

**IMPACTO DEL FENOMENO DE NO LINEALIDAD FWM EN UN ENLACE
OPTICO WDM TENIENDO EN CUENTA FIBRA DISPERSIVA**

MANUEL JOSE VENGOECHEA MENDOZA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRICA Y ELECTRONICA

MEDELLÍN

2013

**IMPACTO DEL FENOMENO DE NO LINEALIDAD FWM EN UN ENLACE
OPTICO WDM TENIENDO EN CUENTA FIBRA DISPERSIVA**

MANUEL JOSE VENGOECHEA MENDOZA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

WILLIAM SEGUNDO PUCHE PLAZA

Ingeniero Electrónico, Magister en Ingeniería

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRICA Y ELECTRONICA

MEDELLÍN

2013

Nota de aceptación

Firma Presidente del Jurado

Firma de Jurado

Firma de Jurado

Medellín, Mayo 3 de 2013

DEDICATORIA

Es un compendio de múltiples alegrías las que hoy quiero compartir:

En primer lugar doy infinitamente gracias a Dios, por haberme dado fuerza y valor para culminar esta etapa de mi vida.

A mi madre y mi padre, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por creer en mí, por la confianza y por brindarme siempre su apoyo incondicional para superar obstáculos y dificultades todo este tiempo. Mamá gracias por tus consejos, siempre me enseñaste a no desfallecer ni rendirme, y a perseverar asiduamente en mis propósitos.

A mi hermano una de las personas más importantes en mi vida, gracias por ser mi gran amigo, por estar siempre conmigo a pesar de la distancia, y sé que este logro es tan especial para ti como lo es para mí.

A mi novia, familiares, profesores y amigos, agradecimientos por acompañarme en momentos que perdurarán en mi memoria, además quiero hacer mención a todos y cada unas de las personas, que de una u otras formas y maneras permitieron con su participación e intención marcadas; la consecución de éste mi mayor anhelo y logro de vicisitudes, impases superados con la participación activa de Dios Nuestro Padre Redentor.

Siempre pensé con modestia culminar para satisfacción propia y de mis seres queridos amigos y conocidos, queriendo también realizar un aporte a La Universidad Pontificia Bolivariana, y demás estamentos Administrativos; a nuestra Comunidad Universitaria y Sociedad en general; siendo a través de éste medio vinculación al proceso de Desarrollo Tecnológico en las Telecomunicaciones.

Sólo me resta expresar un mensaje con cálido interés AL TODOPODEROSO:
"NOS CONCEDA LO QUE NOS MERECEMOS Y NO SABEMOS PEDIRLE".

AGRADECIMIENTOS

Es mi deseo participar a mi director William Segundo Puche Plaza, Magister en Ingeniería y estudiante de Doctorado en ingeniería Área Telecomunicaciones, mi admiración y mis más sinceros agradecimientos por sus aportes innumerables, que sin ellos no hubiese sido posible éste cometido.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Pérdidas por usuario en una red Óptica	75
Tabla 2 Datos usados en la simulación del enlace de fibra	79
Tabla 3 Relación longitud de onda Vs potencia	83
Tabla 4 Resultados de la señal eléctrica	87
Tabla 5 Resultados Señal Óptica	90
Tabla 6 Resultados de la señal eléctrica	94
Tabla 7 Resultados Señal Óptica	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Distribución de una red óptica de acceso básica de fibra.	38
Figura 2 Evolución de la capa Óptica.....	31
Figura 3 Arquitectura de la red Óptica.	33
Figura 4 Anillo de Fibra con diferentes conexiones..	34
Figura 5 Anillo de Fibra Dual.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 6 Transconductor Óptico.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 7 Funciones de un Transconectores Óptico¡Error!	Marcador no definido.
Figura 8 Arquitecturas de red FTTx.....	48
Figura 9 Acoplador direccional.....	49
Figura 10 Divisores de señal o splitters.....	73
Figura 11 Ejemplo de varios Acopladores Ópticos¡Error!	Marcador no definido.
Figura 12 Procesos de la reflexión interna en la fibra óptica.....	76
Figura 13 Diagrama de bloques de un sistema de transmisión empleando fibra	78
Figura 14 Partes que compone la fibra.	48
Figura 15 Transmisor y Receptor Óptico.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 16 Fenómeno de flexión de las fibras ópticas	49
Figura 17 Configuración de índice de refracción trinchera.¡Error!	Marcador no definido.
Figura 18 Distancias máxima de un enlace para distintos tipos de fibra óptica a distintas longitudes de onda.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 19 Perfiles de índice de refracción	53
Figura 20 Mach-Zender	55
Figura 21 Aislador óptico	56
Figura 22 Modelo de amplificador Óptico.....	57

Figura 23 Representación del coeficiente de ganancia de Raman en una fibra de silicio en función de la longitud de onda.....	69
Figura 24 Diagrama de bloques de un dispositivo OPC basado en FWM en una configuración DSF.....	72
Figura 25 Enlace de red Óptica.....	75
Figura 26 prueba de enlace para tres longitudes de onda.....	77
Figura 27 Enlace real con 32 canales.....	78
Figura 28 Componentes del OLT empleados en el enlace óptico.	79
Figura 29 Componentes para el receptor del enlace	80
Figura 30 Simulación espectro, entrada y salida de potencia	81
Figura 31 Graficas resultado de simulación para 10 Gbps.	82
Figura 32 Diagrama de ojo para 20 Km y 200Km	82
Figura 33 Diagrama de ojo para 20 Km y 200Km.	84
Figura 34 Simulación en pasos del efecto FWM, Potencia Vs Longitud de onda.....	85
Figura 35 Curvas Factor Q, SNR, BER Vs Distancia para 10 Gbps.	88
Figura 36 Graficas resultado de simulación Óptica para 10 Gbps	90
Figura 37 Graficas resultado de simulación para 2.5 Gbps	93
Figura 38 Resultados de la señal eléctrica	94
Figura 39 Curvas Factor Q, SNR, BER Vs Distancia para 2,5 Gbps	95
Figura 40 Graficas resultado de simulación Óptica para 2.5 Gbps	96
Figura 41 Curva OSNR Vs Distancia para 2,5 Gbps y 10 Gbps	97

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Anteproyecto

Anexo 2 Artículo

CONTENIDO

GLOSARIO	13
RESUMEN	18
INTRODUCCIÓN	19
1. REDES OPTICAS	22
1.1. Historia de las Redes Ópticas.....	23
1.2. Arquitectura de una red Óptica.....	31
1.2.1 Conexión entre anills	34
1.2.2. Capa Óptica	36
1.2.3. Equipos utilizados en las Redes Ópticas	36
1.3. Red de Acceso Óptica.....	38
1.4. Limitaciones de las Redes Ópticas	40
2. ANALISIS DE DISPOSITIVOS OPTICOS	41
2.1. Elementos activos.....	41
2.2. Elementos pasivos.....	31
2.3 Acopladores direccionales.....	42
2.4 Divisores o splitters	42
2.5 Acopladores.....	43
2.6 Cables.....	44
2.6.1 Cables flexibles	45
2.6.2 Cables semiflexibles	45
2.6.3 Fibra óptica.....	45

2.6.3.1 Fibra monomodo	50
2.6.3.2 Fibra multimodo	51
2.6.3.3 Fibra monomodo o estandar	51
2.6.3.4 Fibra DSF (Dispersion Shifted Fiber).....	51
2.6.3.5 Fibra NZDSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber).	53
2.6.3.6 Fibras ópticas de índice en escalón o de salto de índice.	53
2.6.3.7 Fibras ópticas de índice gradual	53
2.6.4 Acopladores Ópticos	55
2.6.5 Interferómetro de Mach-Zender.....	55
2.6.6 Aislador Óptico.....	56
2.6.7 Filtros Ópticos	57
2.6.8 Detector Óptico	58
2.6.9 Transmisor Óptico	58
2.6.10 Amplificador Optico	60
3. 3.EFECTO NO LINEAL FOUR-WAVE MIXING O MEZCLADO DE CUARTA ONDA (FWM) EN LA RED OPTICA	61
3.1. Scattering Estimulado de Efecto Raman (FWM).....	67
3.2. Análisis del (FWM) en la fibra.	70
4. ANALISIS Y RESULTADOS.....	73
4.1. Modelo Físico de la Simulación.....	74
4.2. Simulación del Transmisor	77

4.3. Resultados de simulación para una tasa de transmisión de 10 Gbps con fibra de 20 km hasta 200 km	80
4.4. Resultados de simulación para una tasa de transmisión de 2.5 Gbps con fibra de 20 km hasta 200 km	92
5. CONCLUSIONES	95
6. BIBLIOGRAFÍA	99

GLOSARIO

- **ACOPLADORES ÓPTICOS:** componentes pasivos utilizados para dividir la potencia óptica para distribución a los nodos receptores.
- **AMPLIFICADOR:** dispositivo utilizado para aumentar el nivel operativo de una señal de entrada.
- **ATENUACIÓN:** diferencia entre la potencia transmitida y la potencia recibida debido a la pérdida en los medios de transmisión. Expresada en decibeles.
- **BANDA ANCHA:** un término general usado para describir los sistemas o equipos de banda ancha que pueden transportar una gran proporción del espectro electromagnético. Un sistema de comunicaciones de banda ancha puede acomodar todas las emisiones por aire y muchos otros servicios.
- **BER: (Bit Error Rate). Tasa de Error por Bit.** La proporción de bits que están en error (respecto a una cantidad específica de bits recibidos); usualmente expresado cómo un número referido a una potencia de 10; p.ej., 1 error en 10⁵ bits, también puede expresarse cómo un BER de 10⁻⁵.
- **CODIFICACIÓN:** interferir con una señal electrónica o reorganizarla de tal manera que solamente los suscriptores autorizados puedan descodificarla para recibir el mensaje o la señal original.
- **COMUNICACIÓN:** es un comportamiento mediante el cual el emisor busca despertar una reacción a través de un mensaje dirigido a un receptor.
- **dB (DECIBEL):** unidad que expresa la razón de dos niveles de potencia en una escala logarítmica.
- **DECODIFICACIÓN:** traducción de una señal codificada para recuperar el mensaje o la señal original.
- **DISPOSITIVO PASIVO:** cualquier circuito o red que no usa dispositivos activos cómo transistores o integrados; circuito que no necesita de

alimentación para su funcionamiento. Ej.: taps, acopladores direccionales, splitters.

- **DISTORSIÓN:** cambio indeseable en la forma de onda de una señal dentro de un medio de transmisión.
- **DIVISOR:** dispositivo pasivo que distribuye una señal de televisión transportada por cable en dos o más trayectorias y la envía simultáneamente a un número de receptores.
- **FIBRA OPTICA:** tipo de cable utilizado para la transmisión de información por técnicas optoelectrónicas. Se caracteriza por un elevado ancho de banda y por tanto, una alta velocidad de transmisión, y poca pérdida de señal.
- **FRECUENCIA:** el número de veces por segundo que se repite una señal alterna. Se mide en Hertz (Hz) o ciclos por segundo. Un Hz equivale a un ciclo por segundo, un KHz (Kilohertz) son mil ciclos por segundo; un MHz (Megahertz) es un millón de ciclos por segundo; un GHz (Gigahertz) es un billón de ciclos por segundo.
- **FWM: (Four Wavelength mixed).** Es un fenómeno por el cual cuando se propagan varias ondas a frecuencias $w_1, w_2...w_n$, donde la dependencia con la intensidad del índice de refracción no sólo induce a desplazamientos de fase dentro de cada canal sino también a la aparición de nuevas ondas a frecuencias $w_i \pm w_j \pm w_k$
- **HFC: (Hybrid Fiber Coaxial).** Red híbrida compuesta por cable coaxial y fibra óptica que se utiliza para transmitir señales de banda ancha, más económica que una de sola fibra.
- **Hz (Hertz):** unidad de frecuencia equivalente a un ciclo por segundo.
- **MHz (Megahertz):** un millón de ciclos por segundo.
- **MODULACIÓN:** en general, la modulación es el proceso por el cual una propiedad o un parámetro de cualquier señal se hace variar en forma proporcional a una segunda señal. El tipo de dependencia se determina con la forma de modulación empleada. En la modulación de amplitud, se hace variar la amplitud de una señal senoidal, con frecuencia y fase fijas, en

proporción a una señal dada. Esto altera la señal, trasladando sus componentes de frecuencia a frecuencias más altas.

