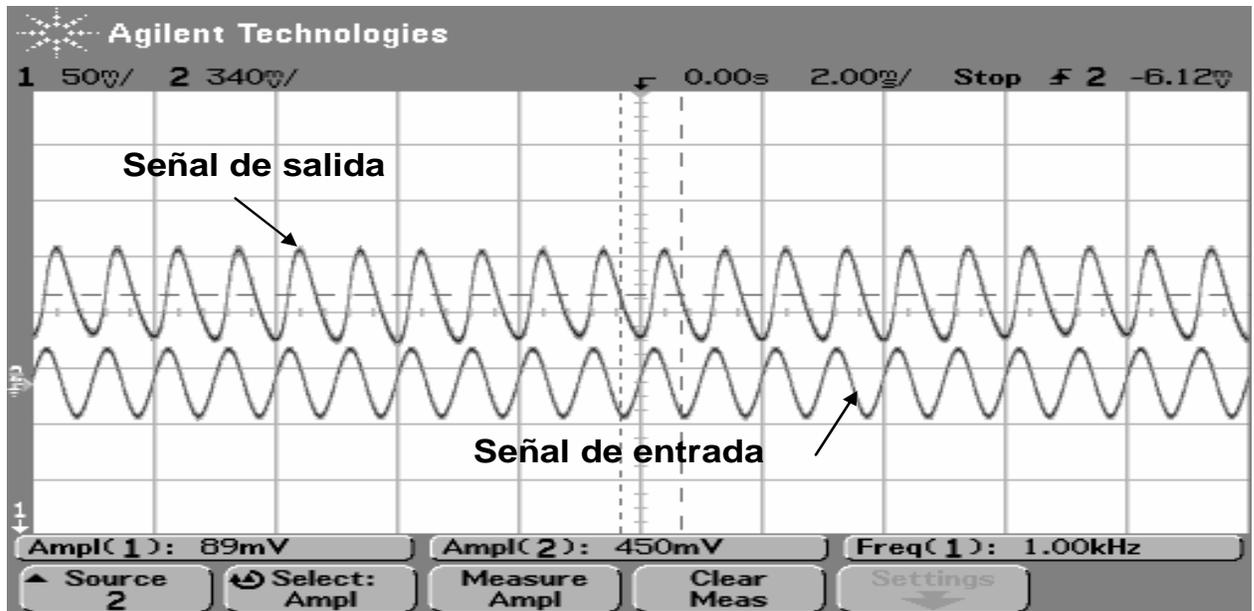


Figura 4.5. Señal de entrada sinusoidal con el dispositivo láser con una frecuencia de 1 kHz y la señal obtenida a la salida del sistema.

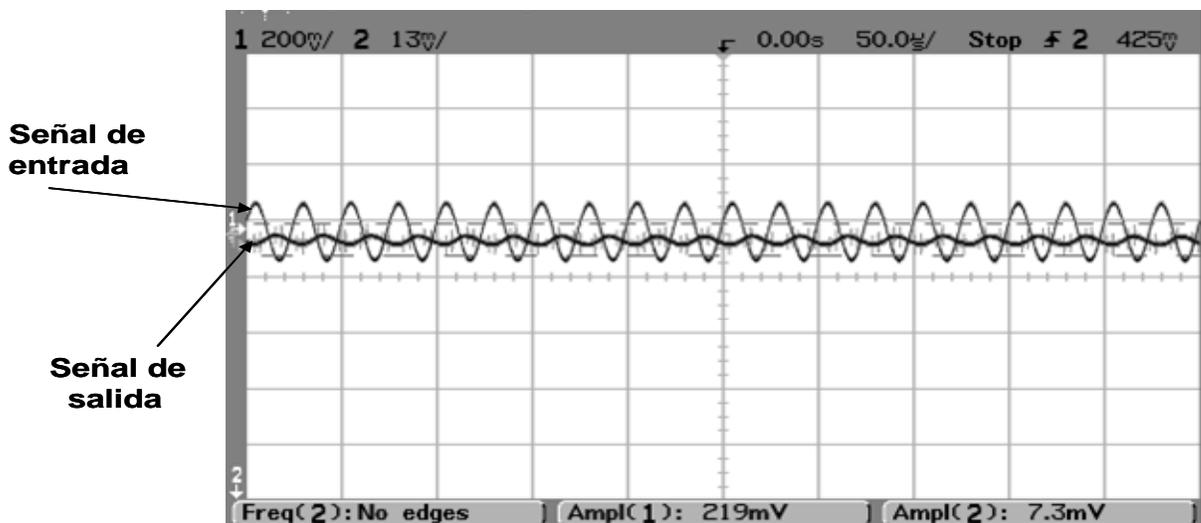


Figura 4.6. Señal de entrada sinusoidal con el dispositivo láser con una frecuencia de 40 kHz y la señal obtenida a la salida del sistema.

