

CAPÍTULO 2

Sistema de Comunicaciones Óptico: Estado del Arte

Durante muchos años varios sistemas de comunicaciones han surgido con la finalidad de obtener transmisiones más fiables que sean capaces de soportar grandes tasas de transmisión a mayores distancias. Antes del siglo 19, los sistemas de comunicaciones estaban basados en señales ópticas o acústicas, (señales de humo, fuego, sonidos, etc.) que tenían tasas de transmisión muy bajas y que no permitían enviar toda clase de información. Con la invención de telégrafo en 1838 por Samuel F. B. Morse se inició una nueva época de comunicaciones basadas en electricidad que alcanzaban tasas de transmisión de hasta 10 bps [1].

El primer sistema comercial de telegrafía fue implementado en 1844, creándose redes telegráficas de cobre en múltiples países del mundo. Posteriormente gracias a la invención del teléfono en 1876, el uso de cables de cobre para transmitir información se expandió enormemente con la instalación de redes telefónicas mundiales. En 1887 Heinrich Hertz descubre la radiación de las ondas electromagnéticas y con esto, en 1895, Guglielmo Marconi realiza la primera demostración del radio [1].

En los siguientes años una gran porción del espectro electromagnético fue utilizado para transmitir información de un lugar a otro. La razón de esto radica en que en sistemas de telecomunicaciones, por lo general, la información a transmitir es montada o sobrepuesta sobre otra onda electromagnética que se conoce como portadora. Como la cantidad de información a transmitir (o ancho de banda) está directamente relacionada con la frecuencia a la que la portadora opera, entonces aumentar la frecuencia de ésta implica aumentar el ancho de banda de la señal de información, lo que provee al sistema de una mayor capacidad de información [1,2].

De esta manera, el crecimiento de estos sistemas evolucionó a utilizar frecuencias más altas (longitudes de onda más pequeñas), lo que dio nacimiento a la televisión, el radar y enlaces de microondas.

Con la invención del láser y su demostración en 1960 surgió una nueva etapa en la historia de las comunicaciones. Aprovechando que las frecuencias ópticas están en el orden de 5×10^{14} Hz, el láser tiene una capacidad de información que excede a los sistemas de microondas por un factor de 10^5 , lo que equivale aproximadamente a 10 millones de canales de TV. Tratando de aprovechar esta ventaja, múltiples experimentos utilizando canales ópticos atmosféricos se realizaron durante esa época, sin embargo, el alto costo de estos sistemas y los problemas que presentaba el medio de comunicación como niebla, polvo, lluvia, etc., ocasionó que estos no se desarrollaran plenamente [1,7].

Conjunto con estos experimentos, múltiples trabajos de investigación sobre fibras ópticas se estaban desarrollando. En 1966 se sugirió que las fibras ópticas eran la mejor opción para utilizar el láser y transmitir información, debido a que éstas eran capaces de guiar luz de una manera similar de cómo los cables de cobre guiaban electrones. Sin embargo existía el problema de la gran atenuación que presentaban las fibras en aquel entonces, 1,000 dB/km, y no fue hasta 1970 cuando estas pérdidas se lograron reducir por debajo de los 20 dB/km. En ese mismo tiempo se

demonstraron los láseres de semiconductor GaAs trabajando continuamente a temperatura ambiente, siendo estos dos eventos los grandes impulsores en el desarrollo de sistemas de comunicaciones por fibra óptica [2,7].

El gran desarrollo realizado durante los 30 años posteriores se puede agrupar en 5 generaciones diferentes, durante las cuales, el producto BL (siendo B la velocidad de transmisión y L la distancia entre repetidores) se duplicó cada año [2,7].

Los sistemas ópticos de primera generación operaban a 850 nm y utilizaban láseres de semiconductor GaAs con fibras ópticas multimodo. Estos sistemas estuvieron disponibles comercialmente en el periodo de 1977 a 1979, trabajando a velocidades de 34 a 45 Mbps y eran capaces de transmitir hasta 10 km sin el uso de repetidores. Este gran espaciamiento entre repetidores, comparado con el que tenía el cable coaxial 1km, motivó de una manera muy importante la sustitución de éste por fibra óptica en enlaces de larga distancia [2,7].

También era claro que la distancia entre repetidores podría crecer considerablemente si los sistemas ópticos trabajasen en la región de 1310 nm, donde la fibra presentaba una atenuación por debajo de 1dB/km y una baja dispersión. Esto llevó al desarrollo de láseres de semiconductor InGaAsP y detectores operando a 1310 nm [7].

Así, la segunda generación de sistemas ópticos basados en láseres InGaAs y detectores operando a 1310 nm estuvo disponible a principio de los 80s. Sin embargo, la tasa de transmisión estaba limitada a debajo de los 100 Mbps debido a la dispersión que presentaban las fibras ópticas multimodo. Esta limitante fue superada cuando en 1981 se demostró la transmisión de 2 Gbps sobre 44 km de fibra óptica monomodo. De esta manera, para 1988 los sistemas operando a velocidades de hasta 1.7 Gbps a distancias de 50 km estuvieron disponibles comercialmente [2,7].

Las distancias máximas a las cuales podían transmitir estos sistemas estaban limitadas por la atenuación de la fibra en el rango de los 1310 nm. Para 1979 estas pérdidas eran mínimas alrededor de los 1550 nm, aproximadamente 0.2 dB/km. Sin embargo, los sistemas de tercera generación operando a 1550 nm sobre fibra monomodo se retrasaron debido a la gran dispersión de la fibra a esa longitud de onda [7].

Convencionalmente, los láseres de InGaAs no podían ser utilizados debido al ensanchamiento de los pulsos por la existencia de varios modos longitudinales. Por lo que el problema de la dispersión podía ser resuelto con la creación de fibras con poca dispersión en la región de los 1550 nm o limitando el espectro de los láseres a un solo modo longitudinal [2,7].

En 1985, experimentos de laboratorio demostraron la posibilidad de transmitir información a tasas de hasta 4 Gbps sobre distancias superiores a los 100 km. Por lo que los sistemas de tercera generación a 2.5 Gbps estuvieron disponibles comercialmente para 1992. Posteriormente los sistemas a 10 Gbps se introdujeron al mercado [2].

Una desventaja que presentaban los sistemas de tercera generación, era que la señal debía ser regenerada periódicamente utilizando repetidores óptico-eléctricos. Esto presentaba múltiples desventajas como retardos en la señal, limitación de las velocidades de transmisión, etc. Sin embargo esta situación cambió gracias a la aparición de los EDFAs (Erbium Doped Fiber Amplifier) en 1990, los cuales permitían la amplificación de señales ópticas sin la necesidad de una conversión eléctrica [2,7].

De esta manera, los sistemas de cuarta generación utilizaban amplificación óptica y tecnología WDM (multiplexación por longitud de onda), la cual ya era posible utilizar en sistemas de larga distancia sin necesidad de separar cada señal para su amplificación, lo que ocasionaba que fuera extremadamente costoso. La introducción de esta tecnología creó una revolución que resultó en duplicar la capacidad del sistema cada 6 meses. Así mismo, la utilización de los EDFAs permitió la transmisión de información a distancias mayores a los 11,600 km y velocidades de 5 Gbps, permitiendo implementar sistemas comerciales transatlánticos [2].

El desarrollo actual de estos sistemas se puede considerar como la quinta generación, buscando aumentar el número de canales que se pueden transmitir por fibra, aumentar las tasas de transmisión de cada canal, la

aparición de circuitos integrados fotónicos y circuitos de silicón que permitirán la implementación de la electrónica y la óptica en un mismo chip [2,16].

Hoy en día, empresas como Huawei, Alcatel-Lucent o Ericsson ofrecen plataformas DWDM a 40 Gbps empleando hasta 160 canales sobre banda C y L con separaciones de 50 Ghz entre canales. La mayoría de estos sistemas se encuentran preparados para soportar tasas de transmisión de 100 Gbps.

En Febrero del 2009, Verizon se convirtió en el primer proveedor de servicios en emplear tecnología de 100 Gbps, mediante tecnología de Nortel, sobre su red DWDM existente, en un enlace de Paris a Frankfurt de 893 km. Dicha tecnología utiliza detección coherente y modulación DP-QPSK (dual-polarization quadrature phase-shift keying). Hoy, más de 50 proveedores de servicios y operadores de telecomunicaciones cuentan con sistemas a 40 Gbps utilizando soluciones de Nortel [29].

En el caso de nuestro país, se puede citar a TELMEX, el cual cuenta con una red de fibra óptica a lo largo de todo México con canales a 40 Gbps utilizando modulación eDQPSK con tecnología de Huawei.

2.1. Elementos de un Sistema de Comunicaciones por Fibra Óptica

Los sistemas de comunicaciones por fibra óptica además de presentar la ventaja principal de tener una alta capacidad de información, también presentan las siguientes ventajas en comparación con sistemas de comunicaciones eléctricos [1,17] :

1. *Bajas pérdidas*, hoy en día las fibras ópticas presentan atenuaciones por debajo de los 0.16 dB/km, reduciendo en gran parte el uso de amplificadores.
2. *Inmunidad a interferencias*, debido a la naturaleza dieléctrica de las fibras.
3. *Mayor seguridad*, al permanecer el haz de luz confinado en el núcleo, no es posible acceder a los datos transmitidos por métodos no destructivos.
4. *Aislamiento eléctrico*, no hay riesgo de chispas eléctricas, por lo que es segura su utilización en ambientes peligrosos.
5. *Durabilidad*, período de vida más largo que el cable de cobre ó cable coaxial.
6. *Abundancia de la materia prima*, el sílica se encuentra abundantemente en la naturaleza y tiene un bajo costo.

Debido a las múltiples ventajas que provee la utilización de sistemas por fibra óptica, estos se han convertido en los sistemas por excelencia hoy en día para sistemas de comunicaciones guiadas. Como se puede observar, los sistemas de comunicaciones ópticos han y seguirán revolucionado el mundo de las telecomunicaciones. Hoy en día los sistemas por fibra óptica no solo se implementan en redes de larga distancia, sino también en redes metropolitanas, de área local y de acceso [3].

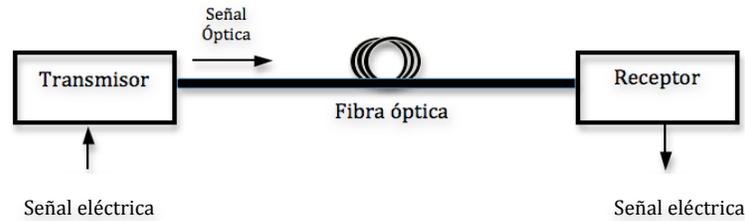


Figura 2.1. Elementos básicos de un sistema de comunicaciones por fibra óptica.

Un sistema de comunicaciones por fibra óptica moderno consiste de varios componentes cuya tecnología e implementación varían de acuerdo a las necesidades de cada operador. La Figura 2.1 muestra el diagrama de bloques de un sistema óptico en su forma más básica, el cual está formado por un *transmisor*, la *fibra óptica* y un *receptor*.

Como se puede observar, tanto al principio como al final del sistema la señal de información entra y sale de manera eléctrica. Esto se debe a que hoy en día todos los dispositivos como computadoras, televisores, reproductores de audio, etc., trabajan con este tipo de señales. Sin embargo, en la actualidad se están desarrollando múltiples investigaciones que tienen la finalidad de diseñar y construir circuitos integrados fotónicos (incluyendo transistores) que sustituyan por completo la electrónica en los dispositivos actuales [16,18].

2.2. El Transmisor

Como primer elemento del sistema se encuentra el transmisor, el cual tiene la función principal de convertir una señal eléctrica en una señal óptica y después enviarla hacia la fibra, su componente más importante es la fuente óptica. Los sistemas actuales de comunicaciones por fibra utilizan por lo general fuentes ópticas de semiconductor, las cuales son básicamente dos: Diodos Emisores de Luz (LEDs) y Diodos Láser (LDs). Dichos dispositivos se caracterizan por la longitud de onda a la que emiten radiación, la potencia con la que se emite dicha radiación, la forma de onda de salida y su ancho espectral [4,7].

El principio básico en el que se basan estos dispositivos para emitir radiación infrarroja radica en que en algunos materiales, como semiconductores, podemos distinguir dos bandas de energía: la *banda de valencia* (menor energía E_1) y la *banda de conducción* (mayor energía E_2), las cuales están separadas por un espacio donde no existen niveles de energía. Esto quiere decir que los electrones existentes en el material pueden existir solo en la banda de valencia o en la banda de conducción pero no entre éstas.

Cuando no existe un campo eléctrico externo aplicado al semiconductor, todos los electrones se encuentran en la banda de valencia, ya que estos no poseen la suficiente energía extra para saltar hacia la banda de conducción. Pero cuando un campo eléctrico externo es aplicado, algunos de estos electrones adquieren la energía necesaria para subir a la banda de conducción (Fig. 2.2a). Se dice así que estos electrones se encuentran "excitados", dejando huecos (cargas positivas) en la banda de valencia.