- **RECEPTOR:** es la llegada de una sesión de comunicación.
- **RELACIÓN SEÑAL/RUIDO:** medición que determina la diferencia entre la potencia pico de la señal portadora de video modulada y la potencia promedio del ruido de fondo en el sistema de cable, medido en un ancho de banda de 4 Mhz. Se expresa en dB.
- **RENDIMIENTO DE LA RED:** la medición de los niveles de ruido, triple batido compuesto y modulación cruzada en el extremo de la red, indicados en db.
- **SIMULACIÓN:** representación del funcionamiento de un sistema por otro. Por ejemplo, la representación de un sistema físico por un modelo matemático.
- **TRANSMISIÓN DE VIDEO:** la señal original de video antes de ser modulada y convertida en radio frecuencia para ser transmitida por aire o por cable. El televisor en el hogar reconvierte la señal RF en una señal de video.
- **TRANSMISIÓN:** envío de información (señales) de un punto a otro.
- **TRANSMISOR:** es el origen de una sesión de comunicación.
- **USUARIO:** en telecomunicaciones un usuario es la persona, organización u otra entidad que depende de los servicios de un computador o sistema computacional para obtener un resultado deseado.
- **BER (Bit Error Rate):** Es el porcentaje de bits que tienen errores en relación con el número total de bits recibidos en una transmisión, generalmente se expresa como diez a una potencia negativa.
- **Calidad de Servicio (QoS):** Es definida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) como el efecto global de la calidad de funcionamiento de un servicio que determina el grado de satisfacción de un usuario de dicho servicio.

- **Conmutación:** es la conexión que realizan los diferentes nodos que existen en distintos lugares y distancias para lograr un camino apropiado para conectar dos usuarios de una red de telecomunicaciones.
- **Divisor óptico:** Se suelen emplear en redes de distribución/contribución de video o de datos y en redes PON. Sin necesitar emplear elementos electrónicos, de ahí la denominación de "pasivos", la señal óptica se divide y envía a varias salidas. En el mercado se pueden conseguir con diferentes relaciones de división de la potencia óptica.
- **DSL:** Digital Subscriber Line - Línea de Abonado Digitales, son tecnologías que permiten transmitir información digital a alta velocidad sobre las líneas telefónicas ya existentes en los hogares y los negocios. Ofrecen conexión permanente con velocidades que van desde los 100 Kbps hasta los 52 Mbps, pero su aplicación en un punto determinado está limitado por factores como la distancia entre la central telefónica local y la vivienda.
- **FTTx:** Es conocido ampliamente como Fibre-to-the-x (Fibra Hasta La x), donde x puede denotar distintos destinos. Los más importantes son: FTTH (Fibre To The Home, Fibra Hasta la Casa), FTTB (Fibre To The Building, Fibra Hasta el Edificio) y FTTN (Fibre To The Node, Fibra Hasta el Nodo). La elección de una arquitectura u otra dependerá fundamentalmente del coste unitario por usuario final y del tipo de servicios que quiera ofrecer el operador.
- **ITU:** International Telecommunications Union - Unión internacional de telecomunicaciones, organismo de las Naciones Unidas encargado de regular las telecomunicaciones entre las distintas administraciones y empresas operadoras.
- **SPM:** Modulación de Auto Fase, esta nace a que el índice de refracción de la fibra tiene una componente dependiente de la intensidad. Este índice de refracción no lineal induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso. De esta forma, las diferentes partes 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.

- **OLT:** (Optical Line Termination) Es el elemento activo situado en la central telefónica. De él parten las fibras ópticas hacia los usuarios (cada OLT suele tener capacidad para dar servicio a varios miles de usuarios). Agrega el tráfico proveniente de los clientes y lo encamina hacia la red de agregación. Realiza funciones de router para poder ofrecer todos los servicios demandados por los usuarios.
- **ONT:** (Optical Network Termination) Es el elemento situado en casa del usuario que termina la fibra óptica y ofrece las interfaces de usuario.
- **POF:** Fibra Óptica Plástica: es un tipo de fibra óptica, compuesta esencialmente de plástico. Esta contiene un núcleo de polimetilmetacrilato, y un revestimiento de polímeros fluorutatos. Debido a su composición plástica, se representa como una alternativa menos costosa a la fibra óptica tradicional, además de variados beneficios atribuibles, por sobre la fibra óptica tradicional y el mismo cobre.
- **Topologías PON:** PON es una tecnología punto-multipunto. Todas las transmisiones en una red PON se realizan entre la unidad Óptica Terminal de Línea (OLT –Optical Line Terminal-), localizada en el nodo óptico o central y la Unidad Óptica de Usuario (ONU). Habitualmente la unidad OLT se interconecta con una red de transporte que recoge los flujos procedentes de varias OLTs y los encamina a la cabecera de la red. La unidad ONU se ubica en domicilio de usuario, configurando un esquema FTTH (fibra hasta el usuario, Fiber To The Home).
- **VoD:** Video on Demand - Video por Demanda, es un servicio de contenido multimedia capaz de distribuir una película o un programa a un televisor o un computador, en el momento que es solicitado por el usuario.
- **WDM:** Multiplexación por división de longitud de onda, se encarga de subdividir la señal óptica dependiendo de los usuarios o canales a transmitir.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es simular por medio de la herramienta computacional OPTSIM de RSOFT, los fenómenos de no linealidad FWM, teniendo en cuenta diferentes tasas de transmisión, considerando uno y varios usuarios. Para su elaboración se recopiló información de Internet, libros de comunicaciones digitales, en libros de sistemas y señales ópticas. Esta información contiene algoritmos de programación e información sobre los módulos a utilizar.

Las simulaciones se realizaron con el propósito de obtener los parámetros de desempeño de la red física óptica aplicado a WDM, teniendo en cuenta la relación señal a ruido Óptica, Eléctrica y BER, con tasas de transmisión en bits para 2.5 y 10 Gbps, teniendo en cuenta tres longitudes de onda para la transmisión de información, las cuales generan 16 canales con una separación de 100 GHz. Se efectuaron pruebas con amplificadores ópticos EDFAS para observar la robustez del enlace a una distancia máxima de 200 km. Los resultados de estas simulaciones ayudarán a saber cuál será la mejor técnica de acceso, teniendo en cuenta la no linealidad (FWM) y fenómenos de dispersión al medio para un entorno de operación establecido, buscando el mayor desempeño posible y sobre todo bajos costos. Este conocimiento puede ser interesante para una empresa de telecomunicaciones, ya que ayudaría a determinar la mejor configuración de equipos y tecnología para alcanzar una alta competitividad en el medio.

Palabras Claves: FWM, Redes de acceso, comunicaciones ópticas, OSNR, SNR, Fibra Óptica, Amplificación Óptica.

INTRODUCCIÓN

El aumento de los servicios interactivos y de entretenimiento suministrados actualmente por las redes de telecomunicaciones, así como de la tendencia a la convergencia de los servicios de voz IP sobre una única plataforma de red, permiten que los usuarios de estos servicios comiencen a hacer un uso masivo de estas herramientas; aumentando así los niveles de tráfico y sobre todo los de ancho de banda [2]. Por tal motivo es que se hace necesario establecer parámetros de desempeño, ofrecidos por las diferentes técnicas de acceso óptico, para el mejoramiento de la calidad de información en redes robustas y aplicadas a una mayor distancia en su propagación. Los resultados de las simulaciones permitirían contribuir al problema de establecer cuál sería la mejor técnica de acceso al medio para un entorno de operación establecido, buscando el mayor desempeño posible (alta velocidad de operación, baja distorsión, etc) y bajos costos. Este conocimiento puede ser interesante para una empresa que posea redes ópticas, ya que ayudaría a determinar la mejor configuración de equipos y tecnología para alcanzar una alta competitividad en el medio.

Cómo se trata de una tecnología que últimamente ha tomado un auge alto en investigación e implementación relativamente nuevo en nuestro país, no hay un modelo preciso que permita simular y proyectar los parámetros de desempeño y fenómenos de no linealidad (FWM) en una red totalmente óptica para largas distancias, Lo cual despierta un gran interés en determinar este modelo y el estudio a profundidad de esta tecnología.

Básicamente, los problemas de este tipo parten del uso masivo de la Internet y del rápido desarrollo de aplicaciones tales como: correo electrónico, páginas web, chat, educación virtual, videojuegos, videoconferencia, TV interactiva, entre muchos otros. Esto establece que se requiera proyectar y ampliar el ancho de banda de las redes, de tal modo que soporten el tráfico presente, aumente la velocidad de operación y sobre todo el bajo costo proyectado para los años

futuros. En instituciones universitarias en Colombia y en otros países se han realizado investigaciones y/o trabajos de grado sobre redes ópticas implementando efectos no lineales desde distintos puntos de análisis, lo cual muestra la importancia del estudio de estas y a la vez suministro de información para el proyecto. En la Universidad Pontificia Bolivariana se realizó un trabajo doctoral llamado OPTIMIZACION DE REDES DE TRANSPORTE OPTICASWDM PARA EL SOPORTE DE TRAFICOS UNICAST/MULTICAST EMPLEANDO TRAFFIC GROOMING [3], en donde uno de sus capítulos considero los modelos de asignación teniendo en cuenta las limitaciones de la fibra óptica, aplicando los efectos no lineales XPM, SPM, FWM para analizar como es el tráfico dinámico en redes OTN. Es muy importante resaltar que lo que se busca con este proyecto de grado es mejorar la transmisión y recepción de la información sobre este tipo de redes ópticas.

Entre los principales centros de investigación en comunicaciones ópticas que estudian estos fenómenos cuyo impacto es alto a nivel mundial tenemos la el laboratorio de comunicaciones ópticas de University of Southern California. El centro de investigación de la universidad cuenta con una gran cantidad de tecnología para la medición de parámetros, observación de fenómenos no lineales aplicados a sistemas ópticos, entre otras. Dentro de sus equipos, cuenta con diferentes dispositivos ópticos y herramientas de simulación como OptSim, haciendo de este una herramienta computacional muy confiable [1]. También encontramos el centro universitario de Arizona, el cual está altamente reconocido a nivel mundial por sus capacidades e infraestructura. Entre las áreas de interés para el desarrollo de prácticas y experimentación se encuentra el tema Design methodology for WDM backbone networks using FWM-aware heuristic algorithm y RWA scheme minimizing FWM effect in a wide área optical network, las cuales analizan el fenómeno no lineal en redes ópticas [4].

Por último podemos resumir que la información disponible relacionada con el Impacto del fenómeno de no linealidad FWM en un enlace óptico WDM teniendo en cuenta Fibra Dispersiva, se observa que en Asia, Europa y Norteamérica se

encuentra mucha mayor información que la disponible en Latinoamérica y concretamente en Colombia [5].

Con este proyecto se pretende mostrar la eficiencia de la red óptica a través de las simulaciones, profundizando en los aspectos técnicos de un enlace óptico en la red de acceso, los diferentes servicios que se pueden ofrecer, teniendo en cuenta el modelamiento de las técnicas de acceso especificadas en la red óptica a emplear, los cuales son puntos claves a tener en cuenta en el momento de diseñar este tipo de redes.