En la señal de salida correspondiente al led, Figura 4.7, se tiene mucha distorsión y la atenuación es mayor que la presentada por el láser a la misma frecuencia, esto como consecuencia de la diferencia entre las potencias de emisión de cada fuente de Luz. Cabe hacer la aclaración que la señal presentada corresponde al led, cuando la fuente láser se encuentra apagada.

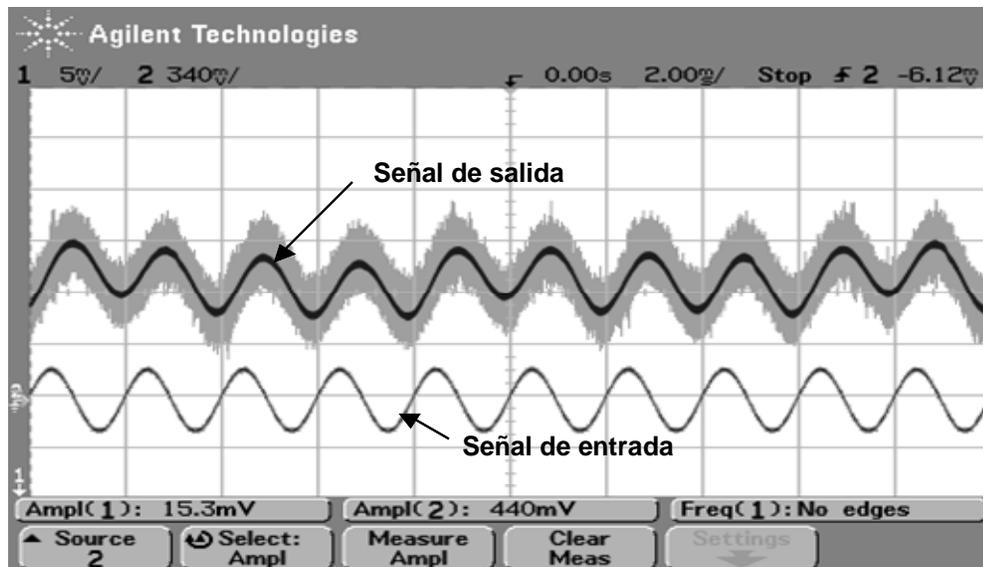


Figura 4.7. Señal de entrada sinusoidal con el dispositivo led con una frecuencia de 500 Hz y la señal obtenida a la salida del sistema.