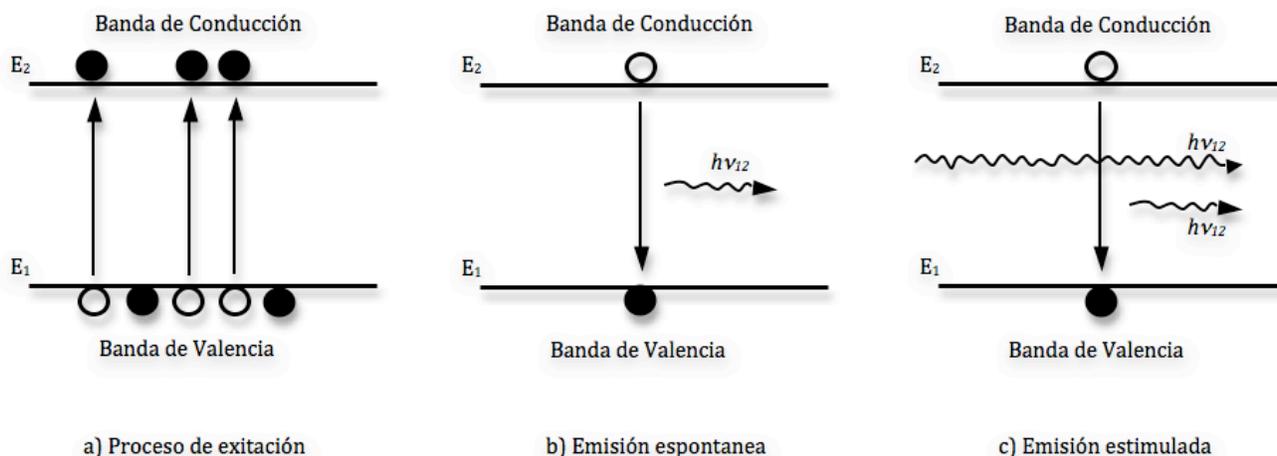


Figura 2.2. Tres procesos fundamentales que ocurren entre dos niveles de energía de un átomo. Los círculos huecos representan el estado inicial del electrón y los círculos llenos representan su estado final. El fotón incidente se muestra en la parte izquierda del diagrama (c) y los fotones emitidos en la parte derecha.

Cuando un electrón que se encuentra en la banda de conducción cae (pierde energía) hacia la banda de valencia, esa energía perdida se emite en forma de un fotón. Esta recombinación entre electrones y huecos se puede dar de manera espontánea o estimulada.

La emisión espontánea significa que la radiación ocurre sin una causa externa. Es decir, electrones excitados en la banda de conducción caen sin inducción externa a la capa de valencia, lo que resulta en emisión espontánea de un fotón con energía $E=h\nu_{12}$, como se observa en la Figura 2.2b. Sin embargo, si se deja que uno de estos fotones choque con un electrón excitado, ocasionará que este último caiga a la banda de valencia, generando otro fotón de las mismas características (energía, frecuencia, dirección, fase) de aquel que lo produjo. A este proceso se le llama emisión estimulada (Fig. 2.2c) [1,4,7].

Los LEDs tienen la desventaja principal que la radiación emitida es espontánea y por lo tanto incoherente⁹, teniendo un ancho espectral más amplio que el de un LD ($\Delta\lambda = 50\text{--}60\text{ nm}$). Así mismo posee tasas de modulación (50–140 MHz), potencias (<100 μW) y directividad más bajas que las de un LD, haciendo impráctica su utilización para enlaces de larga distancia [5,7].

Por otro lado, los LDs son dispositivos más complejos que generan emisión estimulada y por lo tanto, su radiación es coherente, ocasionando que su ancho espectral sea mucho más angosto. Estos dispositivos tienen una mayor directividad, son prácticamente monocromáticos¹⁰ ($\Delta f < 10\text{ MHz}$) y son 10 veces más eficientes que un LED ($P_{\text{out}} \sim 100\text{ mW}$) [4]. Así mismo pueden ser modulados directamente a tasas más altas (>25 GHz) y debido a estas características son los más utilizados en comunicaciones a altas velocidades y grandes distancias.

La Figura 2.3 muestra la característica del ancho espectral tanto de un LED como de un LD. Este ancho espectral, $\Delta\lambda$, se mide en nm y se define como la anchura del pulso medida a la mitad de la potencia máxima (FWHM). Esto quiere decir a -3dB de la potencia máxima radiada. Como se verá en la sección 2.3.3, este parámetro juega un papel muy importante, ya que determina el valor de la dispersión cromática y por lo tanto, limita el ancho de banda de la señal a transmitir sobre la fibra óptica.

⁹ La radiación de fotones ocurre en cualquier tiempo, es decir, los fotones son creados independientemente unos de otros. Por lo tanto no existe una correlación de fase entre fotones diferentes.

¹⁰ Emiten a una sola longitud de onda.

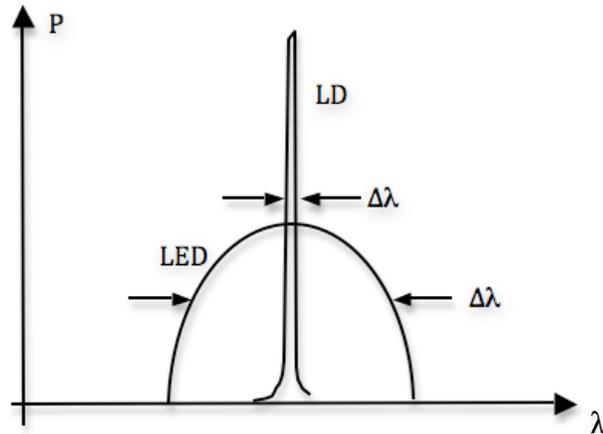


Figura 2.3. Ancho espectral de un LD y LED.

En comunicaciones por fibra óptica podemos encontrar una gran variedad de láseres que inclusive pueden no estar fabricados de materiales semiconductores. Como es el caso de los láseres de fibra, que utilizan como medio activo una región de fibra dopada con erbio y un láser de bombeo para conseguir la radiación estimulada. Sin embargo los láseres de semiconductor, gracias a su estructura $p-n$, pueden fabricarse en grandes volúmenes utilizando tecnología existente y bastante desarrollada de semiconductores integrados [6].

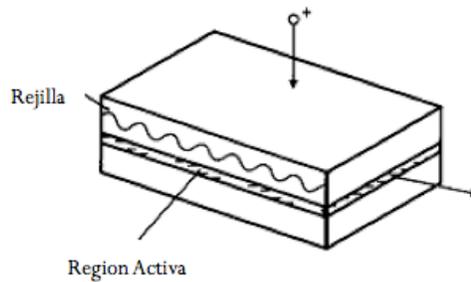


Figura 2.4. Estructura de un láser DFB.

Un ejemplo de láseres de semiconductor se presenta en la Figura 2.4, a dicho láser se le conoce como *Distributed Feedback Laser* o DFB. Dichos láseres son un tipo de láseres de semiconductor los cuales utilizan dentro de la región activa una estructura periódica, o rejilla, que tiene como finalidad la selección de la longitud de onda, disminuyendo el ancho de línea de emisión, y la retroalimentación necesaria para obtener el laseado o lasing, haciendo que el uso de espejos reflectores en los extremos de la cavidad del láser no sean necesarios.

La rejilla es construida de tal manera que solo refleje una banda muy pequeña de longitudes de onda, produciendo de esta manera una línea bastante angosta a la salida del láser ($\Delta f \sim 2$ MHz). Debido a sus características, este tipo de láseres son ampliamente utilizados en sistemas DWDM actuales.

El cuadro 2.1 muestra los valores típicos de diferentes parámetros para láseres DFB actuales. Dichos valores pertenecen al modelo NX8570SCxxxQ-BA de la empresa NEC trabajando sobre la banda de 1550nm. Así mismo,

la Figura 2.5 muestra su característica espectral y la relación de corriente inyectada I_f con la potencia óptica de salida P_f .

Cuadro 2.1. Características Electro-Ópticas de láser DFB Mod. NX8570SCxxxQ-BA NEC.

Parámetro	Símbolo	Condición	Min.	Typ.	Max.	Unidad
Temperatura de sintonización del láser	T_{set}	8 canales sintonizables	5		55	°C
Forward Voltage	V_F	$P_f = 20\text{mW}$	0.9	1.2	2.5	V
Corriente de umbral	I_{th}			20	40	mA
Corriente de operación	I_{op}	$P_f = 20\text{mW}$		120	167	mA
Potencia óptica de salida	P_f	$I_f = 167\text{ mA}, T_{LD} = T_{set}$	20			mW
Longitud de onda emitida	λ_p	$P_f = 20\text{ mW}, \text{CW}, T_{LD} = T_{set}$	1530	UIT-T	1609	nm
Estabilidad frecuencial	-	$T_{LD} = T_{set}$	-20		+20	pm
Anchura de línea espectral	$\Delta\nu$	$P_f = 20\text{ mW}, \text{CW}, 3\text{dB}$		1	2	MHz
Supresión de modo lateral	SMSR	$P_f = 20\text{ mW}, \text{CW}$	35	45		dB
Intensidad de ruido relativo	RIN	$P_f = 20\text{mW}, 20\text{ MHz}-3\text{GHz}$			-150	dB/Hz

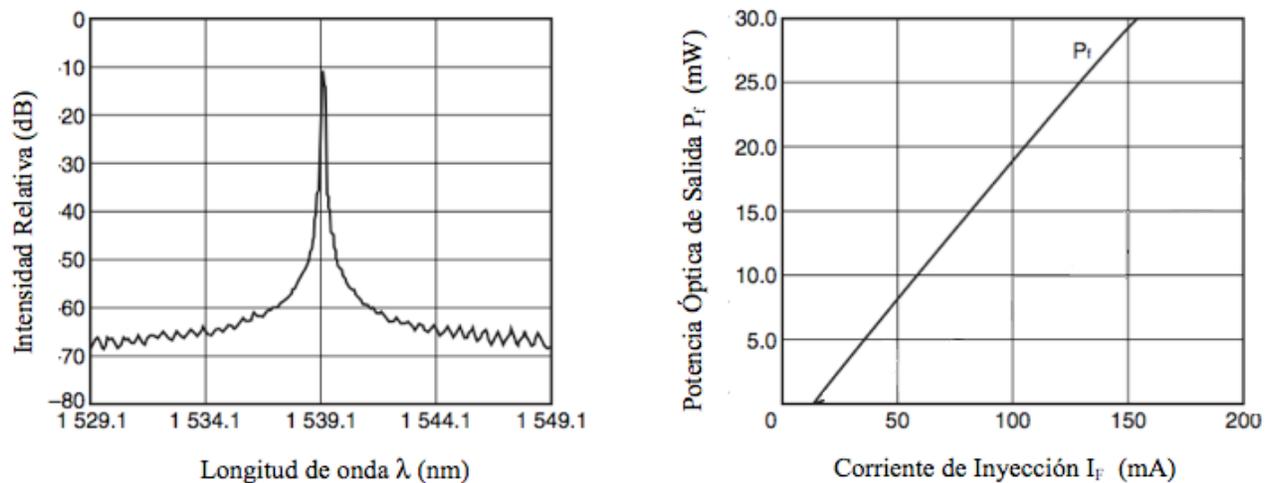


Figura 2.5. Espectro (izquierda) y Corriente inyectada VS Potencia óptica emitida (derecha) para DFB-LD Mod. NX8570SCxxxQ-BA de NEC.

2.2.1. Modulación Interna y Externa

Al proceso de integrar información en un haz de luz se le llama modulación. La modulación más sencilla y la más utilizada se llama *on-off keying* (OOK), donde el haz de luz es simplemente “prendido o apagado” dependiendo si el bit de información es un 1 o un 0. Este tipo de modulación se puede realizar de dos formas, por modulación directa o por modulación externa.

La modulación directa consiste en aplicar una corriente al semiconductor tal, que ésta se encuentre por arriba de la corriente de umbral para un bit 1 o por debajo para un bit 0 (Figura 2.6a). La relación entre la potencia de salida para un 1 y para un 0 se llama razón de extinción o *extinction ratio EX*. Esta modulación es simple y barata ya que

no se necesita de ningún otro componente para realizarla. De hecho, la mayor ventaja de los láseres de semiconductor es que pueden ser modulados directamente a diferencia de los láseres de fibra¹¹ [6].