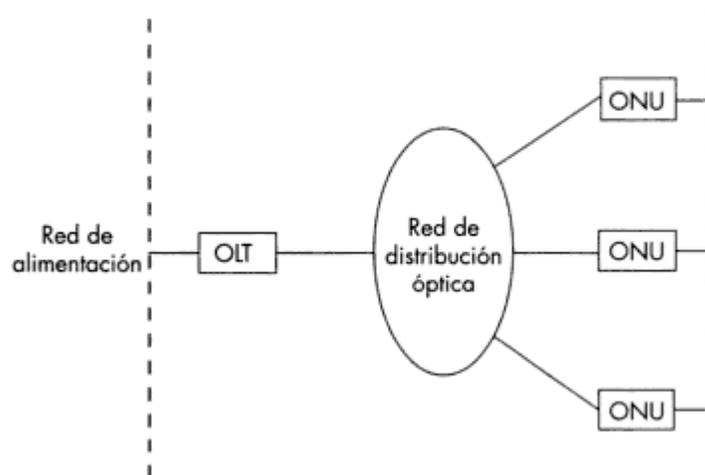
Estos modelos permiten desarrollar simulaciones, considerando varios usuarios con acceso simultáneo y tasas de transmisión diferentes. Este proyecto será valioso para aquellas empresas que se encuentran en la etapa de implementación de esta clase de tecnologías, así como para los proveedores de este tipo, donde las aplicaciones serán soportadas por infraestructura de banda ancha con mejor velocidad de operación. Lo anterior redundará en beneficios para las empresas proveedoras, mejorando el efecto de sus inversiones al satisfacer a los usuarios con servicios de óptima calidad en el momento oportuno y a precios razonables.

1. REDES OPTICAS

En este capítulo se presentan las principales características de una red Óptica, que en nuestros días ofrece una diversa gama de servicios al usuario, soportados sobre un gran ancho de banda, la cual es una de las principales características de este tipo de redes.

Una red Óptica es una red cableada sobre fibra que combina en su estructura el uso de dispositivos ópticos como son, splitters, amplificadores, acopladores, etc. La tecnología óptica es el resultado del avance de las redes clásicas por cable y están compuestas básicamente por: una terminación de línea óptica (OLT), una unidad de red óptica o conocida en el medio como (ONU), y por último, una red de distribución óptica llamada (ODN). Donde la figura 1 muestra esta distribución de manera precisa.

Figura 1 Distribución de una red óptica de acceso básica de fibra.



Los proveedores de servicio tienen un gran interés en integrar en una única infraestructura de red los servicios de voz, datos y video debido a que estas permiten proporcionar mayor interoperabilidad, alcanzando soluciones efectivas, permitiendo que los proveedores de servicio expandan su mercado. Las redes

ópticas permitirán en un futuro llevar hasta los hogares de la mayoría de poblaciones de grande y mediano tamaño una amplia variedad de servicios y aplicaciones de telecomunicaciones cómo son los de vídeo bajo demanda (VOD), pago por visión (PPV), vídeo juegos interactivos, videoconferencia, compra y pagos por red y acceso a bases de datos, con grandes velocidades. Sin embargo, en la actualidad los servicios de acceso a Internet a alta velocidad y la telefonía se han convertido en la principal prioridad de los proveedores de servicio, ya que son los de mayor empleo actual por la población colombiana y mundial¹.

En este capítulo se presenta de manera muy breve la historia de las redes Ópticas y la arquitectura de una red óptica.

1.1 Historia de las Redes Ópticas

Las redes Ópticas, son redes de acceso cableadas terrestres, que emplean fibra óptica. La fibra óptica es usada para el transporte de los contenidos a altas tasas de velocidad, permitiendo que la información viaje de manera más robusta y mayor flexibilidad.

Desde que el ser humano tuvo uso de razón, y se vio en la necesidad de emplear diversos mecanismos para comunicarse con sus semejantes y que lo diferenciaron de los animales, nacieron los medios de comunicación, el más antiguo y ajustable hoy en día en algunos sectores es la telegrafía, luego la misma no cubría todas las necesidades de los usuarios y fue entonces cuando se da paso a la Red Telegráfica por Alexander Graham Bell quien da comienzo a la era de la Red Telefónica, la cual fue desplazando poco a poco a la Red Telegráfica con el descubrimiento del Teléfono, el mismo trajo como consecuencia que se descubriera que era mucho mejor para la comunicación interpersonal aunque era una fuente centralizada de noticias, entretenimiento y cultura, donde a ciertas horas del día sonaba el teléfono, se enchufaba un altavoz y se empezaba a oír

¹ MURILLO, Hernández. Redes de cable de banda ancha HFC. [En línea]. Lima: s.l, 2002. <Disponible en: http://sipan.inictel.gob.pe/refiop0/uploads/Redes_H.doc> [consulta: 14 Nov. 2012]

todo lo que se escuchaba del otro lado del auricular, la primera Red Telefónica se estableció en los alrededores de Boston y su primer éxito fue cuando tras un choque de trenes, se utilizó el teléfono para llamar a algunos doctores de los alrededores que llegaron inmediatamente.

Existieron muchas renovaciones en cuanto a la Redes se trataban, las cuales siempre fueron superándose en ventajas, pero en tantos cambios provocados se dio el surgimiento a una red muy ventajosa la cual da muchas más prestaciones que las anteriores y hoy en día es muy utilizada por todos los usuarios para mejorar sus servicios, la misma es La Redes de Fibra Óptica, la cual se emplean cada vez más en Telecomunicación debido a que las ondas de luz tienen una frecuencia alta y la capacidad de una señal para transportar información aumenta con la frecuencia, en las redes de comunicaciones por Fibra Óptica se emplean sistemas de emisión láser, aunque en los primeros tiempos de la misma se utilizaron también emisores LED y en el 2007 están prácticamente en desuso, en cuanto a esta red se trabaja en el desarrollo y perfeccionamiento de La Red Óptica basándose en tecnología WDM entre otras.

Existen numerosas tecnologías para el transporte y encapsulación de datos en las Redes Ópticas, una característica de estas redes es que están llamadas a soportar muchos tipos de tráfico y velocidades, sin embargo y sobretodo hay una tendencia al uso de un nivel óptico común para el transporte digital de datos: DWDM. SONET/SDH ha sido la base de las Redes Ópticas en la última década y ha sido utilizado como el nivel fundamental del transporte tanto para la red de conmutación de circuitos basada en TDM como de las redes de datos, mientras que SONET/SDH ha evolucionado sobre la base de una tecnología muy elástica, siguen siendo caras sus implementaciones pudiendo plantear que las inherentes ineficiencias en la adaptación de los servicios de datos a la jerarquía optimizada de voz y la inflexible jerarquía de multiplexación, la hacen problemática, de forma más importante las limitaciones en cuanto al escalado de la capacidad –OC-768 puede ser el límite práctico de SONET/SDH– y la insensibilidad al tráfico IP en una

tecnología basada en TDM tiene un pobre futuro². Las redes ópticas son redes de telecomunicaciones de gran capacidad basadas en tecnologías ópticas y componentes que proveen enrutamiento y restauración a nivel de longitud de onda. El origen de las redes ópticas está ligado a la técnica WDM (Wavelength Division Multiplexing) que dio capacidad adicional a las fibras ópticas existentes. De acuerdo a la tecnología física empleada, las redes pueden clasificarse en tres generaciones. La primera generación está basada en cables de cobre o tecnologías de microondas. En la segunda, se introdujo el uso de enlaces de fibra óptica, pero está limitada a las velocidades electrónicas (unos pocos Gb/s) empleadas en switches y nodos terminales. Este fenómeno es llamado cuellos de botella electrónicos. Finalmente se tiene la tercera generación, diseñada de modo all-optical (óptica por completo) basada en WDM, y donde tanto la transmisión como el switching de datos se hace enteramente en el dominio óptico.

Es interesante hacer un breve recordatorio de la historia de las tecnologías de redes transmisión. Tras evolucionar de las comunicaciones analógicas a las digitales, y de PDH a SDH, el objetivo está ahora en pasar de SDH a WDM. Synchronous Digital NETwork, que se podría traducir como red digital Síncrona (SONET) en Norte América y Synchronous Digital Hierarchy, que se podría traducir como jerarquía digital síncrona (SDH) en Europa, son los estándares de transmisión digital a larga distancia que resuelven los problemas de gestión y mantenimiento de los equipos, así como en la inserción y extracción de las señales de jerarquías inferiores (de menor capacidad), presentados por su predecesor Plesiochronous Digital Hierarchy, que se podría traducir como jerarquía digital plesiócrona (PDH) [4].

La tecnología de transporte SDH permite diferentes tasas de bit o STM4, desde STM-1 (155 Mbps) hasta STM-64 (10 Gbps). La protección se ofrece a través de topologías en anillo, posibilitadas gracias a ADMs, capaces de reconfigurarse del fallo de un enlace en menos de 50 ms [6]. Otras características importantes de SDH son la compatibilidad con la tecnología de transporte precedente (es decir, PDH), la posibilidad de transportar nuevos formatos de señales como ATM,

² Conectronica, Tecnología y Elementos de Conexión y Conectividad. [En línea]. España. <Disponible en: [http:// www.conectronica.com/Redes-Opticas/](http://www.conectronica.com/Redes-Opticas/)> [consulta: 14 Nov. 2012]

estandarización mundial, monitorización de errores y sus potente funcionalidad de administración. Si consideramos la capacidad de las diferentes tecnologías como la tasa de transmisión de bits típica utilizada y el factor de multiplexación ofrecido por los nodos de conmutación y multiplexación, podemos ver una clara evolución:

- Inicialmente la transmisión digital era capaz de soportar 2 Mbps (en el primer nivel de multiplexación o multiplexores básicos), teniendo 64 Kbps cada una de las señales tributarias. Estos 64 Kbps conforman la tasa de bit de las redes telefónicas tradicionales.
- El siguiente paso fue mejorar la eficiencia en la transmisión, permitiendo tasas de bit más altas introduciendo cross-connects (principalmente manuales pero en algunos países, como en Francia e Inglaterra, automáticos). La señal agregada pasó a tener una capacidad de 140 Mbps y un factor de multiplexación de 2 Mbps. Por supuesto también hay tasas de bit intermedias, tales como 8 Mbps o 34 Mbps. Esta tecnología es PDH. Por otra parte, la siguiente evolución que está de hecho en desarrollo en todos los países del mundo, es la introducción de SDH. Actualmente el factor de multiplexación es de 150 Mbps y es posible una capacidad de 10 Gbps. Nótese, de nuevo, que son posibles otras tasas de bit intermedias. Una nueva etapa está en el uso generalizado de la WDM, que aún no ha sido totalmente estandarizado debido la rápida evolución de estos equipos, lo que imposibilita producir recomendaciones a tiempo y constituye una clara desventaja frente a SDH. Ya no se está lejos de alcanzar una capacidad de 320 Gbps (32 longitudes de onda), con un factor de multiplexación de 10 Gbps. No obstante, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) ha propuesto recientemente una primera recomendación importante para la disposición de las longitudes de onda a 1600 nm (o múltiplos suyos), en el rango de 1.530 a 1.560, y se prevé que de aquí al año 2000 aparezcan un buen número de recomendaciones concernientes a esta nueva tecnología [3]. El paso siguiente se dará posiblemente en torno al año 2010 [3] y requerirá grandes avances que superen las limitaciones de la WDM, consiguiendo incrementar el factor de multiplexación a 320 Gbps con una capacidad total de 10 Tbps, o quizás la

combinación de WDM con el principio de TDM en el dominio óptico. En efecto, la mejor técnica a corto plazo para llegar a aprovechar todo el ancho de banda ofrecido por una fibra óptica, sin necesidad de cambiar todos los equipos y enlaces existentes, es la WDM. La tecnología WDM es estos momentos, ampliamente utilizada en redes de cable de fibra óptica submarinos internacionales [7], consiguiendo unas capacidades y una funcionalidad inimaginable hace tan sólo cinco años.