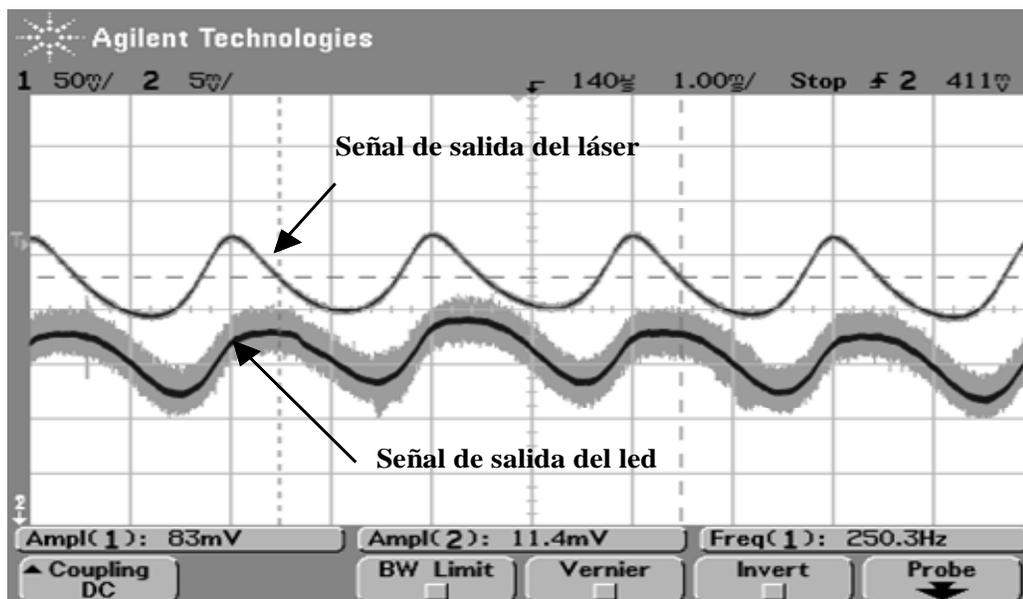


Figura 4.8. Señal de salida sinusoidal con ambos dispositivos a una frecuencia de 500 Hz.

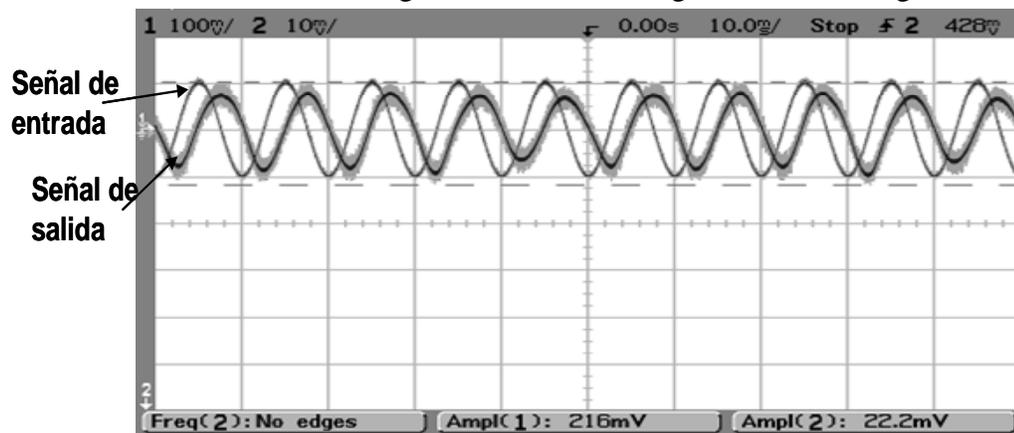
De tal manera, que en la Figura 4.8 se muestran las señales de salida de ambas fuentes de luz, cuando en una y otra señal de entrada se tienen señales sinusoidales a 500 Hz. En esta Figura se puede observar que la señal de salida del led presenta una mayor distorsión que la señal presentada en la Figura 4.7. De lo cual se puede inferir que parte de la señal del láser es introducida a la señal de led y por tanto, ésta muestra aún mucha distorsión. Esto, como ya se comentó da lugar al cross-talk, el cual fue calculado en el capítulo 3, en el apartado dedicado a la caracterización de la interferencia entre canales.

En el led, con entradas sinusoidales a diferentes frecuencias, se obtuvieron resultados a frecuencias menores que las presentadas en el dispositivo láser, en la Figura 4.9a se muestra la señal de entrada a 100 Hz y su correspondiente señal de salida, en ella se puede apreciar la atenuación pre-

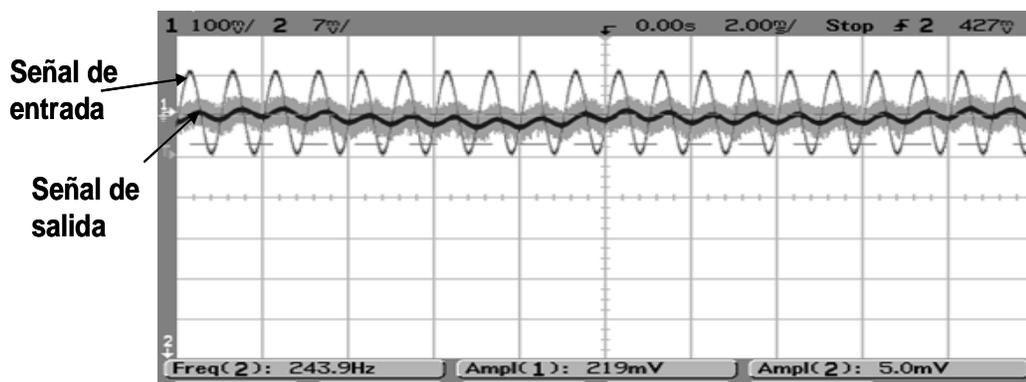
sente en el led en la que la señal de salida representa únicamente el 10 % de la señal original, esto es debido a la poca potencia de emisión del led. En la Figura 4.9b con una señal de entrada sinusoidal de 1 kHz y una amplitud de 200 mVpp, se observa en la salida una amplitud de 100 mVp lo que representa un 2 % de la señal original.