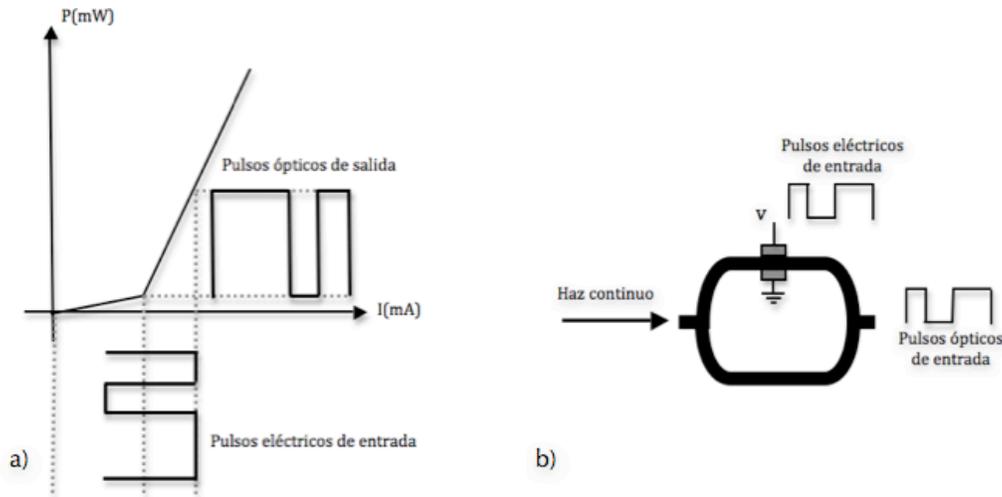


Figura 2.6. Modulación a) directa y b) externa de un láser semiconductor.

Sin embargo, la principal desventaja de este tipo de modulación radica en que los pulsos resultantes se consideran como *chirpeados*. El chirp es un fenómeno donde la frecuencia y fase de la portadora de los pulsos transmitidos varía con el tiempo, causando un crecimiento del espectro transmitido que a su vez, ocasiona una mayor dispersión durante su transmisión. A velocidades por arriba de los 10 Gbps el chirp es tan alto que la modulación directa de láseres semiconductores es muy rara vez utilizada [6,7].

Una manera de combatir este problema es mediante la modulación externa, en la cual un dispositivo se coloca a la salida de la fuente de luz (la cual es continua) y mediante fenómenos como interferometría o electroabsorción se deja pasar o no el haz de luz, formando de esta manera 1s y 0s (Figura 2.6b). En este aspecto, los dos tipos de moduladores externos más utilizados son *moduladores de electroabsorción (EAM)* y *moduladores interferométricos Mach-Zehnder (MZ)*.

Los moduladores de electroabsorción son un tipo de dispositivo de semiconductor que hace uso del efecto Franz-Keldysh, en el cual la separación entra la banda de valencia y la de conducción (*bandgap*) de un semiconductor disminuye cuando un campo eléctrico es aplicado sobre éste. Por lo que un semiconductor, que en un principio era transparente para cierta región de longitudes de onda, empieza a absorber luz cuando su *bandgap* se reduce por la aplicación de un voltaje externo [7].

La principal ventaja de este tipo de moduladores, es que están fabricados por el mismo material semiconductor del láser (InGaAsP), por lo que ambos pueden ser fácilmente integrados dentro del mismo chip. Moduladores modernos de este tipo superan los 100 Gbps con una relación de extinción prendido-apagado (*extinction ratio EX*) mayores a 10 dB [7, 30, 31].

¹¹ Debido al gran tiempo de vida de los átomos excitados del Erblio.

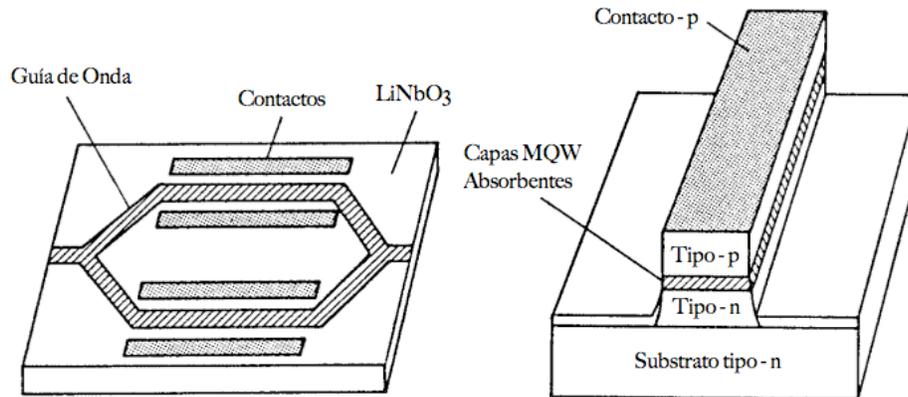


Figura 2.7. Modulador externo basado en configuración Mach-Zehnder LiNbO_3 (izquierda) y basado en electroabsorción (derecha).

Por otro lado, los moduladores Mach-Zehnder son un tipo de interferómetro donde dos guía de onda de material LiNbO_3 forman los dos brazos del interferómetro. En este caso, la aplicación de un campo eléctrico externo provocará el cambio del índice de refracción del material. En la ausencia de un campo externo, el campo óptico de la señal proveniente del láser experimentará un cambio de fase igual en los dos brazos, interfiriendo a la salida constructivamente. Sin embargo, cuando un campo eléctrico externo es aplicado a uno de los brazos, se logrará un desfase de fase igual a π , lo que resultará en una interferencia destructiva. Este tipo de moduladores puede alcanzar bit rates de hasta 75 Gbps con voltajes relativamente bajos de tan solo 5 V. De igual manera, poseen una EX mayor a 25 dB [7,32].

2.3. La Fibra Óptica

El siguiente elemento básico es la fibra óptica, la cual es una guía de onda dieléctrica que opera a frecuencias ópticas. Como se vio al principio de este capítulo, las fibras ópticas han evolucionado a lo largo del tiempo logrando transportar señales a mayores distancias. La fibra óptica es prácticamente el elemento fundamental de un enlace de comunicaciones de larga distancia ya que los dispositivos como láseres o receptores evolucionan a partir de ésta.

Las fibras ópticas son capaces de confinar energía electromagnética en forma de luz y de guiarla de manera paralela a su eje longitudinal. Esta propagación puede ser descrita de dos formas: como ondas electromagnéticas guiadas llamadas *modos* o por óptica geométrica. Este último método comparado con el análisis exacto de los modos, proporciona una interpretación física más clara de la propagación de luz en la fibra óptica [1,7].

Estudiemos entonces la óptica geométrica, conforme a la Figura 2.8a supongamos que un haz de luz que viaja de un medio con índice de refracción η_1 incide sobre otro medio con índice de refracción η_2 , la diferencia de estos índices de refracción ocasionara que una parte de dicho haz se transmita al segundo medio y otra parte se refleje de vuelta al primer medio.

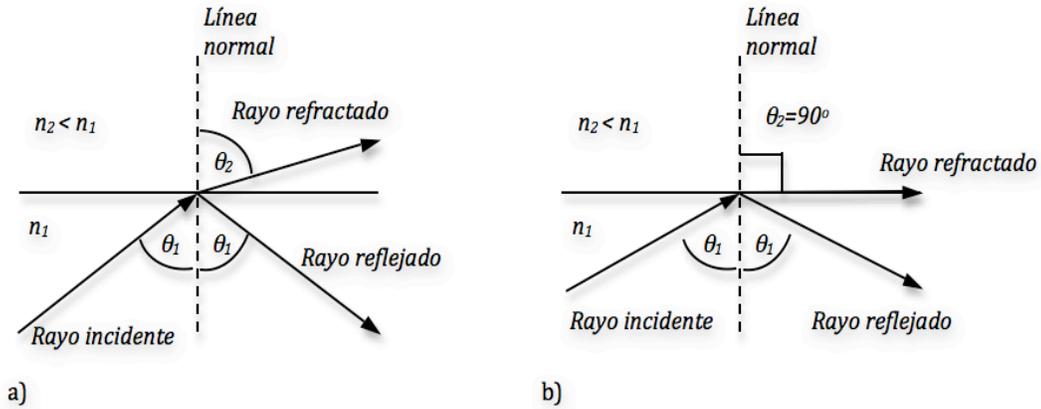


Figura 2.8. a) Reflexión y refracción de un haz de luz entre dos medios de diferente índice de refracción, b) Reflexión interna total cuando $\theta_2=90^\circ$ y $\theta_1=\theta_c$.

La relación entre el ángulo formado entre el haz incidente y el refractado con la normal entre los dos medios se define por la siguiente ecuación, conocida como ley de Snell [1].

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (2.1)$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción del medio incidente y del segundo medio respectivamente.

Entonces, cuando un haz de luz incide de un material con índice de refracción n_1 sobre otro con índice de refracción n_2 , parte de la luz es reflejada hacia el primer medio y otra refractada hacia el segundo. En el caso particular cuando $n_1 > n_2$ existe cierto ángulo a partir del cual toda la luz se refleja hacia el primer medio, obteniéndose una reflexión interna total. A este ángulo se le conoce como ángulo crítico (Figura 2.8b) y puede ser calculado de la siguiente manera:

$$\theta_c = \text{ang} \sin \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

Así, la fibra óptica está compuesta básicamente de un núcleo con índice de refracción n_1 , rodeado de un revestimiento con índice de refracción n_2 , como se muestra en la Figura 2.9 y visto desde la óptica geométrica, la luz se propaga en la fibra mediante una serie de reflexiones internas totales que ocurren entre el núcleo y el revestimiento. El núcleo y el revestimiento o cladding están hechos del mismo material ya sea sílica o plástico y solo cambian su índice de refracción ligeramente uno con respecto del otro. El índice de refracción es una unidad adimensional que caracteriza las propiedades ópticas de un material definiéndose de la siguiente manera [1]:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.3)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v la velocidad de la luz en el medio. La diferencia entre estos dos índices de refracción se logra dopando el sílica con diferentes tipos de dopantes [1,4,7].

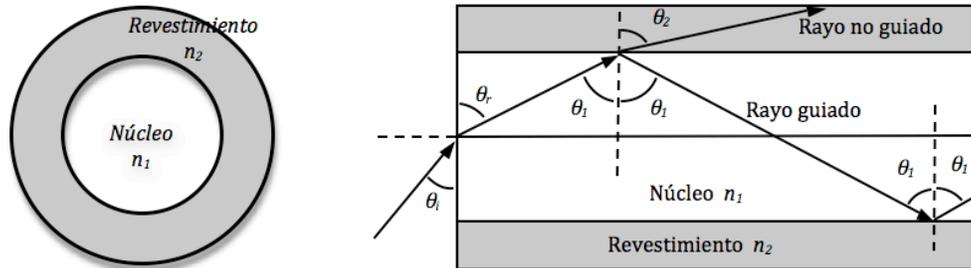


Figura 2.9. a) Estructura de la fibra óptica y b) confinamiento de luz por reflexión interna total. El rayo no guiado existe solo para rayos en los cuales $\theta_1 < \theta_c$ los cuales son refractados fuera del núcleo.

2.3.1. Tipos de fibras ópticas

Como se vio anteriormente, la segunda manera de estudiar la propagación de la luz en la fibra óptica es mediante la teoría de modos. Los modos son la distribución de los campos eléctrico y magnético de la onda electromagnética a través de la fibra. Solo un número discreto de modos son capaces de propagarse a lo largo de la fibra y estos son aquellos que satisfagan la ecuación de onda (A1.10) y las condiciones de frontera en la guía [1]. Su estudio está más allá del contenido de esta tesis y puede ser encontrado en [1,4,6,7] entre otros. El número de modos que se pueden propagar puede ser calculado mediante la siguiente expresión [1]:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.4)$$

donde V es la frecuencia normalizada de corte, a el radio del núcleo y λ es la longitud de onda de operación. En el caso particular cuando $V < 2.405$ solo un modo puede propagarse en la fibra, a este tipo de fibra se le llama *Fibra Monomodo*. Si $V > 2.405$ diferentes modos empezarán a propagarse en la fibra y se dice que es una *Fibra Multimodo* [1,6].

Un modo de propagación puede ser visto como un grupo de rayos que se propagan a lo largo de la fibra a un mismo ángulo de propagación. Esto quiere decir que cada modo tendrá un grupo de rayos asociados que viajarán a un mismo ángulo con respecto al eje longitudinal de la fibra. Por lo tanto entre más modos se propaguen en la fibra, existirán más rayos que se propaguen en diferentes direcciones.

Si se tienen rayos que viajan en diferentes direcciones, cada uno recorrerá una distancia diferente con respecto a los otros, ocasionando que el pulso de salida (formado por todos estos rayos) se ensanche. A este ensanchamiento se le llama *dispersión modal*.

La principal ventaja de utilizar fibras ópticas monomodo radica en que esta dispersión prácticamente desaparece, pudiéndose transmitir a mayores distancias y con tasas de transmisión más altas.

Hasta ahora solo hemos considerado que el índice de refracción del núcleo varía constantemente con respecto al del revestimiento. Esto quiere decir que tiene un valor fijo que no cambia con respecto al eje normal de la fibra. A este tipo de fibras se les conoce como de *índice escalonado*. Sin embargo existen fibras en las cuales el índice de refracción varía gradualmente de acuerdo a este eje.