Sistemas transoceánicos transportando más de 16 longitudes de onda ya son posibles a lo largo de distancias de 8.000 Km. Estos sistemas transportan un STM-16 (2,5 Gbps) en cada longitud de onda, soportando una capacidad máxima de 40 Gbps por fibra.

También son posibles 6 canales a 5 Gbps sobre distancias similares. El principal reto en el diseño de estos sistemas es cómo conseguir un mayor número de longitudes de onda sobre distancias de alrededor de 12.000 Km. Se debe tener un especial cuidado seleccionando las características de dispersión de cada fibra y el espaciado entre longitudes de onda. En un futuro próximo se podrá incrementar la capacidad a un STM-64 (10 Gbps) por longitud de onda. Además, la seguridad y disponibilidad, son requerimientos absolutamente necesarios de las redes submarinas, por lo que muchos tramos utilizan componentes redundantes y topologías en anillo.

Actualmente hay varias redes transoceánicas en diseño y construcción. Una de estas redes es Africa ONE que fue el primer proyecto que planeó utilizar tecnología WDM, concebida como un anillo de cable de fibra óptica submarino dando acceso a más de 2,5 Gbps a toda la costa africana sobre más de 40.000 Km, aunque ha sufrido varios retrasos en el comienzo de su instalación.

Otro proyecto es Sea-Me-We-3, que a finales de 1998 cuando entre en servicio, será la primera red submarina que utilice encaminadores de longitudes de onda y multiplexores add/drop. Esta red será instalada con una capacidad superior a 8 longitudes de onda en cada fibra transportando cada fibra un STM-16. Sea-Me-We-3 conectará más de una docena de países entre el Sur y mitad Este de Asia y el Este de Europa.

Los tres sistemas WDM conocidos por Atlantis-2, Columbus-3 y Americas-II, formarán, cuando se finalicen a mediados de 1999, un anillo alrededor del Océano Atlántico Sur, conectando países de cuatro continentes. A diferencia de las redes Africa ONE y Sea-Me-We-3, permitirán que la capacidad y el encaminamiento del tráfico sea cambiada una vez que el sistema esté operativo, reduciendo el coste inicial por utilizar menos longitudes de onda de las que podrá soportar. La investigación y desarrollo de las redes WDM en redes regionales y redes de área metropolitana, ha madurado considerablemente en pocos años, además de haberse incrementado el número de prototipos experimentales que actualmente están siendo probados en Europa [8], Estados Unidos [9] y Japón. La evolución esperada para las nuevas arquitecturas de red óptica WDM se espera que sea similar a la observada en las redes SDH. Ya se ha anticipado que la próxima generación de Internet, red donde el crecimiento de usuarios ha sido especialmente espectacular, casi exponencial empleando backbones ópticos basados en WDM.

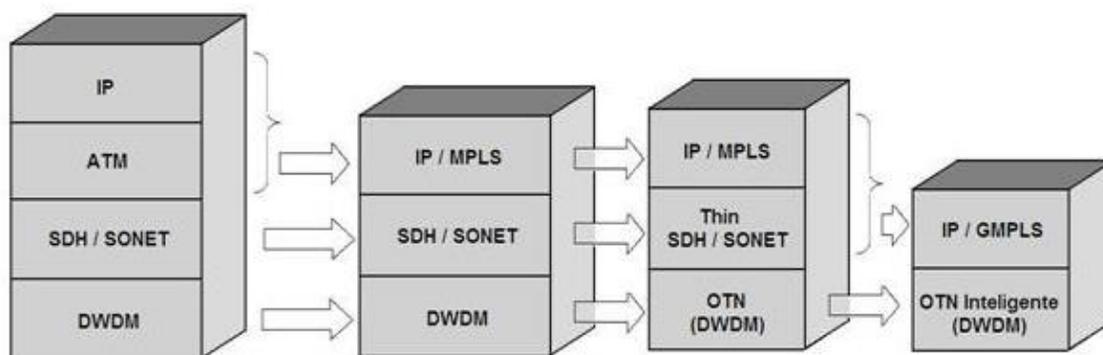
En cuanto a los programas de investigación y desarrollo europeos a corto plazo, cabe destacar el instituto de servicios y tecnología de comunicaciones avanzadas (ACT) [10], cuyo principal objetivo es conseguir que la futura infraestructura de banda ancha se base en tecnologías de fibra óptica. Para ello se tratará de recurrir lo menos posible a la conversión entre los dominios eléctrico y fotónico, aprovechando al máximo a la dimensión de la longitud de onda. Actualmente hay dos proyectos ACTs que se ocupan en concreto del problema de redes de transporte ópticas transeuropeas utilizando WDM: Optical Pan-European Network (OPEN) y Pan-European Photonic Overlay Network (PHOTON) [12].

El proyecto OPEN encabezado por Alcatel, trata aplicaciones submarinas con WDM. Por otro lado PHOTON, que engloba a empresas como Siemens, Deutsche Telekom, PTT Austria, Phillips, BCC y Telecom Austria, implementará una red basada en fibra estándar monomodo ya instalada, y demostrará transmisión WDM con velocidades superiores a 10 Gbps sobre más de 500 Km. Para ello tratará con amplificación, compensación de dispersión, encaminamiento de longitudes de onda y funciones de conexión de cruce.

De cualquier forma, la instalación de sistemas WDM se está haciendo realidad en tramos submarinos, mientras que el acercamiento de la fibra hasta la casa no será un hecho en un plazo más o menos corto [1], debido al compromiso entre el coste de la instalación y las ventajas que se podrán obtener. Sin embargo, varias previsiones señalan cifras que invitan a ser optimistas, diciendo que el mercado de multiplexores por división en longitud de onda, sólo en Estados Unidos, crecerá desde los 80 millones de dólares en el año pasado, hasta los 330 millones en el 2000 [2], mientras que en Europa las cifras son menores, partiendo de 400.000 dólares de ventas ese mismo año pasado, y llegando a los 238 millones de dólares para el año 2001. Y que la implantación de fibra óptica seguirá su expansión, creciendo desde los 22,8 millones de kilómetros en el año 1995, hasta los 63 millones en el año 2001 [3], con implantación mayoritaria en los Estados Unidos, Japón y China, con unas ventas de 100 millones de dólares en rejillas de Bragg. Todas estas inversiones propiciarán que en unos cinco años, la red de transporte europea experimente un profundo cambio, posibilitado por las soluciones WDM ofrecidas a los operadores europeos por los principales suministradores de dispositivos ópticos. Las redes ópticas se proyectan para ser el medio de comunicación del futuro, por sus altos beneficios cuando de enviar información se trata. Se estima que más de mil millones de personas tienen acceso a Internet pero con insuficiente ancho de banda para soportar las nuevas aplicaciones del siglo XXI. Las redes ópticas son la mejor alternativa posible para satisfacer la calidad de servicio requerida por el Internet del futuro. A lo largo de los últimos años diversos factores han propiciado el importante desarrollo tecnológico de todos los equipos y servicios relacionados con las telecomunicaciones: grandes avances técnicos, liberalización del sector, crecimiento de la red Internet... Todos estos factores están convirtiendo nuestra era, en la era de la información y las comunicaciones. Esta revolución de las telecomunicaciones avanzadas, conocida por la Sociedad de la Información, Autopistas de la Información o Aldea Global, descentralizará y flexibilizará la economía, modificará los hábitos de vida de las personas y en definitiva, transformará radicalmente la sociedad [1]. Para que esta revolución tenga lugar,

es necesario mejorar las infraestructuras que soportarán servicios multimedia de diversa índole. Así, el éxito de esta revolución global sin precedentes, depende en gran medida de la instalación de redes de gran capacidad y bajo coste, siendo la fibra óptica el medio elegido para los sistemas de telecomunicación. En un principio la tecnología óptica fue implantada para sistemas de transmisión a larga distancia, pero ahora está reemplazando al cable coaxial y de cobre de las redes telefónicas locales, de las redes de televisión por cable y de las redes de datos de área local. La completa explotación de todas las posibilidades que ofrece la fibra óptica no es sencilla, pero se ha progresado tremendamente en los últimos 20 años [2], durante los cuales la capacidad de las redes de largo recorrido se ha duplicado cada dos años. Considerando un crecimiento anual del 100 %, llegamos a que los requerimientos de capacidad para la próxima generación de equipos serán del orden de terabits, para el periodo inmediatamente posterior al año 2010. Pensando más en la actualidad de las redes ópticas, se han planteado diferentes alternativas para actualizar un nuevo tipo de redes ópticas pasivas llamadas redes PON, el cual incrementan su ancho de banda, alcance y número de usuarios.

Figura 2 Evolución de la capa Óptica.



Para aumentar la capacidad puede agrandarse la tasa de bits o el número de longitudes de onda a través del empleo de WDM (Wavelength Division Multiplexing), siendo el alto costo de las fuentes ópticas una limitante de implementación. De otro lado, para extender el alcance, puede obtenerse amplificación óptica en la ODN usando EDFAs o amplificación Raman distribuida.

El empleo de la amplificación óptica permite extender el alcance hasta 100-120 km, integrando los segmentos de acceso y metropolitano, disminuyendo los costos y la complejidad [9].

Respecto al incremento de la tasa de bits, ITU e IEEE están trabajando en la estandarización de PON a velocidades de 10 Gbps [22] Esto para apoyar futuros servicios de alto ancho de banda, para aplicaciones en negocios, residencias y back-hauling al sistema de comunicación móvil. Un objetivo adicional es garantizar compatibilidad con versiones anteriores y la coexistencia con la generación actual de PON. De esta forma, las compañías prestadoras de este servicio podrían competir con un mejor servicio, obteniendo una máxima reutilización de la ODN existente, proporcionando un ancho de banda flexible

La propuesta WDM-PON permite que cada usuario reciba un canal dedicado mediante la asignación de longitudes de onda únicas en los canales ascendente y descendente. En WDM-PON el usuario puede ser una red TDM-PON generando arquitecturas híbridas. En una red híbrida TDMA/WDM-PON, la capacidad en cada longitud de onda es compartida dinámicamente a través de TDMA entre los usuarios de la TDM-PON.

Adicionalmente, el uso de formatos avanzados de modulación y detección coherente digital en combinación con las mencionadas arquitecturas híbridas de PON, pueden aumentar la densidad de usuarios, capacidad y alcance del sistema³.

1.2 Arquitectura de una red Óptica

Una Red Óptica está compuesta de varios nodos que implementados sobre plataformas SONET/SDH ó ATM pueden proporcionar la variedad de servicios demandados, cada servicio con un modelo de tráfico diferente, calidad de servicio (QoS) y capacidad.

³ F. Amaya-Fernandez, A. Soto, I. Tafur; "Optimizing the Next Generation Optical Access" Latin America Transactions, IEEE., vol. 8, no 4, pp. 438-443, October 2010

Una característica distintiva de las Redes Ópticas es que provee de servicios de diferentes tipos de una forma rápida y eficiente en respuesta a las cambiantes demandas de los usuarios, con SONET/SDH que es la base de la mayoría de las MAN actuales esta provisión de servicios es largo y complejo, la planificación y el análisis de las redes, así como el aprovisionamiento ADM, la reconfiguración DCS (Sistemas Cross-Conet Digitales), la verificación de caminos y circuitos y la creación del servicio puede tardar varias semanas, a diferencia del equipo DWDM instalado la provisión de un nuevo servicio puede ser tan simple como activar una nueva longitud de onda en la fibra ya existente. DWDM puede ayudar a la exhausta fibra, su valor se extiende más allá de esta simple ventaja, en SONET/SDH el aumento de la capacidad es la base de tirar más cable o ampliarlo, pero DWDM hace más que esto, porque lo que le da valor añadido en las redes metropolitanas, es su rápido y flexible aprovisionamiento de protocolos del DWDM, transparente en cuanto a la velocidad, centralización de datos, servicios protegidos, junto a la posibilidad de ofrecer nuevas y más altas velocidades a menor costo

Las Redes DWDM deben ser capaces de soportar la amplia gama de servicios que se implementan sobre TDM (SONET o PDH) y ATM, además debe soportar conexiones de redes punto a punto, anillo, permitir la conectividad entre anillos, mallas y topología de estrella mientras provee la combinación de redes de banda ancha y transporte óptico.