La razón por la cual se expusieron las mediciones a diferentes frecuencias, es con la finalidad de ilustrar el rango de operación de cada dispositivo y estimar el ancho de banda del sistema construido. De esta forma, la mejor respuesta obtenida en función de la frecuencia en el caso del láser el mejor comportamiento de la señal de salida con respecto a la entrada ocurrió a 1 kHz, mientras que para el led ocurrió a 100 Hz, con lo cual se nota la diferencia del ancho de banda entre uno y otro dispositivo. En este punto debe mencionarse que el ancho de banda total del sistema no depende exclusivamente del bloque transmisor (fuentes de luz) o del bloque receptor (fotodetectores), sino que es una combinación de ambos componentes.

También, en todas las señales de salida de ambas fuentes, se puede visualizar que existe un retardo de la señal de salida con respecto a la entrada, esto como consecuencia del recorrido de los haces luminosos de las fuentes, sin embargo, el retardo no es significativo en ninguno de los casos.



a)



b)

Figura 4.9. a) Señal de entrada sinusoidal con el dispositivo led con una frecuencia de 100 Hz y la señal obtenida a la salida del sistema, b) Señal de entrada sinusoidal con el dispositivo led con una frecuencia de 1 kHz y la señal obtenida a la salida del sistema.

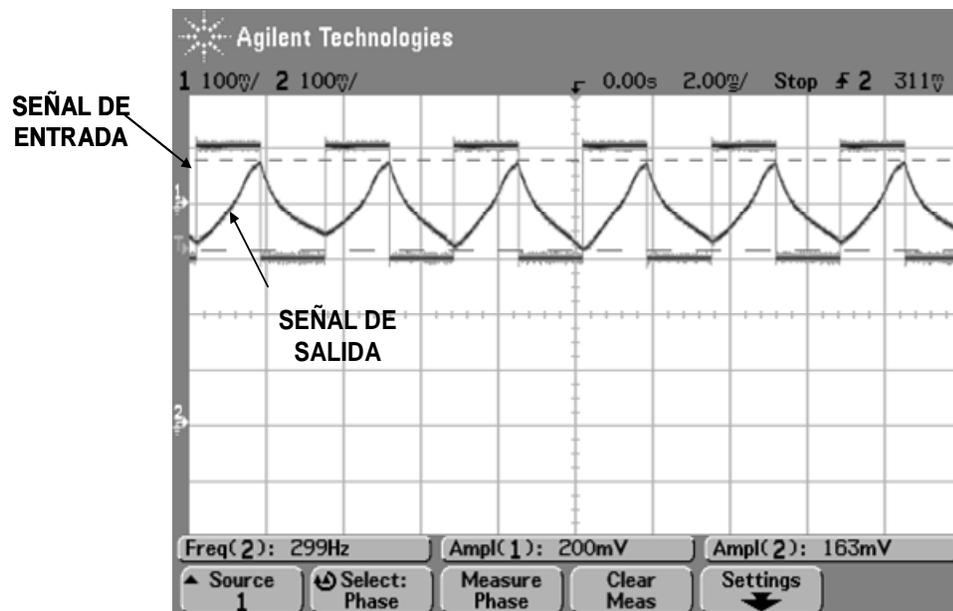


Figura 4.10. Señal de entrada cuadrada a 300 Hz y la salida generada para el láser.

El comportamiento con señales cuadradas del sistema WDM, resulta mucho más deficiente en comparación con la señal sinusoidal aún a bajas frecuencias, tal como se puede observar en la Figura 4.10, en la que la señal de entrada es una señal a 300 Hz. Este comportamiento también fue observado en el led en el que se presenta una mayor distorsión que en el láser aun a más bajas frecuencias en el orden de las decenas. Esto contrasta con el comportamiento del sistema con señales sinusoidales que aún a grandes frecuencias (40 kHz), conserva la forma de la señal de entrada tal y como fue mostrada en la Figura 4.4. Esto se debe a que en las señales cuadradas, es vital tomar en cuenta la velocidad de respuesta de conversión de la señal eléctrica en la señal óptica de las fuentes de luz, que es mucho menor que las presentadas para las señales continuas [6], lo que provoca que la señal de salida presente mayor distorsión que en las señales sinusoidales. Esto se analizara con mayor detalle en trabajos futuros.