Este tipo de fibras de índice gradual, son fibras multimodo que tratan de contrarrestar los efectos de la dispersión modal. Como se observa en la Figura 2.10, el valor del índice de refracción es mayor en el centro que en los extremos del núcleo. Esto se traduce en que el rayo que viaja a lo largo del eje longitudinal recorre una menor

distancia, sin embargo viaja más lentamente ya que el índice de refracción en esa zona es mayor. Los rayos oblicuos recorren una mayor distancia pero viajan más rápidamente debido a que el índice de refracción es menor. De esta manera se logra que la diferencia de tiempo que tardan los rayos en recorrer la longitud de la fibra sea mínima, disminuyendo así la dispersión modal.

La Figura 2.10 muestra los tres tipos principales de fibras ópticas utilizadas para comunicaciones, las cuales se caracterizan por el perfil de índice de refracción y por las dimensiones del núcleo, que a su vez determina el número de modos que se propagan por ésta [1,3].

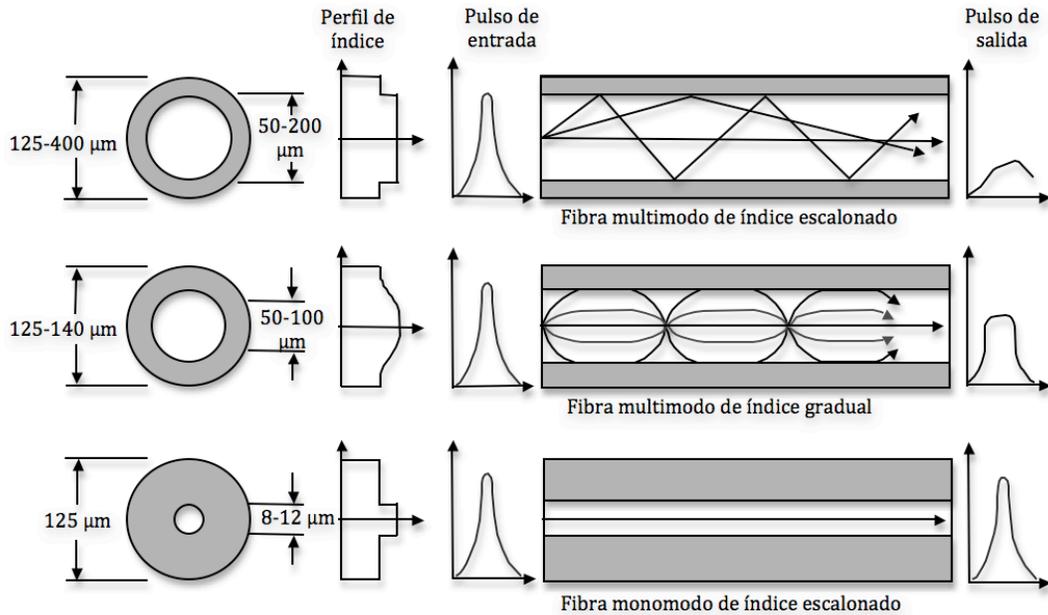


Figura 2.10. Tipos de fibras ópticas utilizadas para comunicaciones donde se muestra también la característica del pulso de entrada y el de salida.

2.3.2. Atenuación

Un parámetro muy importante que limita la distancia máxima entre el transmisor y el receptor es la atenuación, debido a que el receptor necesita una cierta potencia mínima requerida para recuperar la señal de forma correcta. Es la disminución paulatina de la potencia de la señal conforme ésta se propaga a lo largo de la fibra óptica y puede estar dada por la absorción que presenta el sílica a ciertas longitudes de onda, por radiación de la energía, por esparcimiento o por imperfecciones de la fibra.

Se define como la relación entre la potencia de salida (P_{out}) de la fibra después de una cierta longitud L y la potencia óptica de entrada (P_{in}). La potencia óptica de salida puede ser calculada como [7]:

$$P_{out} = P_{in} \exp(-\alpha L) \tag{2.5}$$

donde α es el coeficiente de atenuación y es comúnmente expresado en dB/km mediante la siguiente expresión [1]:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (2.6)$$

Este coeficiente depende de la longitud de onda como se observa en la Figura 2.11. Debido a esta característica de las fibras ópticas, los dispositivos como láseres y receptores se han diseñado para trabajar en diferentes zonas de transmisión donde la atenuación es mínima. Estas zonas o ventanas han evolucionado con el paso de los años hasta el punto donde las pérdidas por absorción OH (picos de agua) han desaparecido en toda la gama de longitudes de onda ópticas. Hoy en día podemos encontrar fibras con coeficiente de atenuación mínimo de 0.15 dB/km [8,9].

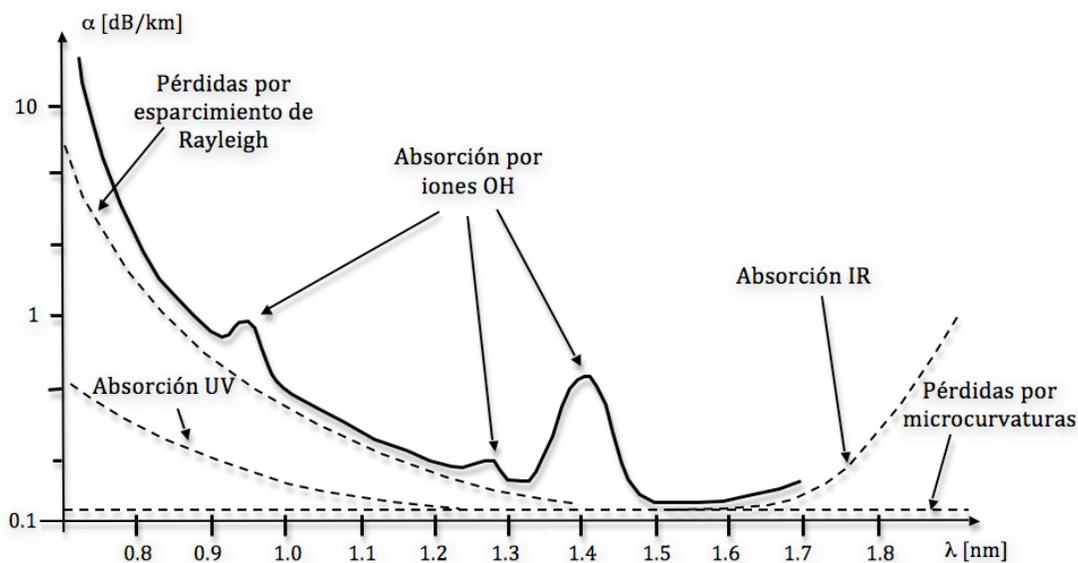


Figura 2.11. Atenuación en una fibra óptica $\alpha(\lambda)$ vs λ .

Las pérdidas por absorción pueden dividirse en dos categorías: pérdidas intrínsecas que corresponden a la absorción que presentan los átomos básicos que constituyen el sílica y pérdidas extrínsecas que corresponden a impurezas del material. Cualquier material presenta factores físicos que determinan que tan “transparente” es éste en ciertas regiones del espectro. En el caso del sílica, las pérdidas intrínsecas se deben a la resonancia eléctrica en la región ultravioleta y a la resonancia vibratoria en el infrarrojo.

Por otro lado, las pérdidas extrínsecas resultan por la presencia de impurezas como Fe, Cu, Co, Ni, Mn y Cr que absorben muy fuertemente en la región de 0.6 a 1.6 μm . Sin embargo, la principal fuente de absorción por causas extrínsecas es la presencia de iones OH, los cuales ocasionan resonancia vibratoria en las regiones de 0.95, 1.24 y 1.39 μm . Como se ha mencionado antes, la absorción debida a estos iones OH ha sido practicante desaparecida en fibras ópticas actuales [1,7].

Las pérdidas por esparcimiento de Rayleigh se deben a que durante la fabricación de la fibra se producen pequeñas fluctuaciones de densidad de las moléculas de sílica, lo que ocasiona fluctuaciones en el índice de refracción.

Por último, las pérdidas por microcurvaturas o imperfecciones de la fibra se deben a que la fibra óptica no es perfectamente cilíndrica y presenta imperfecciones en la interfaz núcleo-revestimiento. Estas imperfecciones

provocan cambios en la dirección de propagación de los rayos, pudiendo hacer que no se cumpla la condición de reflexión interna total y haciéndolos refractarse fuera del núcleo.

2.3.3. Dispersión

Además de la atenuación, la señal que viaja por la fibra óptica también se ve degradada por efectos de la dispersión, la cual se puede dividir, en principio, en *dispersión intermodal* y *dispersión intramodal*. Estos dos efectos se pueden explicar si se examina el comportamiento de las velocidades de grupo de cada uno de los modos, donde la velocidad de grupo es la velocidad a la cual viaja la energía correspondiente a cada modo dentro de la fibra.

La *dispersión intermodal* o *modal* se debe básicamente a que cada modo de propagación tiene diferentes valores de la velocidad de grupo. Esto ocasiona que cada modo llegue en diferente tiempo al receptor, ocasionando el ensanchamiento del pulso. Viéndolo desde la óptica geométrica, rayos con diferentes direcciones de propagación (modos) recorren distancias diferentes, como se puede observar en la Figura 2.10. Este tipo de dispersión es prácticamente nula en fibras ópticas monomodo [1,7].

La *dispersión intramodal* o *cromática* es aquella que se da dentro de un solo modo de propagación. Se debe a que la velocidad de grupo es función de la longitud de onda λ y debido a esta dependencia, si se tiene un ancho espectral de la fuente muy amplio entonces la degradación de la señal por esta dispersión crecerá. Es por esto que la utilización de LEDs representa una limitante para enlaces de larga distancia y altas tasas de transmisión [1,7].

Las dos principales causas de la dispersión intramodal son:

1. *Dispersión del material*, que ocurre debido a la variación del índice de refracción del núcleo en función de la longitud de onda $n(\lambda)$. Esto quiere decir que diferentes longitudes de onda viajan a diferentes velocidades aunque tengan la misma dirección.
2. *Dispersión de guía de onda*, que es producida por la forma en que cierta geometría de la fibra afecta a diferentes longitudes de onda. Las fibras ópticas monomodo solo confinan el 80% de la potencia óptica en el núcleo, el otro 20% se propaga por el revestimiento más rápido que la luz confinada en el núcleo. Como la distribución de la potencia de un modo entre el núcleo y el revestimiento depende de la longitud de onda, si la longitud de onda cambia, la distribución de potencia también lo hace [1,6,7].

En fibras ópticas monomodo la dispersión que predomina es la dispersión cromática, la cual es la suma de la dispersión del material y de la guía de onda ($D = D_m + D_w$). Como se ha mencionado antes, la velocidad de grupo depende de la longitud de onda y está dada por [7]:

$$V_g = \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

donde β es la constante de propagación $\beta = \frac{2\pi n(\lambda)}{\lambda}$ y ω es la frecuencia angular dada por $\omega = 2\pi c/\lambda$.

La dependencia de la velocidad de grupo con la frecuencia ocasiona el ensanchamiento del pulso debido simplemente a que las diferentes componentes espectrales se dispersan durante su propagación y no llegan simultáneamente a la salida de la fibra. Si $\Delta\omega$ es el ancho espectral del pulso, el ensanchamiento de este después de recorrer una cierta distancia L está dado por [7]:

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{L}{V_g} \right) \Delta\omega = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega \quad (2.8)$$

Donde T es el tiempo que tarda una cierta componente espectral a la frecuencia ω en recorrer la distancia L . El parámetro $\beta_2 = d^2\beta/d\omega^2$ se conoce como parámetro GVD (Group Velocity Delay) y determina que tanto se va a ensanchar un pulso durante su propagación por la fibra.

En sistemas ópticos es común utilizar $\Delta\lambda$ en lugar de $\Delta\omega$, utilizando la transformación $\omega = 2\pi c/\lambda$ tenemos que $\Delta\omega = (-2\pi c/\lambda^2)\Delta\lambda$. La ecuación (2.8) puede ser escrita de la siguiente manera [7]:

$$\Delta T = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{V_g} \right) \Delta\lambda = DL\Delta\lambda \quad (2.9)$$

donde

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{V_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.10)$$

D es el parámetro de dispersión y se expresa en ps/(km-nm) [1,7,11].

La Figura 2.12. muestra los efectos de la dispersión sobre una secuencia de pulsos transmitidos a través de la fibra óptica.