Figura 3 Arquitectura de la red Óptica.



Fuente: RODRIGEZ, Gregorio. Fibra óptica. [En línea]. Venezuela: s.n, 2007. <Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos12/fibra/fibra.shtmlhtml>> [consulta: 20 May. 2012]

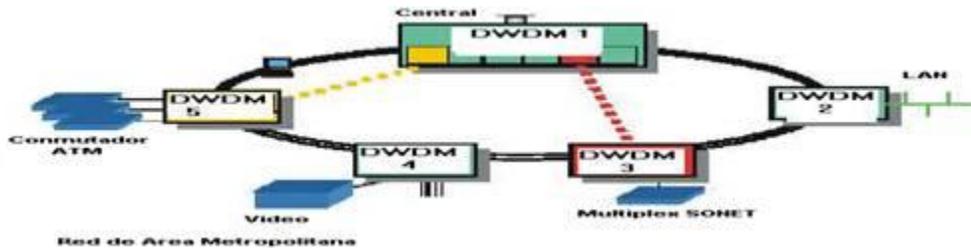
El subsistema tributario permite proveer de forma directa de una variedad de servicios desde conexiones LAN, IP y servicios ATM hasta los tradicionales servicios de voz, porque múltiples servicios pueden ser adaptados a un formato común y de esta forma se conforman los paquetes y son multiplexados para que los recursos se puedan compartir eficazmente [10].

El subsistema de multiplexación debe llevar a cabo la conformación de los paquetes y el múltiplex basado en ATM, en SONET ó la combinación de los dos, donde la combinación ATM/SONET se beneficiará de las ventajas de ambos sistemas.

La capa WDM proporciona la flexibilidad para mapear el tráfico generado en las longitudes de onda múltiple y la topología básica es un anillo de Fibra Óptica que interconecta varios puntos de acceso que usan los canales ópticos.

Ahora analizaremos los distintos tipos de redes ópticas a emplearse en sistemas ópticos.

Figura 4. Anillo de Fibra con diferentes conexiones.



Fuente: RODRIGEZ, Gregorio. Fibra óptica. [En línea]. Venezuela: s.n, 2007. <Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos12/fibra/fibra.shtmlhtml>> [consulta: 20 May. 2012]

En esta topología, un solo par de fibra conecta muchos elementos y les permite que transporten el tráfico entre sí y hacia cada uno de ellos, la configuración en anillo es la de máxima conectividad con mínimo de ramas, permitiendo la constitución de redes gestionables flexibles además es tolerante a fallos, una estructura en anillo permite protección eficiente al establecer los canales de servicio y de protección por caminos diferentes. Cada punto de acceso ofrece un

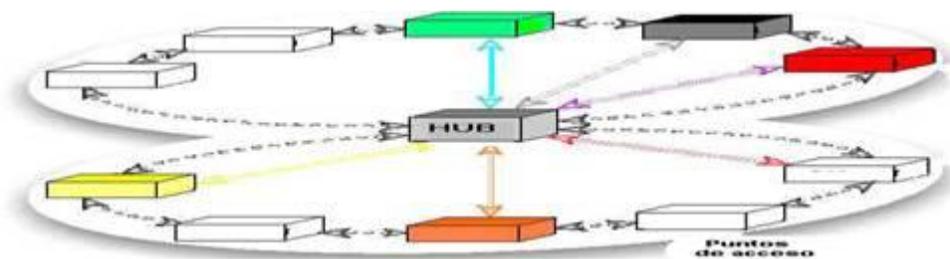
Multiplexor Add/Drop óptico que agrega y extrae canales ópticos hacia y desde el anillo, además cada punto de acceso debe procesar el tráfico según la capa y el protocolo con el tráfico asociado, como SONET, ATM, TDM, IP, etc, los canales de WDM son utilizados para conectar a los nodos en el anillo y soportar la conectividad punto a punto entre ellos y los sistemas de protección deben aplicarse para que el canal óptico se transmita en ambas direcciones en el anillo y el receptor selecciona la señal con más calidad, además si una de las trayectorias se interrumpe se conmuta la otra [10].

1.2.1 Conexión entre anillos

La Red Óptica debe soportar la interconexión de muchos anillos para formar una red de área metropolitana multi-anillo, las opciones de topologías adicionales como son la malla y estrella también deben ser asimiladas.

Una red de anillo dual se muestra en la figura 3, donde pueden ser implementados canales adicionales ajenos al DWDM fuera de los anillos y pueden usarse para protección o para aumentar el ancho de banda que puede cruzar entre los anillos.

Figura 5. Anillo de Fibra Dual.



Fuente: RODRIGEZ, Gregorio. Fibra óptica. [En línea]. Venezuela: s.n, 2007. <Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos12/fibra/fibra.shtml>> [consulta: 20 May. 2012]

1.2.2 Capa Óptica

La capa óptica en una arquitectura de DWDM provee el transporte óptico para las capas superiores. (SONET y ATM)

La función principal de la capa óptica será que consiste en transformar las señales eléctricas de las capas superiores a las longitudes de onda definidas por las Recomendaciones de la UIT-T para los sistemas DWDM en la banda de los 1550nm, además debe cuidar que el BER de extremo a extremo de cada canal óptico debe ser mejor que 10⁻¹².

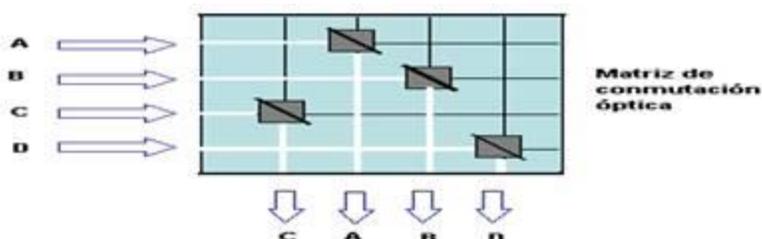
Los Amplificadores ópticos deben ser capaces de lograr amplificar la señal sin necesidad de llevar a cabo la regeneración óptico-eléctrico-óptico para mayores distancias.

Los sistemas de administración de la red deben supervisar los canales ópticos proporcionando una gestión eficiente y un rendimiento óptimo facilitando el manejo de la capa óptica y detectando cualquier falla potencial en la red [10] [12].

1.2.3 Equipos utilizados en las Redes Ópticas

En las Redes Ópticas se emplean diferentes equipos, como el caso de los EDFA y los multiplexores Add/Drop ópticos tratados anteriormente, ahora nos referiremos entonces a otro equipo que es el elemento que más flexibilidad dota a una Red Óptica: Los Transconectores Ópticos (Cross Connect Óptico o OXC)

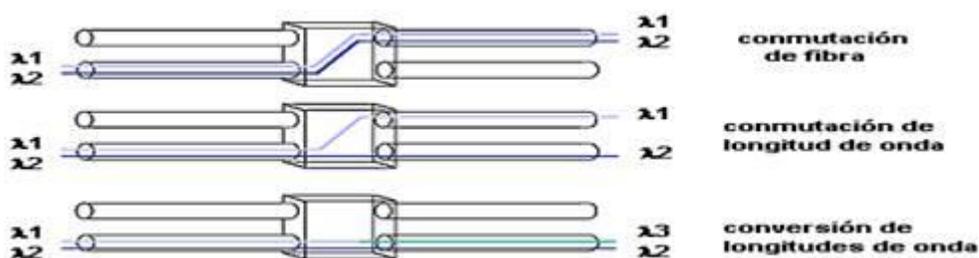
Figura 6. Transconductor Óptico.



Fuente: RODRIGEZ, Gregorio. Fibra óptica. [En línea]. Venezuela: s.n, 2007. <Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos12/fibra/fibra.shtml>> [consulta: 20 May. 2012]

Por matriz de conmutación óptica (OXC), se suelen entender dos elementos diferentes: El Conmutador Espacial de fibra y el Reencaminador en longitud de onda, en ambos casos un conjunto de Fibras Ópticas de entrada se conecta con otro conjunto de fibras de igual número de salida, en el primer caso todas las señales ópticas de una fibra de entrada se encaminan hacia otra de salida y en el segundo las portadoras ópticas de las fibras de entrada se reencaminan hacia las de salida de forma individual.

Figura 7. Funciones de un Transconectores Óptico.



Fuente: RODRIGEZ, Gregorio. Fibra óptica. [En línea]. Venezuela: s.n, 2007. <Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos12/fibra/fibra.shtml>> [consulta: 20 May. 2012]

El tamaño de la matriz de conmutación lo determina el número de fibras, no el de longitudes de onda y en un conmutador óptico son necesarios tantos conmutadores espaciales individuales como longitudes de onda y el número de puertos de cada conmutador espacial son iguales al de fibras de entrada. (Igual al de salida). Los OXCs permiten el establecimiento de enlaces ópticos en longitudes de onda individuales entre elementos de diferentes subredes. Los

Transconectores Ópticos al igual que sus homólogos de SONET trabajan con independencia de la señal y con ausencia de bloqueo de esta, es decir, una señal puede conectarse a cualquier salida e incluso a varias salidas, por ejemplo la distribución de la señal de TV [11].

1.3 Red de Acceso Óptica

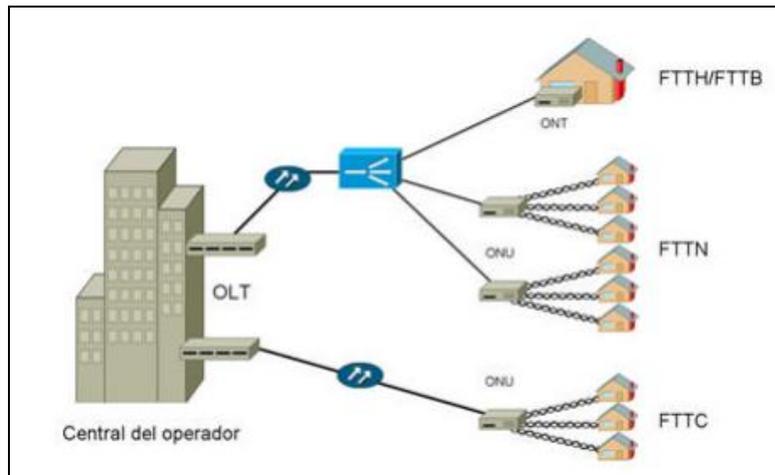
Las redes de acceso ópticas, conocidas como FTTx (Fiber to The x) han crecido en popularidad ya que permiten lograr un mayor alcance, ancho de banda y calidad de servicio que las redes de acceso basadas en cobre.

De acuerdo con ITU G.983.1, los componentes de una red de acceso óptica (OAN, optical access network) son:

- Red de distribución óptica (ODN, optical distribution network): proporciona el medio de transmisión óptica desde el OLT hasta los usuarios.
- Terminal óptico de línea (Optical Line Terminal, OLT): proporciona la interface al lado de la red de la OAN y se ubica en la HE o CO y sirve a una serie de ONUs en una topología punto-multipunto o en árbol.
- Unidad óptica de red (Optical Network Unit, ONU): proporciona la interface al lado del usuario de la OAN, corresponde al OLT donde finaliza la fibra óptica. En FTTH recibe el nombre de ONT (Optical Network Terminal).