Cuando son utilizadas las señales de audio para realizar pruebas es necesario controlar el volumen de cada uno de los reproductores de cinta, de modo que no se saturen los controladores de las fuentes de luz. Es recomendable que el volumen del reproductor de cintas que genera la señal para el láser se encuentre en un volumen bajo y por el contrario, para el reproductor de cintas que genera la señal del led debe encontrarse en un volumen alto. El preset de los controladores de las fuentes de luz, tendrán un valor de 0.002 y 0.013 mA para el Láser y Led, respectivamente.

Al realizarse las mediciones de las señales de audio, se obtuvo la señal que se muestra en la Figura 4.11, que corresponde a la señal de entrada y la señal de salida del láser, si se observa se puede notar que la señal de salida (canal 1) presenta una mayor amplitud que la señal de entrada (canal 2), esto debido que la señal de salida fue tomada en la bocina, la cual cuenta con un circuito de amplificación.

Sin embargo, esto no ocurrió con el led, lo cual se puede visualizar en la Figura 4.12 en la que la señal de entrada corresponde al canal 1 y la señal de salida al 2, a pesar que la señal de entrada se encuentra a mayor volumen que en el láser, esto da idea de la poca amplitud presente en el led.

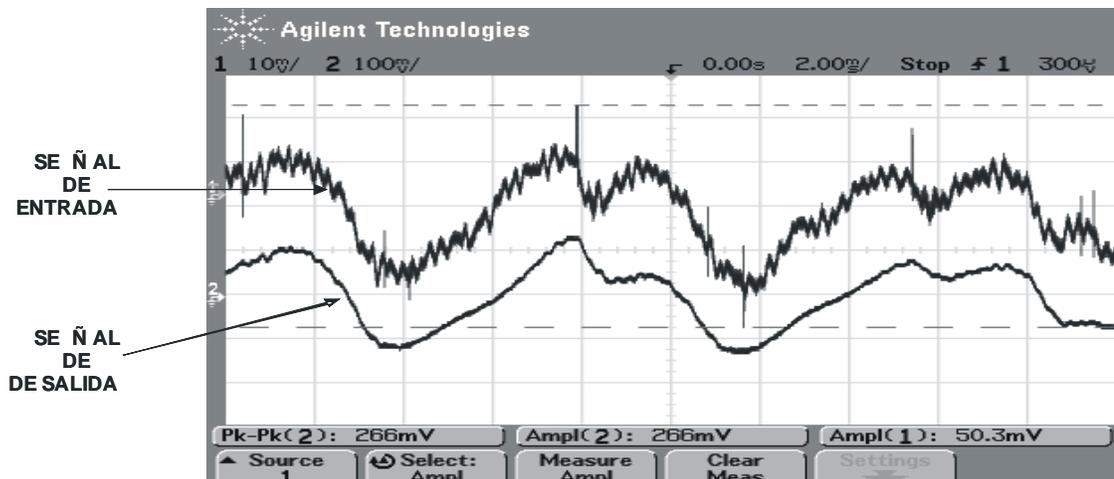


Figura 4.11. Señal de audio en el láser.