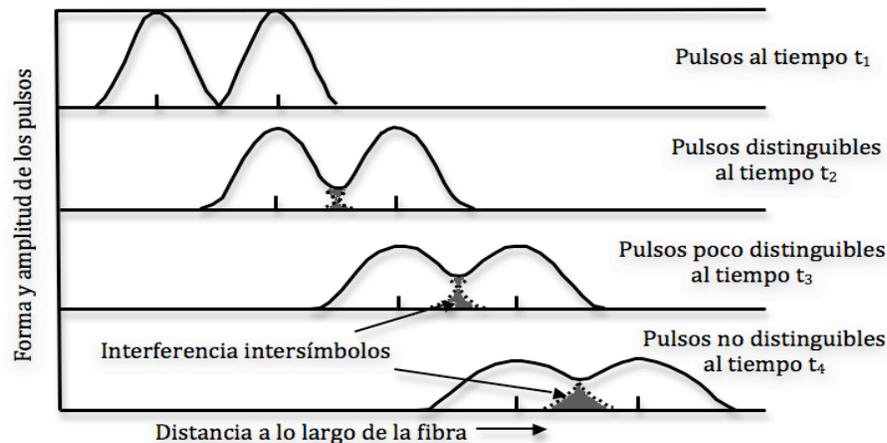


Figura 2.12. Dispersión y atenuación de los pulsos a lo largo de su propagación por la fibra óptica.

Como se puede observar, el ensanchamiento de los pulsos ocasiona que después de una cierta distancia exista un traslape entre los bits, a este fenómeno se le conoce como interferencia entre símbolos (ISI). Después de un cierto ISI el receptor no será capaz de distinguir entre símbolos individuales, ocasionando errores en su detección. La limitación de la dispersión sobre la tasa de bit (bit rate) va a depender de las características espectrales de la fuente,

del tipo de fibra a utilizar y del chirp. Un análisis más detallado sobre el ensanchamiento del pulso se encuentra en la sección 3.1 de esta tesis.

2.3.4. Efectos no-lineales

La idea de asumir que las señales que se propagan por la fibra óptica se comportan linealmente es una aproximación adecuada cuando se opera a niveles de potencia de unos pocos mW y a velocidades de transmisión que no superen los 2.5 Gbps. Sin embargo, a velocidades superiores como 10 Gbps o potencias más altas, es importante empezar a considerar los efectos no lineales. El uso de amplificadores o de tecnología WDM ocasionan que las potencias que se propagan por la fibra se incrementen de manera considerable (>20 dBm) y que estas no-linealidades empiecen a jugar un papel importante en el análisis de un sistema de comunicaciones óptico [6,12].

Los efectos no lineales se pueden clasificar en dos categorías [6]:

1. Los que se producen por la interacción de la onda con los fonones (vibraciones moleculares) en el sílica: esparcimiento estimulado de Raman (SRS) y esparcimiento estimulado de Brillouin (SBS).
2. Los que se producen debido a la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo eléctrico aplicado, que a su vez es proporcional al cuadrado de su amplitud: auto-modulación de fase (SPM), modulación de fase cruzada (XPM) y la mezcla de cuatro ondas (FWM).

En los efectos de esparcimiento, existe energía que se transfiere de una onda de luz a otra onda cuya longitud de onda es mayor (menor energía debido a $E=h\nu$). La energía perdida es absorbida por las vibraciones moleculares o fonones en el medio. La segunda onda que se genera y gana energía de la primera se llama onda de Stokes. En el caso de SRS, la onda de Stokes es radiada en todas direcciones y posee un ancho espectral bastante amplio, pudiendo llegar a traslaparse con otras señales. En el caso de SBS, la onda de Stokes pose una longitud de onda muy cercana a la de la onda original y se propaga en dirección contraria a ésta, pudiendo hacer que la onda original se pierda [6,12,13].

En el caso de la auto-modulación de fase (SPM), surge debido a que el índice de refracción de la fibra tiene una componente dependiente del cuadrado de la intensidad del campo eléctrico. Este índice de refracción no-lineal induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso. De esta forma, las diferentes componentes espectrales del pulso sufren diferentes desplazamientos de fase, lo que provoca que el pulso adquiera un cierto chirp, que a su vez modificará los efectos de la dispersión sobre el pulso [1,6].

En el caso de sistemas WDM, el chirp inducido de un canal también depende de la variación del índice de refracción con la intensidad del campo de otros canales. La modulación de fase cruzada (XPM) se produce entonces entre diferentes canales WDM, de forma que la potencia de un canal puede afectar a la fase de otro [1,6,13].

Otro efecto no-lineal importante en sistemas WDM es la mezcla de cuatro ondas o four-wave mixing (FWM), el cual es un fenómeno por el cual, cuando se propagan varias ondas a frecuencias f_1, \dots, f_n , la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo eléctrico no sólo induce a desplazamientos de fase dentro de cada canal, sino también a la aparición de nuevas ondas a frecuencias $f_{ijk} = \pm f_1 \pm f_2 \pm f_3$ que pueden traslaparse con otros canales. A diferencia de SPM y XPM que ocurren por lo general a altas tasas de transmisión, FWM es independiente del bit rate pero críticamente dependiente de la separación entre canales y de la dispersión cromática de la fibra [1,6,12].

Hoy en día existen tipos de fibras ópticas llamadas fibras de dispersión desplazada no cero (NZDF) que han sustituido a las fibras de dispersión desplazada normales, debido a que éstas presentan fuertes problemas de FWM

en el punto de dispersión cero. Por lo tanto, debe existir un compromiso entre dispersión cromática y fenómenos no-lineales en sistemas WDM, de forma que exista algo de dispersión cromática para minimizar estos efectos pero tomando en cuenta las limitantes que ésta conlleva [13,14]. La sección 3.4 muestra de manera más detallada las implicaciones de los efectos SPM, XPM y FWM sobre la señal óptica transmitida por la fibra.

Actualmente, la UIT-T ha especificado diferentes tipos de fibras ópticas, cuyos parámetros varían de acuerdo al tipo de aplicación. El cuadro 2.2. muestra de manera general los tipos de fibras monomodo existentes así como su coeficiente de atenuación, dispersión y aplicación. El apéndice 3 muestra sus especificaciones a mayor detalle [33].

Cuadro 2.2. Fibras Ópticas G.652, G.653 y G.655 de acuerdo a UIT-T.

UIT-T Estándar	Nombre	Coef. Atenuación (banda C)	Coef. Dispersión (Banda C)	Aplicación
G.652	Fibra monomodo estándar SMF	0.25 – 0.5 dB/km	17 ps/nm*km	OK para xWDM
G.652c	Low Water Peak SMF	0.25 – 0.35 dB/km	17 ps/nm*km	Buena para CWDM
G.653	Fibra monomodo de dispersión desplazada	0.25 – 0.5 dB/km	0 ps/nm*km	Mala para xWDM
G.655	Fibra monomodo de dispersión desplazada no nula	0.25 – 0.35 dB/km	5 ps/nm*km	Buena para DWDM

2.4. El Receptor

La idea del receptor es convertir las señales ópticas en señales eléctricas nuevamente y procesarlas de cierta manera (regeneración, amplificación, decisión de 1 y 0, etc.). En el caso del receptor, el elemento que tiene la finalidad de realizar la conversión óptica-eléctrica es el fotodetector, el cual genera una corriente proporcional a la potencia óptica incidente, a esta corriente se le llama *fotocorriente*. Como la señal óptica que le llega al fotodetector por lo general está muy atenuada y distorsionada, los fotodetectores deben cumplir con un cierto número de requerimientos como: alta velocidad de respuesta, buena sensibilidad, bajo ruido, poco sensibles a los cambios de temperatura, ser compatibles con las dimensiones físicas de la fibra y tener una vida de operación alta [1,4].

Por lo general en sistemas de comunicaciones por fibra óptica, los fotodetectores están hechos de materiales semiconductores debido a que cumplen muchas de estas características. Los dos tipos de fotodetectores utilizados son los de unión *p-i-n* y los fotodiodos de avalancha (APD). Su estudio detallado se encuentra fuera del alcance y requerimientos de esta tesis y puede ser encontrado en [1,4,5,7] entre otras.

El principio básico de su funcionamiento radica en que un fotón que incide sobre el material semiconductor es absorbido por electrones en la banda de valencia, ocasionando que estos últimos suban a la banda de conducción (efecto fotoeléctrico). Este principio es exactamente el opuesto al de un LED o un LD. Como muestra la Figura 2.2a, electrones en el material se encuentran en la banda de valencia hasta que exista una fuente externa que les proporcione una energía tal que estos puedan subir a la banda de conducción. A diferencia de los LEDs o LD, esta fuente externa es un fotón que al darle su energía al electrón ocasiona que exista un par electrón-hueco. Si se aplica un voltaje externo al semiconductor, estos pares electrón-hueco generan la fotocorriente [1,6].

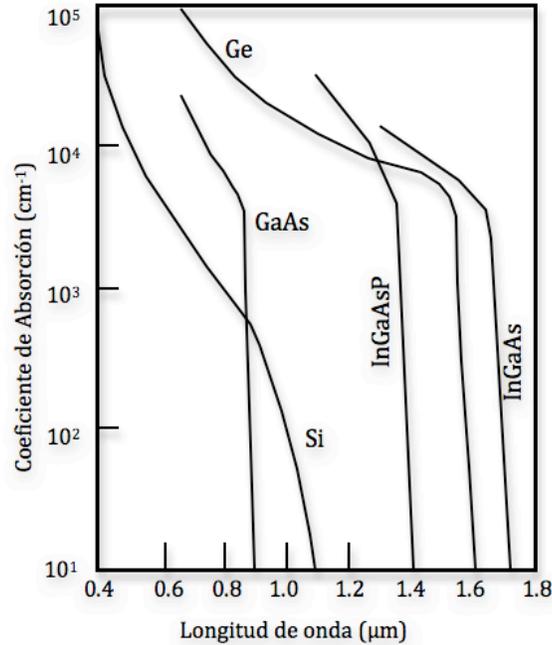


Figura 2.13. Dependencia del coeficiente de absorción con la longitud de onda para Si, Ge, GaAs, InGaAsP e InGaAs.

La radiación óptica que es absorbida en el material semiconductor se basa en la ley exponencial [1]:

$$P(x) = P_0 \left(1 - e^{-\alpha_s(\lambda)x} \right) \quad (2.11)$$

Donde $\alpha_s(\lambda)$ es el coeficiente de absorción a la longitud de onda λ , P_0 es el nivel de potencia óptica incidente y $P(x)$ es la potencia óptica absorbida a una distancia x de la superficie del fotodetector. La Figura 2.13 muestra la dependencia del coeficiente de absorción con la longitud de onda de varios materiales que son comúnmente usados como fotodetectores. La longitud de onda λ_c donde α_s se vuelve cero se llama longitud de onda de corte, y por lo tanto el material puede ser usado como fotodetector solo para $\lambda < \lambda_c$ [1,7].

2.4.1. Eficiencia Cuántica y Sensitividad

Dos características importantes de un fotodetector es su *eficiencia cuántica* y su *sensitividad*. La eficiencia cuántica η es el número de pares electrón-hueco generados por cada fotón incidente con energía $h\nu$ y está dada por:

$$\eta = \frac{\text{número de pares electrón - hueco generados}}{\text{número fotones incidentes}} = \frac{I_p / q}{P_0 / h\nu} \quad (2.12)$$

Donde I_p es el promedio de la fotocorriente generada por el promedio de la potencia óptica incidente en el fotodetector y q es la carga del electrón. Comúnmente el rendimiento del fotodetector se caracteriza por su *responsividad* R que involucra a la eficiencia cuántica de la siguiente manera [1]:

$$R = \frac{I_p}{P_0} = \frac{\eta q}{h\nu} \quad (2.13)$$

Este parámetro es muy importante ya que indica la fotocorriente producida por cada unidad de potencia óptica. Algunos valores típicos para fotodiodos *p-i-n* son 0.65 $\mu\text{A}/\mu\text{W}$ para silicón en 900nm, 0.45 $\mu\text{A}/\mu\text{W}$ para germanio en 1.3 μm y 0.6 $\mu\text{A}/\mu\text{W}$ para InGaAs en 1.3 μm [1].

Por otro lado la *sensitividad* de un fotodetector se define como la mínima potencia óptica que el fotodetector puede detectar para obtener una cierta tasa de bits en error (BER). Por lo que se dice que un receptor tiene mayor sensibilidad si logra tener el mismo rendimiento con menor potencia óptica que incida sobre él. La sensibilidad está determinada básicamente por los ruidos generados en el fotodetector, como son [1,4]:

1. Ruido cuántico o de disparo: que se ocasionan por la naturaleza estadística de producción electrón-hueco.
2. Ruido termal: ocasionado por el movimiento de electrones en el circuito eléctrico del receptor.
3. Corriente oscura: ocasionada a la generación de corriente cuando no existe potencia óptica incidente.