La sección ODN puede ser activa o pasiva y su arquitectura puede ser punto a punto o punto a multipunto. Algunas arquitecturas de redes de acceso ópticas (OAN, optical access network) para FTTx se presentan en la Figura 8.

Figura 8 Arquitecturas de red FTTx



Fuente: Incera J, Cartas R, Cair O. Mayo de 2007. Redes Digitales: Presente y Futuro. Pag. 15

Las arquitecturas FTTx difieren en la cercanía del ONU con el usuario final, siendo la arquitectura Fibra hasta el Hogar FTTH (Fiber to the Home) la de mayor cercanía, seguido por la arquitectura Fibra hasta el Edificio/Acometida (FTTB/C, Fiber to the Building/Curb) y finalmente Fibra hasta el Armario (FTTCab, Fiber to the Cabinet).

La arquitectura FTTB tiene dos escenarios, uno para las unidades multi-vivienda (MDU, Multi-Dwelling Unit), y el otro para las empresas.

En FTTB para MDU se emplean servicios asimétricos como por ejemplo, servicios de difusión digital, vídeo por demanda (VOD, video on demand) y descarga de archivos. También se emplean servicios simétricos como por ejemplo, difusión de contenidos, correo electrónico, intercambio de archivos, cursos a distancia, telemedicina, juegos en línea. Estos servicios pueden complementarse con el servicio telefónico ordinario (POTS, Plain Old Telephone Service) y red digital de servicios integrados (RDSI). En FTTB para empresas se prestan servicios de banda ancha simétricos como por ejemplo, aplicaciones informáticas para trabajo en grupo, difusión de contenidos, correo electrónico e intercambio de archivos, complementando con servicios POTS y RDSI⁴.

⁴UI T - T G.984.1. Marzo 2003. Serie G: sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales. Arquitectura de la red de acceso óptico

En las arquitecturas FTTH, FTTC, FTTCab se ofrecen servicios asimétricos y simétricos como los empleados en FTTB dependiendo del escenario MDU o empresarial.

FTTH ha crecido en popularidad y al respecto se encuentran dos alternativas: punto a punto y PON (Passive Optical Network) siendo esta última más económica [14].

1.4 Limitaciones de las Redes Ópticas

Actualmente la implementación de redes totalmente ópticas presenta algunos inconvenientes, los cuales se mencionan a continuación:

- Escasa madurez con dispositivos DWDM recientes.
- Existencia de dispersión cromática y por modo de polarización en las fibras ya instaladas.
- Acumulación de diferencias de ganancias para distintas longitudes de onda en redes con EDFA en serie.
- La conmutación de paquetes sobre las capas ópticas obliga a disponer de buffers de almacenamiento en los nodos ópticos.
- Los dispositivos sintonizables son caros y tienen rango de sintonía baja lo que reducen la cantidad de canales a Multiplexar.
- Ausencia de métodos efectivos de administración y gestión de redes.

1. ANALISIS DE DISPOSITIVOS OPTICOS

Para una red óptica es fundamental emplear dispositivos que permitan que la red óptica trabaje de manera eficiente y optima. Es importante saber cómo es su funcionamiento a través de la red y como es su aporte a un enlace óptico. Haremos un breve resumen de estos dispositivos a emplear en la red:

2.1 Elementos activos

Los elementos activos son los amplificadores y las UPSs. Los amplificadores admiten un bajo nivel de entrada y son capaces de suministrar un nivel más alto a la salida. Su objetivo es compensar las pérdidas de señal ocurridas en los cables coaxiales, introducen ruido y distorsión y hay una gran variedad de amplificadores para diferentes funciones.

Otro elemento activo es la UPS (Uninterruptable Power System), la cual proporciona energía durante los cortes de energía en las líneas troncales principales. Estas funcionan con baterías con una autonomía que puede llegar a 2 o más horas, aumentando de esta forma la confiabilidad o disponibilidad de la red.

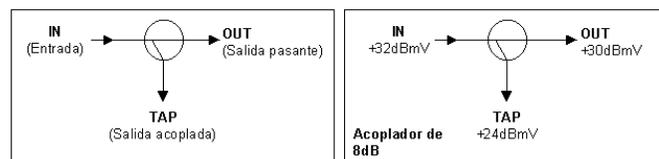
2.2 Elementos pasivos

Los elementos pasivos son aquellos que no necesitan estar alimentados para su funcionamiento. Estos elementos deben permitir el paso de corriente alterna ya que estos alimentarán a los elementos activos que estén en cascada. Los elementos pasivos se pueden clasificar en acopladores direccionales, divisores, taps, cables, todos ellos deben poseer capacidad bidireccional.

2.3 Acopladores direccionales

Los acopladores direccionales se utilizan cuando una fracción de la energía principal de RF (Radio Frecuencia) necesita ser dirigida en otro sentido. La principal característica de este dispositivo, es la direccionalidad, es decir el nivel de aislamiento entre la salida directa y la salida TAP. En la Figura 9. Se muestra la forma del acoplador direccional y se muestra su entrada y salida.

Figura 9. Acoplador direccional.



Fuente: SIGULIN, Dusan. Equipamiento de una red exterior – acopladores direccionales. [En línea]. Buenos Aires: s.n, 2012. <Disponible en: <http://www.catvnet.com.ar/36.html>> [consulta: 19 May. 2012]

Cuanto mayor es la potencia derivada, mayor será la pérdida de inserción del acoplador. La característica fundamental de este dispositivo, es la direccionalidad. Por ejemplo, si se ingresa una señal por la salida (OUT), la señal presente en el terminal (TAP) debe ser muy baja o nula. Gracias a estas características de direccionalidad, se utilizan acopladores direccionales que proveen importantes grados de aislamiento en la combinación de canales dentro del Cabecera .

2.4 Divisores o splitters

Estos dispositivos separan la señal en dos o más ramas para entregarla a dos o más dispositivos. Los splitter fueron diseñados para trabajar con un rango de frecuencia determinado. También conviene caracterizarlo por su pérdida de inserción expresada en decibelios. En la Figura 10. Se muestran tres tipos de divisores de señales comerciales.

Figura 10. Divisores de señal o splitters.



Fuente: CABLEADO - SPLITTERS. [En línea]. México: Edusat, 2007. <Disponible en: http://dgtve.sep.gob.mx/tve/serv_edusat/manuales/pdf/cable.pdf> [consulta:19 May. 2012]

Es importante aclarar que el número de salidas que posee el splitter o divisor de señal corresponda con el número de equipos a instalar.

Los parámetros normalmente especificados en los divisores son:

- Número de salidas
- Ancho de banda
- Pérdida de inserción
- Pérdida de retorno
- Aislamiento entre salidas
- Capacidad de manejo de corriente CA de 60Hz
- Porcentaje de modulación de señal de RF por la señal de 60Hz .

2.5 Acopladores

Son dispositivos que permiten dividir las señales y generalmente se encuentra después del cable hasta el receptor del equipo.

Las configuraciones en que se presentan estos dispositivos son:

- **Acopladores:** estructura con N puertos de entrada y N de salida (con $N = 2$). Este dispositivo divide el campo que entra por uno de los puertos de entrada entre los 2 terminales de salida.

- **Divisores (splitter) y taps :** estructura con 1 puerto de entrada y 2 puertos de salida. La diferencia entre un splitter y un tap es el elevado coeficiente acoplamiento en este último.

- **Combinadores :** estructura con 2 puertos de entrada y 1 de salida (misma estructura que un splitter pero al revés).

Existen diferentes tipos y valores de Acopladores, existen modelos de 2, 4 y 8 salidas. Uno de estos modelos se ve en la Figura 11.

Figura 11. Ejemplo de varios Acopladores Ópticos.



Fuente: SIGULIN, Dusan. Equipamento de una red exterior – taps. [En línea]. Buenos Aires: s.n, 2007. <Disponible en: <http://www.catvnet.com.ar/37.html>> [consulta: 19 May. 2012]

2.6 Cables

Los cables para la transmisión de las señales propagan ondas de voltaje y de corriente con muy baja potencia y frecuencia muy elevada. Los dos conductores uno de ida y el otro de retorno son necesarios para la transmisión.

El uso de cables coaxiales es indispensable para limitar las pérdidas por irradiación, que ocurren cuando la frecuencia de las señales transmitidas sea del orden de los KHz. A continuación se presentan los tipos de cables utilizados en las instalaciones de las redes.

2.6.1 Cables flexibles

Este tipo de cable es utilizado para las conexiones de bajada a los usuarios desde los Taps. Las medidas utilizadas en los cables para las conexiones se determinan es según el diámetro, como por ejemplo: RG59, RG6 y RG11. Estos cables pueden ser de diferentes tipos: simple, doble o cuádruple mallado, siendo este último el más utilizado por sus características de blindaje que son muy buenas. Además pueden incorporarse para su tendido un mensajero, el cual se utiliza para sujetar al cable en caso de tendidos aéreos. En todos los casos la impedancia característica es de 75 ohm.

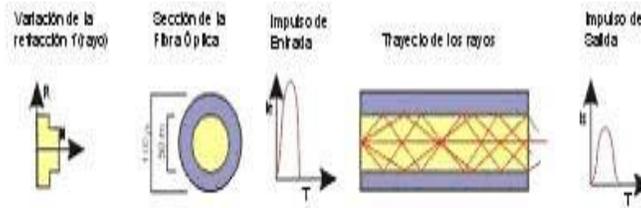
2.6.2 Cables semiflexibles

Para este tipo de cables existen pequeños conductores en "tubo" de aluminio, los cuales tienen mejores modos o características mecánicas. Se utilizan para el tendido de redes troncales y de distribución a los usuarios. Existen cuatro medidas básicas cuyas denominaciones son: .412, .500, .750 y 1", que corresponden a la medida del diámetro del conductor externo en pulgadas. Los mismos también emplean un mensajero para el tendido aéreo.

2.6.3 Fibra óptica

La fibra óptica son filamentos de vidrio (compuestos de cristales naturales) o plástico (cristales artificiales), del espesor de un pelo (entre 10 y 300 micrones). En la Figura 12 se ve cómo se transmite información en forma de haces de luz que realmente pasan a través de ellos de un extremo a otro, donde quiera que el filamento vaya (incluyendo curvas y esquinas) sin interrupción. Las fibras ópticas pueden ahora usarse cómo los alambres de cobre convencionales, tanto en pequeños ambientes tales cómo sistemas de procesamiento de datos, cómo en grandes redes geográficas.

Figura 12. Procesos de la reflexión interna en la fibra óptica.



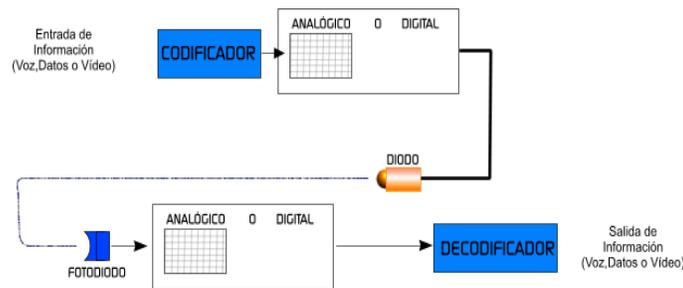
Fuente: RODRIGEZ, Gregorio. Fibra óptica. [En línea]. Venezuela: s.n, 2007. <Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos12/fibra/fibra.shtml>> [consulta: 20 May. 2012]

Una fibra óptica es un filamento de vidrio que consta de un núcleo y un recubrimiento. El recubrimiento tiene un índice de refracción ligeramente menor que el núcleo, permitiendo así la reflexión total interna.

Las fibras se clasifican en dos tipos: las fibras multimodo, con un diámetro típico de 100 μm , permiten la propagación de haces luminosos bajo diferentes ángulos, cada cual con una velocidad de propagación distinta que impide su empleo en comunicaciones de larga distancia. Las fibras monomodo tienen un diámetro menor que 10 μm que sólo permite una vía de propagación para los haces luminosos.