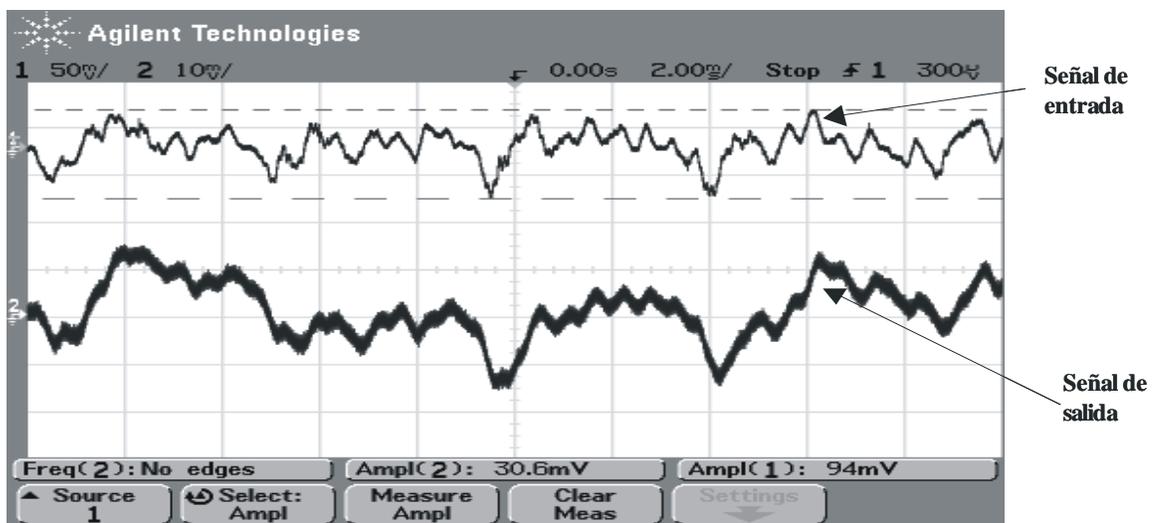


Figura 4.12. Señal de audio en el led.

Sin embargo en ambas señales, la señal de salida presenta las mismas características que la original a excepción de una determinada cantidad de ruido agregada. Evidentemente la señal recuperada presenta una distorsión mínima debido al pequeño ancho de banda de la señal de voz, de lo contrario, se hubiera presentado una mayor distorsión.

5. Conclusiones y líneas futuras de investigación

En lo referente al estudio descriptivo de los bloques funcionales que conforman un sistema de comunicación óptica, se logró estudiar y comprender, tanto de manera general como con cierto nivel de detalle, el principio de operación de los componentes básicos que conforman la etapa transmisora, receptora y el medio de comunicación de este tipo de sistemas.

En la etapa de transmisión se estudiaron dos fuentes de luz, los láseres de semiconductor y los diodos emisores de luz. En este caso, se obtuvieron tablas comparativas que revelan su comportamiento y principales aplicaciones. En esta misma etapa se analizó la multiplexación basada en acopladores direccionales.

Una etapa importante de estudio fueron los amplificadores ópticos, que si bien es cierto no se utilizaron en el arreglo experimental desarrollado en este trabajo, representan un bloque importante en cualquier sistema WDM. En este caso, se estudió el principio de operación y aplicaciones de los AOS y de los EDFA's. Similarmente a lo realizado en las fuentes de luz, se estructuraron tablas comparativas que permiten una mejor selección de estos componentes para alguna aplicación específica.

En relación al medio de transmisión, se estudió el comportamiento de la luz dentro de la fibra desde el punto de vista de la óptica geométrica. También se describió su comportamiento general tomando en consideración la propagación de la luz como una onda.

En la etapa de recepción, se estudiaron y analizaron las formas de realizar la demultiplexión, especialmente el filtro óptico basado en lentes GRIN. De la misma manera, se estudió el principio de operación de los fotodetectores, así como sus principales aplicaciones.

Con respecto a la parte experimental, se realizó la caracterización de los diferentes componentes o bloques funcionales del sistema WDM construido, entre los que se encuentran las fuentes de luz láser y led, la fibra óptica, el multiplexor y el demultiplexor.

Con respecto a las fuentes de luz, se realizó la caracterización eléctrica tanto del láser como del led. En ambos casos, la máxima corriente de polarización fue de 120 mA, obteniéndose una potencia óptica máxima de 23 mW para el láser y de 1.2 mW para el led. Con estos resultados se pudo comprobar que ante la misma corriente de polarización, el láser presenta una mayor eficiencia cuántica y por consiguiente una mayor potencia de emisión.

En la caracterización de la fibra óptica se realizaron las mediciones la apertura numérica y la atenuación en la fibra. Para tener un marco de referencia de los resultados obtenidos, se utilizaron los valores proporcionados por el fabricante de la fibra óptica. En base a esto, el valor de la apertura numérica obtenido es 0.224 que es cercano al valor proporcionado por el fabricante. De la misma manera, el valor de la atenuación en la fibra obtenido de 8.46 dB/km con la fibra de 500 m., no varió significativamente con el del fabricante. Así también, en esta etapa se obtuvieron conocimientos inherentes al manejo de la fibra óptica. Uno de los conocimientos adquiridos, es la importancia que tiene el corte transversal de la fibra óptica, ya que de ello dependió en gran medida el desempeño del sistema de comunicación construido.