Estos tipos de ruido afectan la relación señal a ruido en el receptor, degradando de esta manera el BER. El BER se define como el número de bits erróneos entre el número de bits totales. En este caso el error existe cuando el receptor toma como 1 a un 0 o viceversa. La probabilidad de tomar un 0 como un 1 esta dada por $P(1/0)$ y la probabilidad de tomar un 1 como un 0 está dada por $P(0/1)$. De esta manera el BER se puede calcular como [7]:

$$BER = 0.5 [P(1/0) + P(0/1)] \quad (2.14)$$

Entonces, supongamos que en el receptor una cierta fotocorriente I es generada por la incidencia de potencia óptica, esta corriente cambia entre valores I_1 cuando se trata de un bit 1 e I_0 para un bit 0. El circuito de decisión compara esta corriente con una corriente de umbral I_{TH} y decide que el bit recibido es un 1 cuando $I > I_{TH}$ o un 0 cuando $I < I_{TH}$. Sin embargo, esta corriente I no solo depende del nivel de potencia de cada bit sino también del ruido termal y del ruido de disparo cuyas características son aproximadamente Gaussianas.

Así, la corriente I también se comporta de una manera Gaussiana. Si σ_1^2 es la varianza correspondiente a un 1 y σ_0^2 la correspondiente para un 0, entonces las probabilidades condicionales están dadas por:

$$P(0/1) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_D} \exp\left(-\frac{(I - I_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) dI = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_1 - I_D}{\sigma_1 \sqrt{2}}\right) \quad (2.15)$$

$$P(1/0) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \int_{I_D}^{\infty} \exp\left(-\frac{(I - I_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) dI = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_D - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}}\right) \quad (2.16)$$

Donde *erfc* es la función de error complementaria. Como se puede observar, ambas probabilidades condicionales dependen de la corriente de umbral I_D y en la practica esta corriente se optimiza con el fin de minimizar el BER. Por lo que la corriente de umbral óptima se puede calcular mediante [6]:

$$I_D = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (2.17)$$

Así entonces, el BER puede ser calculado como [15]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (2.18)$$

Donde el parámetro Q está dado por:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.19)$$

Hoy en día la mayoría de aplicaciones (incluyendo WDM 2.5Gbps y 10Gbps) se diseñan para tener una tasa de error de bits (BER) correspondiente al final de su vida útil mejor que 10^{-12} , lo equivale a un $Q=7$ aproximadamente [19,20].

El cuadro 2.3. muestra las características más comunes para fotodiodos p-i-n y APD para Ge, Si e InGaAs [7].

Cuadro 2.3. Características comunes para fotodiodos p-i-n y APD.

Parámetro	Símbolo	Unidad	p-i-n			APD		
			Si	Ge	InGaAs	Si	Ge	InGaAs
Longitud de onda	λ	μm	0.4 – 1.1	0.8 – 1.8	1.0 – 1.7	0.4 – 1.1	0.8 – 1.8	1.0 – 1.7
Resposibilidad	R	A/W	0.4 – 0.6	0.5 – 0.7	0.6 – 0.9	80 – 130	3 – 30	5 – 20
Ganancia APD	M	-	-	-	-	100 – 500	50 – 200	10 – 40
Eficiencia Cuántica	η	%	75 - 90	50 - 55	60 - 70			
Corriente oscura	I_d	nA	1 - 10	50 - 500	1 - 20	0.1 – 1	50 – 500	1 – 5
Tiempo de subida	T_r	ns	0.5 - 1	0.1 – 0.5	0.02 – 0.5	0.1 – 2	0.5 – 0.8	0.1 – 0.5
Ancho de banda	Δf	GHz	0.3 – 0.6	0.5 - 3	1 - 10	0.2 – 1	0.4 – 0.7	1 – 10
Voltage de bias	V_b	V	50 - 100	6 - 10	5 - 6	200 – 250	20 – 40	20 – 30

2.5. Wavelength Division Multiplexing

En principio, la capacidad de un sistema de comunicaciones óptico puede llegar a sobrepasar los Tbps, esto gracias al gran ancho de banda de la fibra. Sin embargo, en la práctica, las tasas de transmisión comerciales apenas están llegando a los 100 Gbps, debido principalmente a la limitación en velocidad de los componentes electrónicos y por la dependencia de los efectos dispersivos con el bit rate¹². Esto involucra un gran desperdicio en la capacidad

¹² Ver sección 3.1.

de estos sistemas, haciendo que diferentes técnicas de multiplexaje se utilicen para aprovechar al máximo su alta capacidad.

Una tecnología de multiplexación que es bastante usada por los sistemas de transmisión actuales es TDM o Time Division Multiplexing, donde múltiples señales son separadas en pequeños segmentos, los cuales se transmiten intercaladamente. Así, en un instante de tiempo se transmite un segmento de la señal 1, en el siguiente instante de tiempo un segmento de la señal 2 y así sucesivamente. La Figura 2.14 muestra esquemáticamente este proceso [21].

Sin embargo, las tasas de transmisión alcanzadas por este tipo de modulación (Gbps) todavía están muy por debajo de la gran capacidad que ofrece la fibra óptica.

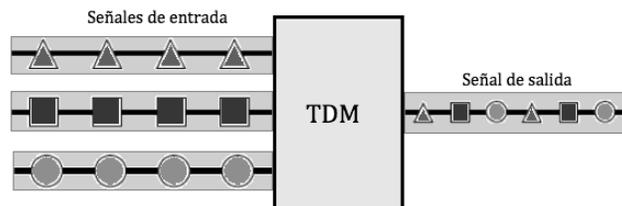


Figura 2.14. Multiplexación por división de tiempo

Por otro lado, Wavelength Division Multiplexing (WDM) es una tecnología que permite multiplexar o combinar múltiples portadoras ópticas en una misma fibra. Estas portadoras se encuentran a diferentes longitudes de onda y son moduladas independientemente con señales de información¹³. Su principio es igual a la multiplexación por división de frecuencia (FDM) utilizada en múltiples sistemas de comunicaciones actuales (radio, televisión, etc.). La Figura 2.15 muestra como WDM hace que una sola fibra parezca como múltiples fibras que llevan información independiente una de otras [6,7].

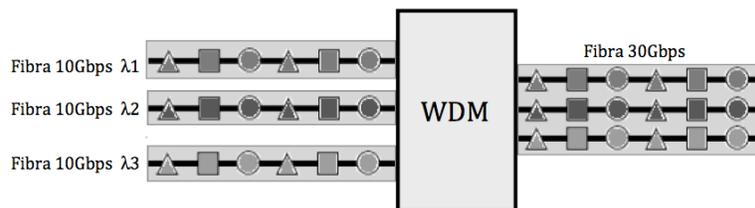


Figura 2.15. Multiplexación por división de longitud de onda.

Los primeros comienzos de WDM, a fines de la década de los 80's, utilizaban dos longitudes de onda ampliamente espaciadas en las regiones de los 1310 nm y 1550 nm (o 850 nm y 1310 nm). A comienzos de los 90's surgió una segunda generación de WDM, en la cual se utilizaban de dos a ocho canales que estaban separados en intervalos de aproximadamente 400 GHz en la ventana de los 1550 nm. A mediados de los 90's, emergieron los sistemas

¹³ Las cuales por lo general son señales TDM.

DWDM con 16 a 40 canales con una separación entre ellos de 100 GHz y 200 GHz. A finales de los 90's, los sistemas DWDM evolucionaron a tal punto que eran capaces de utilizar de 64 a 160 canales, distribuidos a intervalos de 50 GHz y 25 GHz, soportando una capacidad total del sistema de 10 Tbps [21].

Una de las ventajas principales de utilizar WDM es que las señales que viajan a diferentes longitudes de onda (llamadas canales) son independientes entre si y por lo tanto pueden tener diferentes tasas de transmisión, diferentes protocolos y estándares de transmisión (IP, SDH, SONET, etc.)

Hoy en día, empresas como HUAWEI, Padtec, Ericsson, etc., emplean en sus plataformas WDM señales OTN (Optical Transport Network), donde las señales cliente como SDH, SONET ó Ethernet son encapsuladas sobre una trama OTUK para su transmisión por la red. Dicha tecnología se encuentra estandarizada por la UIT-T en sus recomendaciones G.709, G.872 y G.959.1. Gracias a esto, se pueden introducir códigos correctores de errores FEC a las múltiples señales, así como canales de gestión y supervisión de la red de una forma similar a las tramas SDH o SONET.

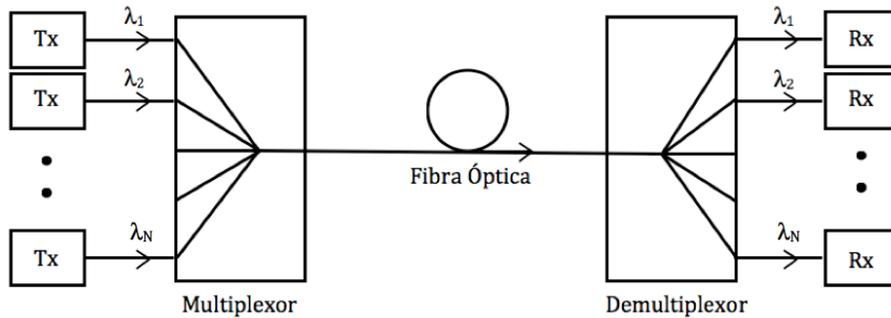


Figura 2.16. Enlace punto a punto con tecnología WDM, donde un número N de longitudes de onda son transmitidas por la misma fibra óptica.

La Figura 2.16 muestra esquemáticamente un enlace WDM punto-a-punto. La salida de varios transmisores, cada uno operando a su propia longitud de onda diferente a la de los demás, son multiplexadas y enviadas a la fibra óptica para su transmisión. En el otro extremo un demultiplexor separa cada una de las señales y las envía a sus correspondientes receptores. Cuando N número de canales a tasas de transmisión B_1, B_2, \dots, B_N son transmitidos simultáneamente sobre la fibra de longitud L , el producto BL total está dado por [7]:

$$BL = (B_1 + B_2 + \dots + B_N)L \quad (2.20)$$

La capacidad de un enlace WDM depende principalmente de que tan cercanos estén los canales unos de otros. Este espaciamiento está limitado por interferencia inter-canal (interchannel crosstalk), la cual se debe a que dispositivos como filtros o demultiplexores seleccionan un canal pero rechazan los otros de manera imperfecta, haciendo que la potencia de un canal interfiera con los canales vecinos [6] y también por efectos no lineales de la fibra¹⁴.

En el tipo de modulación de la fuente utilizado en la mayoría de los sistemas ópticos actuales (NRZ-OOK), usualmente el espaciamiento entre canales, $\Delta\nu_{ch}$, debe ser mayor a $2B$ la tasa de transmisión B . Es común que en sistemas WDM se utilice un parámetro llamado *eficiencia espectral* dado por [7]:

¹⁴ Ver sección 3.3.

$$\eta_s = \frac{B}{\Delta\lambda_{ch}} \quad (2.21)$$

Donde se busca que η_s sea lo más grande posible. Recientemente han aparecido nuevos formatos de modulación avanzados para sistemas de comunicaciones ópticas. Uno de estos formatos es DPSK (differential phase shift keying) el cual mejora las prestaciones de los enlaces de comunicaciones ópticas de larga distancia. Si se compara con el formato OOK (on-off keying), DPSK proporciona una mejora de 3 dB en la sensibilidad del receptor, a la vez que resulta más tolerante a los efectos no lineales, especialmente en la modulación cruzada de fase en sistemas DWDM [28].

Así mismo, el código de línea más utilizado es el NRZ (non return to zero), debido a su fácil implementación y al hecho de que requiere el mínimo ancho de banda comparado con otros códigos como RZ o Manchester. Sin embargo, NRZ presenta gran sensibilidad a la dispersión cromática de la fibra a diferencia de RZ que tiene una mayor tolerancia.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones ha designado el uso de bandas en la región del espectro óptico. El Cuadro 2.4 muestra estas bandas con sus correspondientes intervalos de longitudes de onda, los sistemas WDM por lo general trabajan en las bandas O, E, S, C y L [15].

Cuadro 2.4. Bandas Espectrales Monomodo.

Banda	Descripción	Intervalo [nm]
Banda O	Original	1260 a 1360
Banda E	Ampliada	1360 a 1460
Banda S	Onda Corta	1460 a 1530
Banda C	Convencional	1530 a 1565
Banda L	Onda Larga	1565 a 1625
Banda U	Onda ultralarga	1625 a 1675

De igual forma la UIT-T en sus recomendaciones G.694.1 y G.694.2 ha especificado dos tipos de WDM, los cuales se caracterizan por el espaciamiento entre canales: Dense WDM (DWDM) y Coarse WDM (CWDM). DWDM utiliza las bandas C y L mientras que CWDM utiliza las bandas O, E, S, C y L.

Si se observa la Figura 2.11, se podrá observar que la banda E sufre del fenómeno de atenuación por picos OH. En fibras ópticas que presentan esta característica es imposible utilizar esta banda, haciendo que el número de canales máximos disminuya considerablemente.