En la Figura 13 se presenta cómo la transmisión por fibra óptica convierte una señal eléctrica en una óptica, que puede estar formada por pulsos de luz (digital) o por un haz de luz modulado (analógica). La señal saliente del transmisor, se propaga por la fibra hasta llegar al receptor, el cual convierte la señal nuevamente a eléctrica.

Figura 13. Diagrama de bloques de un sistema de transmisión empleando fibra óptica.



Fuente: ETSII, Antonio. Herramientas web para la enseñanza en protocolo de comunicación. [En línea]. Barcelona: s.n, 2007. <Disponible en: <http://neo.lcc.uma.es/evirtual/cdd/tutorial/fisico/fibra.html>> [consulta: 6 julio. 2012]

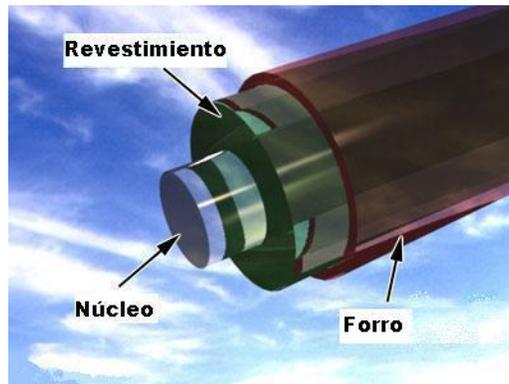
La importancia de los sistemas de comunicaciones ópticas se debe a:

Su baja atenuación, por ejemplo en 3ª ventana (1550nm) la atenuación es de 0.2dB/km. Esto permite emplear enlaces de forma que cada 80 o 100 km coloquemos un amplificador o regenerador (por contra cuando se emplea un cable coaxial se necesita un regenerador o amplificador cada 2km). Su gran capacidad en comunicaciones ópticas, pueden alcanzar tasas de transmisión de 41THz·km. Por otra parte la fibra óptica es inmune a las interferencias electromagnéticas, son más seguras, pues la fibra óptica es más difícil de pinchar y no radia las señales que transmite al exterior, como pasa con el coaxial. También a menor tamaño y peso de la fibra óptica y su mayor flexibilidad que otros medios como lo cables coaxiales.

Los principales inconvenientes de la fibra óptica son: su elevado coste para aplicaciones en las que no se necesita tanta capacidad, no son adecuadas para sistemas de difusión y la gran delicadeza con la que hay que tratar la fibra óptica y demás componentes ópticos, pues requieren una gran limpieza y los conectores son muy sensibles.

Un cable de fibra óptica está compuesto por Figura 14: Un Núcleo, Un Revestimiento y una cubierta de plástico como se observa en la figura B.

Figura 14. Partes que compone la fibra.



Fuente: ETSII, Antonio. Herramientas web para la enseñanza en protocolo de comunicación. [En línea]. Barcelona: s.n, 2007. <Disponible en: <http://neo.lcc.uma.es/evirtual/cdd/tutorial/fisico/fibra.html>> [consulta: 6 julio. 2012]

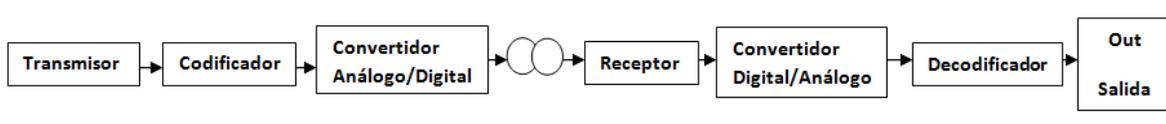
El núcleo (core), es la parte interior de la fibra, que está fabricado por un material dieléctrico, normalmente, vidrio de sílice (SiO_2) dopado con materiales como B_2O_3 , GeO_2 o P_2O_5 para ajustar su índice de refracción, aunque también se encuentran en el mercado fibras ópticas con el núcleo de plástico o cuarzo fundido.

El revestimiento (cladding), que envuelve al núcleo, fabricado con materiales similares al núcleo pero con un índice de refracción menor, para que se produzca el fenómeno de la reflexión total interna. Gracias a este fenómeno los rayos de luz que entran en la fibra hasta, cierto ángulo, quedan confinados en el núcleo de ésta siendo guiados por la fibra hasta el otro extremo.

La camisa o cubierta, generalmente fabricada en plástico que protege mecánicamente a los dos anteriores.

Las fibras ópticas se pueden utilizar tanto para transmisiones cortas, así como para transmisión de largo alcance. Convencionalmente, un pulso de luz indica un bit 1 y la ausencia de luz indica un bit 0. El detector genera un pulso eléctrico cuando la luz incide en él. Éste sistema de transmisión tendría fugas de luz y sería inútil en la práctica excepto por un principio interesante de la física. Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro, el rayo se refracta (se dobla) entre las fronteras de los medios.

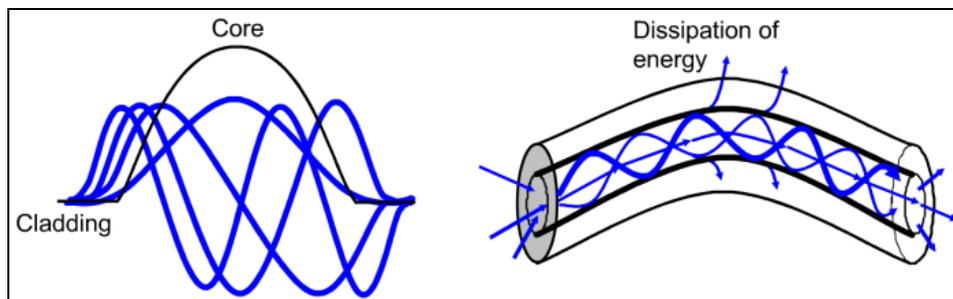
Figura 15. Transmisor y Receptor Óptico.



El grado de refracción depende de las propiedades de los dos medios (en particular, de sus índices de refracción). Para ángulos de incidencia por encima de cierto valor crítico, la luz se refracta de regreso; ninguna función escapa hacia el otro medio, de esta forma el rayo queda atrapado dentro de la fibra y se puede propagar por muchos kilómetros virtualmente sin pérdidas.

Las pérdidas por macro-curvatura se deben a que en la fibra multimodo muchos modos viajan a través del núcleo cerca del borde, haciendo que sea probable que escapen, especialmente si la fibra se dobla. En una fibra multimodo tradicional cuando el radio de curvatura disminuye los modos se escapan del núcleo como se observa en la Figura 16.

Figura 16. Fenómeno de flexión de las fibras ópticas

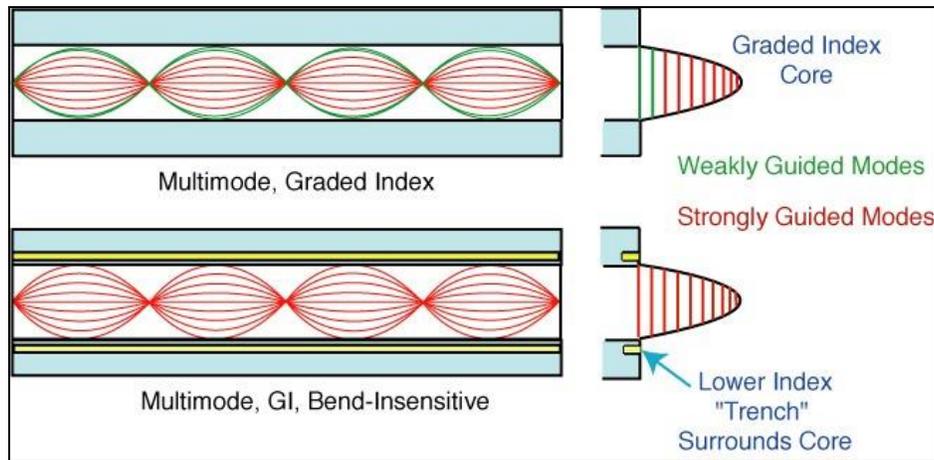


Fuente: La necesidad de Bend-Insensible fibra. 2012. [En línea].
<http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/what-is-bend-insensitive-fiber/>. [Consulta 30 de Marzo de 2012]

La fibra BIF tiene un rendimiento mejorado en las aplicaciones de curva reducida, empleando una apertura numérica ligeramente superior, comparado con la fibra mono-modo y ofrecen un mejor rendimiento de curvatura para aplicaciones en el rango de longitudes de onda entre 1310nm y 1550nm. Los fabricantes de fibra

óptica utilizan un perfil de índice de refracción en forma de "zanja", lo que significa un anillo de material de menor índice de refracción, para lograr un mayor confinamiento, esto se presenta en la Figura 17⁸.

Figura 17 Configuración de índice de refracción trinchera



Fuente: La necesidad de Bend-Insensible fibra. 2012. [En línea].

<http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/what-is-bend-insensitive-fiber/>. [Consulta 30 de Marzo de 2012]

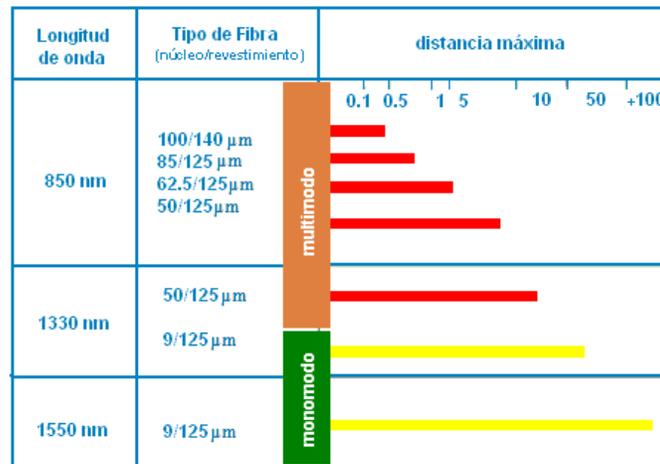
Esta zanja atrapa la energía de varios modos que se propagan dentro del núcleo de la fibra y mantiene la luz en el núcleo, incluso en los escenarios más difíciles de curvatura.

Por último desde el punto de vista de la propagación tenemos, las fibras Monomodo, fibra Multimodo, Fibra Monomodo Estándar, Fibra DSF, Fibra NZDSF, Fibras ópticas de Índice en escalón o de salto de índice y por ultimo Fibras Ópticas de índice gradual.

2.6.3.1 Fibra monomodo. Como su nombre indica en estas fibra sólo se propaga un modo por lo que se evita la dispersión modal, debida a la diferencia de velocidad de propagación de los modos que se transmiten por la fibra. Esto se debe al pequeño tamaño de su núcleo menor de $9\mu\text{m}$. Esto dificulta el acoplamiento de la luz, pero permite alcanzar mayores distancias y tasas de transmisión más elevadas que la fibra óptica multimodo.

2.6.3.2 Fibra multimodo. A diferencia de las anteriores, en ellas se pueden propagar varios modos de forma simultánea. El diámetro del núcleo de este tipo de fibras suele ser 50 μm ó 62.5 μm , por lo que el acoplamiento de la luz es más sencillo que las anteriores.

Figura 18 Distancias máxima de un enlace para distintos tipos de fibra óptica a distintas longitudes de onda [11]



Fuente: La necesidad de Bend-Insensible fibra. 2012. [En línea].

<http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/what-is-bend-insensitive-fiber/>. [Consulta 30 de Marzo de 2012]

Dentro de las fibras monomodo tenemos destacan tres tipos de fibra:

2.6.3.3 Fibra monomodo o estandar, conocida por sus siglas en inglés SMF (Standar Single Mode Fiber). Este tipo de fibra monomodo tienes como características más destacadas una atenuación de unos 0,2 dB/km y una dispersión cromática de 16 ps/km·nm en 3ª ventana (1550 nm). En la segunda ventana la dispersión nula es pero la atenuación es mayor, casi el doble que en 3ª ventana.