Se implementaron dos tipos de multiplexación: la multiplexación con lentes y con acoplador direccional. De ambas implementaciones, la utilizada para desarrollar el sistema completo fue la del acoplador direccional, debido a que en la multiplexación con lentes ocurrió una saturación del dispositivo controlador del led, lo cual no permitió realizar completamente la multiplexación. En el caso del multiplexor direccional fue posible comprobar la característica 50:50 descrita por el fabricante.

Se estimó el crosstalk entre los canales que fue de -2.24 dB. De lo cual, se apreció que debido a la mayor potencia proporcionada por el láser, parte de esta señal es introducida en el canal del led.

Asimismo, fue posible la estimación de pérdidas de cada uno de los bloques del sistema y por tanto las del sistema en general, al realizarse la integración de cada uno de los bloques, las mediciones fueron de 16.04 dB para el láser y a 16.54 dB para el led. Con la integración de todos los bloques funcionales, se construyó un sistema de comunicación óptica multicanalizado por división de longitud de onda con dos canales de información.

Además, se evaluó el desempeño del sistema con diferentes señales de entrada, el cual, resultó eficiente, por lo que fue posible recuperar las señales de información para cada una de las señales que fueron introducidas al sistema.

Los resultados obtenidos del presente trabajo de tesis proponen las siguientes líneas futuras de investigación:

- Conseguir no solo la caracterización eléctrica de las fuentes de luz, sino su caracterización óptica y su contenido espectral. Para esto, es necesario contar con un analizador de espectros.
- Agregar un amplificador óptico, para lograr la transmisión de información a grandes distancias, ya que como se observó en el sistema WDM construido, no fue posible la recuperación de la señal cuando la longitud de la fibra fueron 50 m.
- Disponer de fuentes de luz más rápidas, con mayor ancho de banda y mayor potencia, así como con longitudes de onda estándares.
- Del punto anterior, por ende, son necesario fotodetectores que sean funcionales para las fuentes de luz comentadas.
- Con respecto al tipo de información transmitida, emplear información digital bajo algún estándar de comunicación óptica.
- Desarrollo de un sistema de comunicación WDM que contenga más de dos canales de información con el formato apropiado a algún estándar de comunicación óptica.

- Realizar estudios a nivel de simulación de cada componente y del sistema WDM completo, utilizando software comercial como el software Optisystem comercializado por la empresa Optiwave.

Bibliografía

- [1] Agrawal G. P., “Applications of Nonlinear Fiber Optics”, San Diego, CA, 2001.
- [2] Agrawal G. P., “Fiber Optic Communication Systems”, Third Edition, Jhon Wiley & sons, New York, 2002.
- [3] Agrawal G. P., “Semiconductor Lasers”, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
- [4] Ankrum, Paul D, “Semiconductors Electronics”, Prentice Hall, 10th edition, New Jersey, 1971.
- [5] Applications Handbook, “Projects in Fiber Optics”, Newport corporation, USA 1999.
- [6] Application Note No. 5, “An Overview of the Laser Diode Characteristics”, ILX Lightwave Corporation, USA, 2002.
- [7] Application Notes, “The Newport Resources”, Newport Corporation, USA 2002.
- [8] Basov N. G., “Semiconductor Lasers”, in nobel lectures in physics, 1963-1970 pág, Elsevier, Amsterdam, 1972.
- [9] Blesa A., “Elementos ópticos holográficos integrados en sistemas electrónicos”, VI Jornadas de Tecnología Electrónica, Las palmas, Febrero 1995.
- [10] Borella Michael S., Jasón P. Jue, Dhritiman Banerjee, Byrav Ramamurth, Bisiwanath Mukherjee, “Optical Components for WDM Lightwave Networks” Proceedings of the IEEE, 85(8),1272-1285 pág., 1997.
- [11] Canstar Fiber Optic Couplers, “Technical Catalog”, USA, 1997.
- [12] Communication Industry Researches (CIR), “Conexión Fotónica y redes ópticas: oportunidades de mercado”, 2000.
- [13] Costa Bruno and Sordo Bruno, “Fibre Characterization” CSELT/Optical Fibre communication, 145-296 pág., Mc Graw Hill, 1981.
- [14] Davis Christopher C., “Laser and Electro-Optics, Fundamentals and Engineering”. Cambridge University Press. U.S.A. 1995.
- [15] Flower John, Application Note No 18, “Best test methods for pasive fiber components”, ILX Lighthwave, Photonic test and Measurement Instrumentation, 2001.
- [16] Fowles Grant R, “Introduction to Modern Optics”, Second Edition, Dover Publications Inc., New York,57-144 pág, 1989.