2.5.1. Coarse Wavelength Division Multiplexing CWDM

CWDM es un tipo de WDM que se caracteriza principalmente por el espaciamiento entre canales relativamente grande, siendo éste de unos 20 nm. Este gran espaciamiento hace que la tecnología CWDM se beneficie de un menor coste en los componentes ópticos asociados. Esto se debe principalmente a que componentes como filtros, láseres, receptores, multiplexores, demultiplexores, etc., no deban de ser tan precisos en el momento de emitir, seleccionar o recibir una longitud de onda. Esto hace que sea una tecnología menos compleja que, aunque

limitada en capacidad y distancia, se adapte perfectamente a las necesidades de redes empresariales y metropolitanas de corta distancia [22,23].

Los principales beneficios de CWDM sobre DWDM son los siguientes [21,23]:

- *Mayor espaciamiento de longitudes de onda.* De esta forma se pueden utilizar láseres con un mayor ancho espectral y sin estabilización en frecuencia. Utilizar filtros ópticos, multiplexores y demultiplexores de banda ancha.
- *Mayor espectro óptico.* Esto permite que el número de canales susceptibles de ser utilizados no se vea radicalmente disminuido a pesar de aumentar la separación entre ellos, esto es posible ya que en CWDM no se utilizan amplificadores EDFA los cuales solo trabajan sobre la banda S y L.
- *Menor susceptibilidad a efectos no lineales.* Debido al menor número de canales y a la gran separación entre éstos.

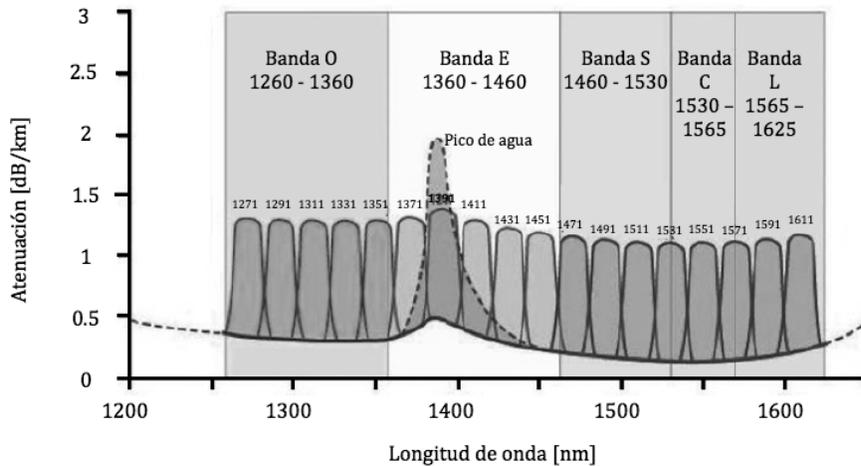


Figura 2.17. Canales CWDM según UIT-T G.692.2 sobre las bandas O, E, S, C y L.

La Figura 2.17. muestra como CWDM puede transportar hasta 18 canales en el intervalo de 1271 a 1611 nm, dependiendo del tipo de fibra a utilizar. Como se ha visto, hoy en día existen fibras ópticas que no poseen pico OH (picos de agua) en la banda E. Diferentes empresas realizan este tipo de fibras para estándares G.652 y G.655 de la UIT-T y por lo general se les llama fibras de espectro completo [22,24].

El Cuadro 2.5 muestra el plan de longitudes de onda especificado por la UIT-T en su Recomendación G.694.2.

Cuadro 2.5. Longitudes de onda centrales nominales CWDM.

Longitudes de ondas centrales nominales (nm) para un espaciamiento de 20 nm					
1271	1331	1391	1451	1511	1571
1291	1351	1411	1471	1531	1591
1311	1371	1431	1491	1551	1611

2.5.2. Dense Wavelength Division Multiplexing DWDM

La tecnología DWDM se caracteriza por un espaciamiento de canal menor que el de la tecnología CWDM. En general, los transmisores utilizados en las aplicaciones DWDM requieren un mecanismo de control que les permita cumplir con los requisitos de estabilidad de frecuencia, contrario a lo que ocurre con los transmisores CWDM que no lo necesitan. DWDM soporta diversos espaciamientos de canal que abarcan desde 12,5 GHz hasta 100 GHz y espaciamientos mayores (múltiplos enteros de 100 GHz). Aquí cabe resaltar que 100 GHz equivalen a 0.8 nm en los 1550 nm, esto quiere decir que si utilizamos espaciamientos de 12.5 GHz en términos de longitud de onda equivaldría a 0.1 nm, mucho menor que los 20 nm utilizados por CWDM [25].

Con un espaciamiento de 50 GHz o 0.4 nm cabrían tan solo en la banda C poco más de 80 canales en comparación con los 2 canales de CWDM. Como se puede observar, DWDM incrementa de manera abrupta la capacidad del sistema. Sin embargo, al ser una tecnología más compleja y con mayor número de requerimientos, se deben de tomar en cuenta un mayor número de consideraciones para su implementación.

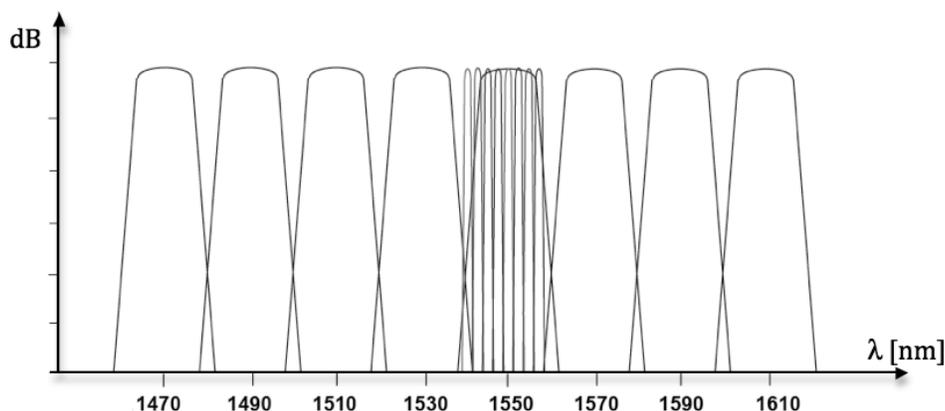


Figura 2.18. Comparación entre CWDM (espaciamiento de 20 nm) y DWDM (espaciamiento de 1.6 nm).

El Cuadro 2.6. muestra el plan de longitudes onda de acuerdo a la Recomendación G.694.1 de la UIT-T para DWDM con un espaciamiento entre canales de 100 GHz (0.8 nm) [25].

Cuadro 2.6. Frecuencias centrales nominales para DWDM con espaciamiento de 100 GHz.

Frecuencia central nominal [THz]	Longitud de onda aproximada [nm].	Frecuencia central nominal [THz]	Longitud de onda aproximada [nm].
196.1	1528.77	193.6	1548.51
196.0	1529.55	193.5	1549.32
195.9	1530.33	193.4	1550.12
195.8	1531.12	193.3	1550.92
195.7	1531.90	193.2	1551.72
195.6	1532.68	193.1	1552.52
195.5	1533.47	193.0	1553.33
195.4	1534.25	192.9	1554.13
195.3	1535.04	192.8	1554.94

195.2	1535.82	192.7	1555.75
195.1	1536.61	192.6	1556.55
195.0	1537.40	192.5	1557.36
194.9	1538.19	192.4	1558.17
194.8	1538.98	192.3	1558.98
194.7	1539.77	192.2	1559.79
194.6	1540.56	192.1	1560.61
194.5	1541.35	192.0	1561.42
194.4	1542.14	191.9	1562.23
194.3	1542.94	191.8	1563.05
194.2	1543.73	191.7	1563.86
194.1	1544.53	191.6	1564.68
194.0	1545.32	191.5	1565.50
193.9	1546.12	191.4	1566.31
193.8	1546.92	191.3	1567.13
193.7	1547.72	191.2	1567.95

Algunas de las ventajas de la utilización de DWDM son las siguientes:

- Máxima capacidad del sistema disponible.
- Transmisión a mayores distancias gracias a que DWDM trabaja en la ventana principal de los EDFAs.
- Reducción en el número de repetidores del enlace.
- Transparencia a tasas de transmisión y tipo de señales.
- Escalabilidad, debido a que el sistema puede crecer de manera dinámica.

2.6. Elementos de un sistema WDM

Los sistemas WDM requieren de componentes ópticos y fotónicos que realicen las funciones equivalentes de los componentes eléctricos en enlaces eléctricos. Estos componentes se basan en la interacción luz-materia y en las propiedades de propagación de la luz sobre un medio para realizar dichas funciones [9]. A continuación se presentan los elementos básicos que conforman un enlace WDM, cabe resaltar que existen diferentes maneras y tecnologías de implementar cada uno de estos dispositivos, estando éstas fuera del alcance de esta tesis. Dichos elementos son:

2.6.1. Multiplexores y Demultiplexores

Los multiplexores y demultiplexores son los dispositivos esenciales de la tecnología WDM, los multiplexores tienen la función de unir todas las señales provenientes de varios transmisores a diferentes longitudes de onda en una sola señal que viaje por la fibra. En contra parte, en la etapa de recepción, los demultiplexores tienen la tarea de separar cada uno de los canales y enviarlos a los receptores correspondientes.

Hoy en día existen diferentes tecnologías capaces de realizar estas operaciones. Dos de estas tecnologías que son

mas comúnmente utilizadas son: filtros de películas delgadas o TFF y arreglos de rejillas ó AWG.

En primer lugar, los filtros TFF son una tecnología que se basa en el fenómeno de interferometría, donde una serie de capas intercaladas¹⁵ de alto y bajo índice de refracción, que forman una cavidad Fabry- Perot o pila reflexiva (Fig. 2.19), ocasionan que ciertas longitudes de onda sean transmitidas y otras reflejadas. De esta manera, la pila reflexiva actúa como un filtro donde la longitud de onda central del canal WDM deseado (λ_c) es transmitida y aquellas diferentes son rechazadas. En un demultiplexor las longitudes de onda rechazadas entran a otra pila reflexiva sintonizada a otro canal WDM donde este canal se extrae y se rechazan los demás. Este proceso se repite hasta que la totalidad de los canales WDM hayan sido demultiplexados [34].

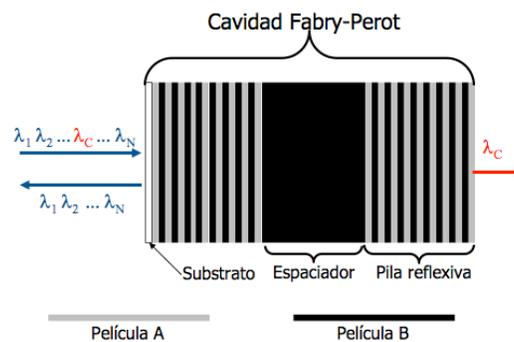


Figura 2.19. Resonador Fabry Perot que actúa como un filtro óptico. (Referencia [34];© 2005 Series del Instituto de Ingeniería UNAM; impreso con permiso).

En segundo lugar, los filtros AWG están compuestos por un arreglo de segmentos de fibra de diferente longitud, las cuales difieren de las adyacentes por una longitud fija ΔL . Estos segmentos de fibra se encuentran unidos mediante un acoplador direccional en ambos extremos. Cuando se hace incidir un haz de luz sobre uno de los acopladores, éste se transmite por todos los segmentos de fibra, pero al recorrer caminos ópticos diferentes se produce un patrón de interferencia en el acoplador contrario. Este patrón tiene la particularidad de que cada una de las longitudes de onda WDM ilumina una fibra de salida diferente, pudiendo así demultiplexar los canales [34].

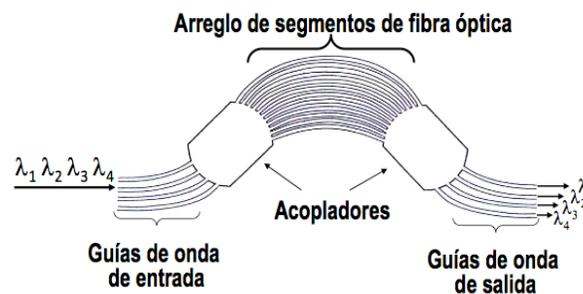


Figura 2.20. Filtro de arreglos de rejillas o AWG. (Referencia [34];© 2005 Series del Instituto de Ingeniería UNAM; impreso con permiso).

¹⁵ De periodicidad $\lambda_c/4$, donde λ_c es la longitud de onda central del canal WDM.

2.6.2. Amplificadores Ópticos

Estos dispositivos, como su nombre lo indica, tienen la función de amplificar las señales que viajan por la fibra con el fin de contrarrestar los efectos de atenuación. Los dos tipos de amplificadores ópticos que son utilizados comúnmente en sistemas WDM son: los EDFAs y los Raman.

En primer lugar, los amplificadores tipo EDFA o *Erbium Doped Fiber Amplifier* son un tipo de amplificadores que utilizan una región de fibra dopada con erbio, la cual es bombeada mediante un láser a una longitud de onda de 980 nm o 1480 nm. Este bombeo, actúa como un campo externo que lleva a los electrones libres en el material a un estado de energía más alto. Una vez que los electrones se encuentran excitados gracias al bombeo, la señal óptica a amplificar pasa por esta sección de fibra y se amplifica gracias al proceso conocido como *emisión estimulada*, mismo que es descrito en la sección 2.2. La ventaja principal de este tipo de amplificadores radica en su gran ancho de banda de amplificación, el cual se encuentra en la banda C de 1530-1565 nm, siendo perfecto para sistemas DWDM [8].

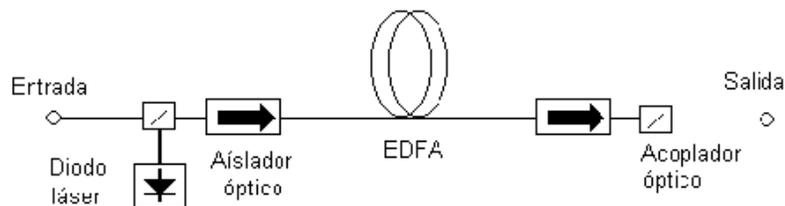


Figura. 2.21. Esquema de un amplificador óptico tipo EDFA.

Por otro lado, los amplificadores tipo Raman se basan en el efecto no lineal de Esparcimiento Estimulado de Raman (SRS) descrito en la Sección 2.3.4. A diferencia de los EDFAs, los amplificadores Raman utilizan la propia fibra de transmisión como medio de amplificación. Una o varias señales de bombeo de alta potencia (500 mW) transfieren parte de su energía hacia longitudes de onda más pequeñas, donde se localizan las señales WDM a amplificar.

Comparado con un EDFA, la utilización de amplificadores Raman produce una mejor distribución de potencia a lo largo de la fibra óptica, reduciendo así los efectos no lineales. Su principal desventaja radica en la gran cantidad de potencia que requiere para operar, sin embargo, son dispositivos más flexibles que presentan una menor figura de ruido (<3 dB) y por lo tanto, son utilizados ampliamente en enlaces de ultra-larga distancia [36].

2.6.3. Optical Add/Drop Multiplexers

Los OADMs u *Optical Add Drop Multiplexers* son dispositivos que permiten añadir o extraer ciertos canales del enlace WDM y redireccionarlos hacia otra terminal o incluso otro enlace. Estos dispositivos son bastante útiles y ampliamente utilizados en redes ópticas debido a que permiten tener una mayor flexibilidad en el enlace y construir, a partir de ellos, topologías de red más complejas de una forma sencilla y costeable.

Un OADM está conformado básicamente por un multiplexor y un demultiplexor los cuales se encuentran sintonizados para extraer o añadir ciertos canales del enlace, o pueden ser reconfigurables dándole la

posibilidad a los administradores de la red de seleccionar canales a bajar o subir de una manera dinámica.

Estos dispositivos por lo general son ampliamente usados en redes de área extensa WANs o en redes metropolitanas MANs, en donde es necesario extraer o añadir un canal de o a la fibra óptica. Así en una fibra por donde viajan $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_N$ se puede extraer o añadir una λ específica y mandarse a un cierto sitio, mientras que las otras longitudes de onda continúan su camino [7,26].

2.6.4. ITU-T G.698.1 “Multichannel DWDM applications with single-channel optical interfaces”

La Unión Internacional de Telecomunicaciones en su recomendación G698.1 [14], establece los parámetros necesarios para la implantación de sistemas DWDM con el fin de garantizar su correcto rendimiento, tratando de contrarrestar los efectos que degradan a la señal como dispersión, atenuación y efectos no-lineales estudiados con anterioridad. De esta manera, se establecen las potencias máximas y mínimas de transmisión, tipos de fibra a utilizar, atenuación máxima del enlace, dispersión máxima permitida, etc.

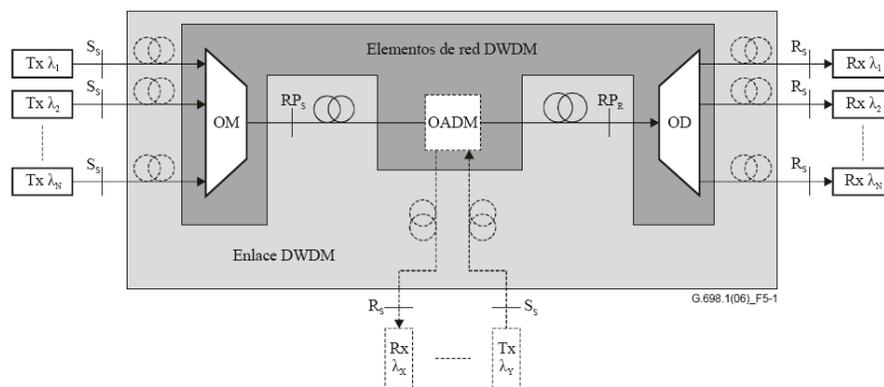


Figura 2.22. Método "enlace negro" lineal.

La Figura 2.22 muestra el conjunto de puntos de referencia, para el método "enlace negro" lineal, para una conexión entre transmisores (Tx) y receptores (Rx). Los puntos de referencia donde se especifican los diferentes parámetros se encuentran propiamente a la salida del transmisor (S_s) y a la entrada del receptor (R_s).

Los parámetros del trayecto óptico incluyen a los MUX, DEMUX, OADMs y a la propia fibra óptica. Por lo que se pueden incluir más OADMs siempre y cuando se mantenga dentro de los rangos que se especifican en el trayecto óptico.

A continuación se presenta el cuadro 2.7 donde se especifican los parámetros para aplicaciones DWDM de larga distancia con separación entre canales de 100 GHz y velocidades de transmisión de 2.5 Gbps y 10 Gbps. Todos estos parámetros también aplican para sistemas en anillo.

Cuadro 2.7. Parámetros y valores de capa física para aplicaciones de larga distancia con una separación de 100 GHz, de la clase NRZ 2,5G y NRZ 10G.

Parámetro	Unidades	Valor NRZ 2,5G	Valor NRZ 10G
Información general			
Separación mínima entre canales	GHz	100	100
Velocidad binaria/codificación de línea de señales ópticas	–	NRZ 2.5G	NRZ 10G
Tasa de errores en los bits máxima	–	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Tipo de fibra	–	G.652, G.653, G.655	G.652, G.653, G.655
Interfaz en el punto SS			
Potencia media de salida de canal máxima	dBm	+4	+6
Potencia media de salida de canal mínima	dBm	0	+3
Frecuencia central mínima	THz	191.5 para (C) para (L)	191.5 para (C) 186.0 para (L)
Frecuencia central máxima	THz	196.2 para (C) 191.5 para (L)	196.2 para (C) 191.5 para (L)
Desviación espectral máxima	GHz	±12.5	±12.5
Relación de supresión mínima en modo lateral	dB	30	30
Relación de extinción de canal mínima	dB	8.2	9
Plantilla del diagrama en ojo	–	NRZ 2.5G de acuerdo a G.959.1	NRZ 10G de acuerdo a G.959.1
Trayecto óptico del punto SS al RS,			
Pérdida de inserción de canal máxima	dB	25.5	24.5
Pérdida de inserción de canal mínima	dB	13	13
Dispersión cromática máxima	ps/nm	1400 (Nota)	1600
Retardo diferencial de grupo máximo	ps	120	30
Crosstalk intercanal máximo	dB	-16	-16
Interfaz en el punto RS			
Potencia media de entrada de canal máxima	dBm	-9	-7
Sensibilidad del receptor mínima	dBm	-28	-24
Penalización máxima del trayecto óptico	dB	2.5	2.5
NOTA – En los casos en que la máxima velocidad binaria está limitada a 2,488 Gbit/s (STM-16), se aplica una dispersión cromática máxima de 1600 ps/nm.			

Referencias

- [1] Gerd Keiser, *Optical Fiber Communications*, Ed. McGraw-Hill, Second Edition,
- [2] ITU-T, *Guide on the use of the ITU-T Recommendations related to optical technology*, ITU-T Supplement 42 Serie G, February 2008.
- [3] IMC Networks, *Calculating Fiber Loss and Distances*, Document # 94-94717 November 2001.
- [4] Djafar K. Mynbaev, Lowell L. Scheiner, *Fiber-Optic Communications Technology*, Ed. Prentice Hall 2001
- [5] Joseph C. Palais, *Fiber Optic Communications*, Ed. Prentice Hall, Third Edition.
- [6] Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, *Optical Networks*, Ed. Kaufman, Second Edition.
- [7] Gouvind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, Ed. Wiley-Interscience, Third Edition.
- [8] Gutiérrez Castrejón, R., *Apuntes del curso: Redes opticas y de microondas*, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2009.
- [9] SEEFIRE, *Optical Fibers Basics*, www.seefire.org/.../SEEFIRE-WP4-Technical%20Workshop%20Sofia%20-%20National%20landscape%20FYROM-a-20050713.ppt
- [10] ITU-T, *Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable*, ITU-T Recommendation G654, December 2006
- [11] Álvaro Medina, *Fundamentos de Comunicaciones Ópticas: Panorama Actual de las Redes de Tx Óptica*, Universidad Autónoma de Madrid, http://www.uam.es/otros/masterfotonica/Documentacion/SegundoSemestre/ComunicacionesOpticas/Comunicaciones_AlvaroMedina.pdf
- [12] Grupo de Comunicaciones Ópticas, Universidad de Valladolid, *Efectos No Lineales*, http://pesquera.tel.uva.es/tutorial/Tema_I/No_lineal/No_lineal.html
- [13] Grupo de Tecnologías de las Comunicaciones, Universidad de Zaragoza, *Fenómenos no Lineales en Fibras Ópticas*, http://diec.unizar.es/asignaturas/defaultWebs/11958/2_6_No_lineales.pdf
- [14] ITU-T, *Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable*, ITU-T Recommendation G.655, March 2006.
- [15] ITU-T, *Optical system design and engineering considerations*, ITU-T Supplement 39, February 2006.
- [16] Dr. Lorenzo Pavesi, *Introduction to Silicon Photonics*, Escuela en Ciencia e Ingeniería de Materiales 2009, UNAM
- [17] Quevedo, R. I. y Miguel S. López. *Principios de Teoría de las comunicaciones*. IPN, 1998.
- [18] Dr. Andrew G. Kirk, *Integrated and micro-optics*, Escuela en Ciencia e Ingeniería de Materiales 2009, UNAM
- [19] ITU-T, *Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications,* December 2006.
- [20] ITU-T Recommendation G.698.1, *"Multichannel DWDM applications with single channel optical interfaces*, ITU-T Recommendation G.695, December 2006.

- [21] Cisco Systems, *Introduction to DWDM for Metropolitan Networks*, Cisco Systems, Corporate Headquarters, 2000
- [22] ITU-T, *Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*, ITU-T Recommendation G.694.2 December 2002
- [23] Ramón Jesús Millán Tejedor y Ericsson España, *CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)*, <http://www.coit.es/publicaciones/bit/bit158/60-62.pdf>
- [24] Fibra AllWave, *OFS*, <http://www.converttech.com.ar/pdfs/AllWaveMonomodo.pdf>
- [25] ITU-T, *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*, ITU-T Recommendation G.694.1, June 2002.
- [26] Stamatios V. Kartalopoulos, *DWDM Networks, Devices and Technology*, IEEE Press, Ed. Wiley-Interscience 2003
- [27] Fujitsu, *DWDM Prerequisite Training*, Fujitsu, November 2002
- [28] Dr. Francisco Ramos Pascua, *Moduladores Ópticos Dpsk*, Universidad Politécnica de Valencia, <http://www.conectronica.com/redes-opticas/moduladores-opticos-dpsk>
- [29] Lightwave, *Nortel unveils commercially available 100G optical system*, Lightwave Newsletter, PennWell Corporation, December 14, 2009.
- [30] Padtec, *LightPad i1600G Sistema de Transmisión Multiservicio DWDM 160 canales*, Manual Técnico.
- [31] Mitsubishi Electric, *InGaAsP DFB-Laser diode with EA modulator*, Technical Data Sheet ML9XX41 SERIES, 2006.
- [32] JDSU, *10 Gb/s Dual Drive Mach-Zehnder (DDMZ) Modulator*, Technical Data Sheet, 2007.
- [33] Dr. Sergei Khotiaintsev, *Apuntes de clase Comunicaciones Ópticas*, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2009.
- [34] Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón, *Hacia un sistema de comunicaciones totalmente óptico*. Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, Mayo 2005.
- [35] X.X. Zhang, "Thin film optical filter – an enabling technology for modern optical communication systems", SPIE, October 2004.
- [36] Yang Mingzhang, *Basic knowledge about WDM principle*, Optical Network Technical Service Dept. HUAWEI, Internal Document, 2010