- [17] Gutiérrez Cortés, Fernando y López, Carlos Enrique (1998) “Una década de Internet en México” [en línea]. Revista Mexicana de Comunicación. Octubre-diciembre 1998, N° 56.
- [18] Haniharan, “Optical Interferometry”, Academia Press, Australia, 1-166 pág., 1985.
- [19] Hecht Eugene, “Óptica”, 587-606 pág., Wesley, Madrid, 2000.
- [20] Hernández Bennetts V. Manuel, F. Hugo Ramírez Leyva, “Trazador de curvas de transistores BJT con instrumentación Programable”, Octubre 2003.
- [21] Hirsch Carlos, “Competition and investments in México”, México, Mayo, 2003.
- [22] Joergensen C., T. Durhuus, C. Braagaard, B. Mikkelsen and K. E. Stubkjaer, “4 GB/s Optical Wavelength Conversion using semiconductor optical amplifiers”, IEEE Photonics Technology Letters, 657-660 pág, 1993.
- [23] Jones, William B., Jr., “Introduction to Optical Fiber Communications Systems”, Oxford University, USA, 1988.
- [24] Kartalopoulos Stamatios V., “Introduction to Dwdm Technology: Data in rainbow”, Wiley-IIEEE, USA, 2000.
- [25] Keiser Gerd E., “A Review of WDM Technology and Applications”, Optical Fiber Technology 5, 3-39 pág., 1999.
- [26] Kompfner R, Optics at Bell Laboratories – Optical communications, App. Opt., Vol. 11, No. 11 , 2412-2425 pág, 1972.
- [27] Lacroix S., “fused bitapared fiber devices for telecommunication and sensing systems“, critical review, Glass intregated optics and optical fibers, 253-274, Vol. CR 35, 2000.
- [28] Lathi B. P., “Sistemas de comunicación”, 1era. ed., Mc Graw Hill, México, 1996.
- [29] López-Amo. M. “Ultimas tendencias en comunicaciones ópticas”. VI Jornadas de Tecnología Electrónica, Las Palmas, Febrero 1995.
- [30] López-Higuera José Miguel, “Handbook of optical fibre sensing technology”, Wiley, 2002.
- [31] Luvison, Angelo, “Topics in Optical Fibre Communication Theory” CSELT/Optical Fiber Communication, 647-666 pág., Mc Graw Hill, 1981.
- [32] Maldonado B, Ramón, “Estudio de la eficacia de conversión de un proceso de mezcla de cuatro ondas dentro de un amplificador óptico de semiconductor”, Tesis de maestría en Ciencias. Cicese.
- [33] Marcatili E. A., “Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics”, Bell Syst. Tech. J., Vol 48, 2071-2102 pág., 1969.
- [34] Mishournyl Viatchesiav A., Aadrei Yu Gorbachev, “Láseres Semiconductores”, CIENCIA, 1996.
- [35] Mobarhan Kamran S., “Test and characterization de Laser Diodes: Determination of Principal Parameters” application note, Newport, 2002.
- [36] Randone Giorgio, “Electro-Optical Sources” CSELT/Optical Fibre communication, 381-462 pág., Mc Graw Hill, 1981.
- [37] Rebolledo Miguel Ángel and López Amo Manuel, “Optical Amplifiers” Handbook of optical fibre sensing technology, 165-166 pág., Wiley, 2002.
- [38] Rubio Martínez Baltasar, “Introducción a la Ingeniería de la Fibra Óptica“, España, Ra-Ma, 1994.

- [39] Saleh Bahaa E. A. and Teich, Malvin Carl, "Fundamentals of Photonics", Wiley Series in Pure and Applied Optics, U.S.A, 1991.
- [40] Saleh A. A. M., R. M. Jopson, J. D. Evankow, and J. Apell, IEEE Photon. Technol. Lett. 2, 714, 1990.
- [41] Tomasi Wayne, "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", Pearson Education, México, 1996.
- [42] Verdeyen Joseph T, "Laser Electronics", Third Edition, Prentice Hall, U.S.A, 1995.