2.6.3.4 Fibra DSF (Dispersion Shifted Fiber). Las fibras DSF son fabricadas de tal manera que logran tener na dispersión cromática nula en la 3ª ventana. Por contra su atenuación aumenta ligeramente (unos 0.25Db/km); y su principal inconveniente se debe a los efectos no lineales como el fenomeno de mezclado

de cuarta onda (FWM) que imposibilitan la utilización de esta fibra óptica en sistemas WDM.

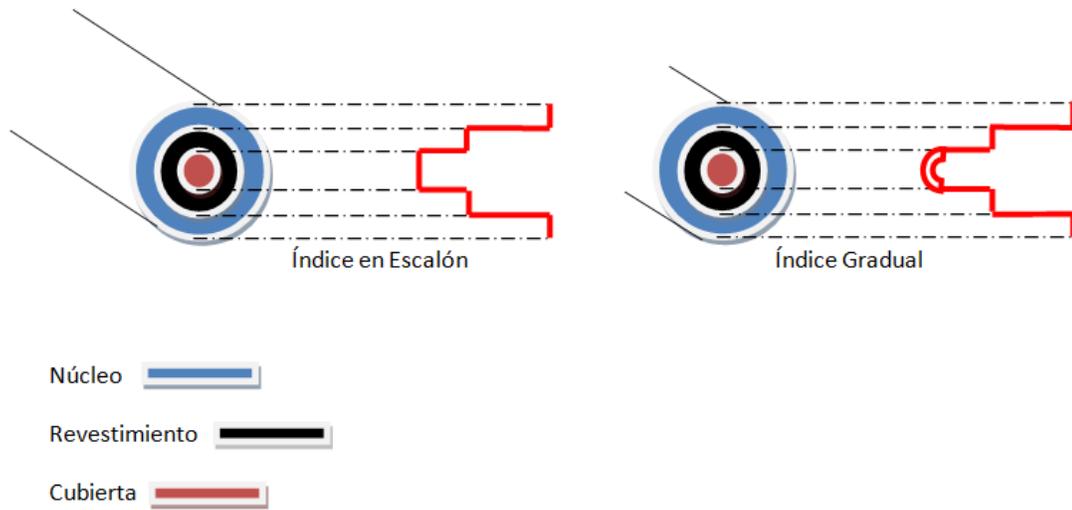
2.6.3.5 Fibra NZDSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber). Para resolver los inconvenientes de la fibra anterior, surge la fibra NZDSF. Estas tienen un valor de dispersión próximo a cero pero, no nulo, para lograr contrarrestar los efectos de los fenómenos no lineales mediante la dispersión cromática.

Dentro de las fibras multimodo tenemos dos tipos de fibra según su índice de refracción tenemos, figura 18:

2.6.3.6 Fibras ópticas de índice en escalón o de salto de índice. En este tipo de fibras el índice de refracción del núcleo y del revestimiento son uniformes, siendo el índice de refracción del núcleo sensiblemente mayor, por lo que el cambio de índice de refracción al pasar de una zona a otra cambia bruscamente, de ahí su nombre.

2.6.3.7 Fibras ópticas de índice gradual. En este tipo de fibras el índice del núcleo varía gradualmente desde el centro del núcleo hasta el revestimiento. Con este tipo de fibras se reduce la dispersión modal ya que con ellas se consigue reducir la diferencia de caminos que recorren los distintos modos que se propagan por la fibra.

Figura 19. Perfiles de índice de refracción



Existe un tipo de fibras ópticas cuyo núcleo se construye con materiales plásticos, estas son las fibras ópticas de plástico, POF (Plastic Optical Fiber) . Su núcleo tiene un diámetro del orden de 1mm. Tienen una atenuación de entre 0,15dBm a 650 nm, por lo que se emplean en aplicaciones de cortas distancias (en automoviles, en oficinas) empleando un LED rojo como transmisor. Su ancho de banda muy reducido debido a su gran apertura numérica. Sus principales ventajas son su reducido coste, su fácil manejo e sencillos y una mayor robustez (las pérdidas debidas a su curvatura son muy bajas con radios de hasta 25mm, lo que facilita su instalación en paredes y lugares estrechos).

Existe una normativa que establece un color determinado para el cable según el tipo de fibra:

Naranja → Fibra Multimodo
Amarillo → Fibra Monomodo

2.6.4. Acopladores Ópticos

Los acopladores (o acopladores direccionales) son componentes pasivos. Éstos operan en el dominio óptico y se emplean en la distribución y combinación de señales, la realización de multiplexación y demultiplexión por longitud de onda, la construcción de otros componentes ópticos y la monitorización de sistemas.

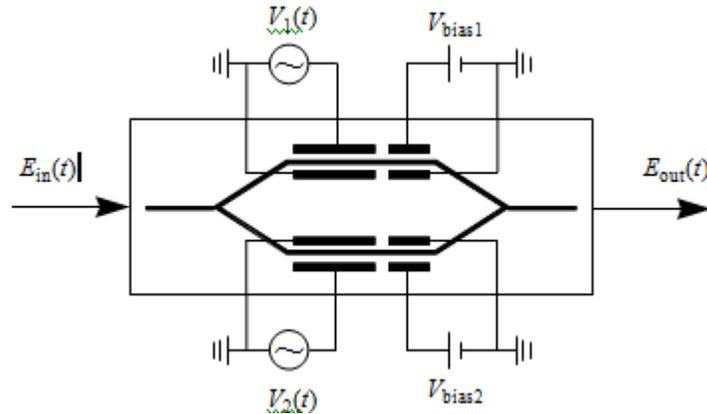
Las configuraciones en que se presentan estos dispositivos son:

- **Acopladores:** estructura con N puertos de entrada y N de salida (con $N = 2$). Este dispositivo divide el campo que entra por uno de los puertos de entrada entre los 2 terminales de salida.
- **Divisores (splitter) y taps :** estructura con 1 puerto de entrada y 2 puertos de salida. La diferencia entre un splitter y un tap es el elevado coeficiente acoplamiento en este último.
- **Combinadores :** estructura con 2 puertos de entrada y 1 de salida (misma estructura que un splitter pero al revés).

2.6.5 Interferómetro de Mach-Zender

La estructura básica de un interferómetro de Mach-Zender (MZI, Mach-Zender Interferometre), figura 19, consta de dos acopladores direccionales de 3dB (un splitter y un combinador con $\alpha = 0.5$) interconectados mediante dos caminos de diferentes longitudes, siendo la diferencia Δl . La señal introducida por una de las entradas se divide en dos replicas iguales al atravesar el splitter . Debido a la diferencia de caminos se introduce un desfase en una de las réplicas. Dependiendo de la longitud de onda de la señal se tendrá una interferencia constructiva o destructiva a la salida al combinarse las señales.

Figura 20. Mach-Zender



Las utilidades de este dispositivo dependen del número de puertos de entrada y salida. Normalmente se emplea como filtro si tiene una entrada y una salida; como multiplexor si tiene dos entradas y una salida; y como demultiplexor si tiene una entrada y dos salidas.

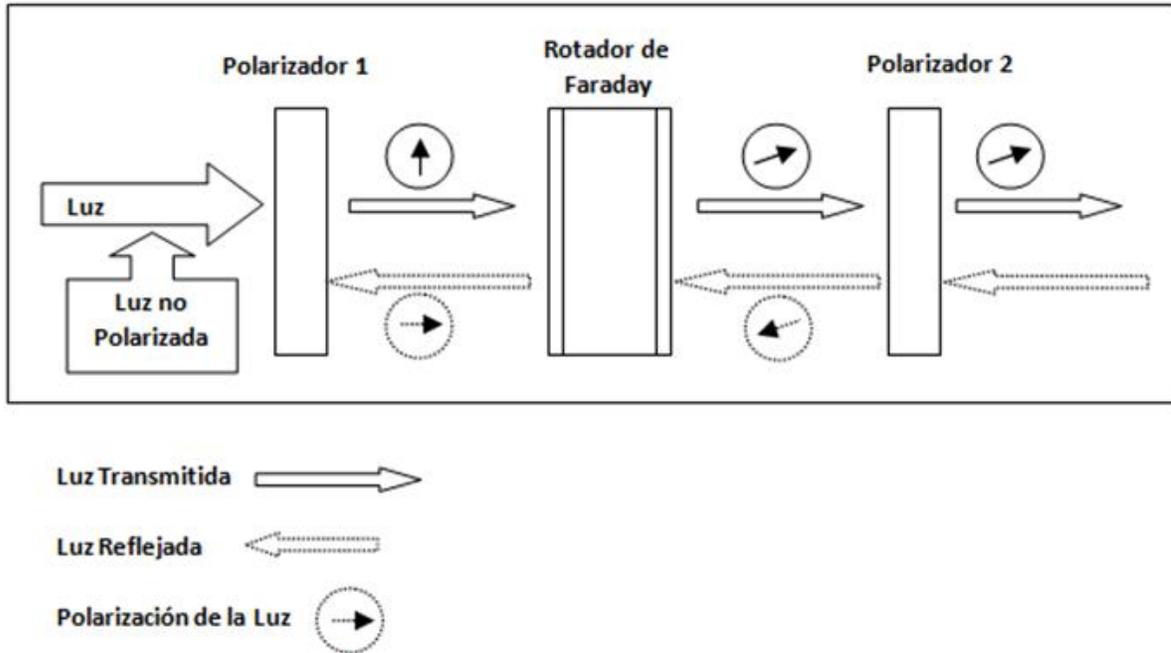
2.6.6 Aislador Óptico

Los aisladores ópticos son dispositivos que transmiten la luz en una única dirección. Éstos son muy importantes en los sistemas de comunicaciones ópticos para evitar que las reflexiones de las señales alcancen a otros dispositivos y puedan dañarlos, como por ejemplo a los láseres.

La siguiente figura muestra un esquema con el funcionamiento de este dispositivo. Como se observa la luz puede entrar al dispositivo tanto por la derecha como por la izquierda. La luz de entrada no está polarizada por lo que al encontrarse el primer polarizador sólo pasará la polarización vertical. Luego, el rotador de Faraday gira 45° a la derecha la polarización de la luz que lo atraviese independientemente de la polarización de ésta. El segundo polarizador transmite la luz cuya polarización esté 45° desplazada hacia derecha respecto de la vertical. Como este es el caso la luz sale del aislador. Si se considera el caso de que la señal entre por la derecha del aislador óptico, como se ve esta no saldrá por el

otro extremo ya que el polarizador número 1 transmite la luz polarizada verticalmente y la señal llega a éste con polarización horizontal, por lo que queda bloqueada [11].

Figura 21. Aislador óptico



2.6.7 Filtros Ópticos

Existen una gran variedad de dispositivos ópticas que pueden trabajar como filtros. Un filtro óptico es un dispositivo capaz de seleccionar una banda de longitudes de onda y de eliminar el resto. Las principales aplicaciones de los filtros ópticos, que lo convierten en un dispositivo clave en los sistemas de comunicaciones ópticas son:

- La eliminación del ruido, introducido por ejemplo por los amplificadores ópticos.
- La ecualización de la respuesta de los amplificadores ópticos

- La selección de canales en sistemas WDM.

Para realizar estas aplicaciones de forma óptima estos dispositivos deben tener unas pérdidas de inserción reducidas. Idealmente, su banda de paso debe ser plana para evitar así la distorsión de la señal. Además la banda de transición de su respuesta debe ser abrupta para evitar la diafonía (cross-talk) con los canales próximos. También es necesario que su comportamiento sea independiente de la polarización de la señal.

2.6.8 Detector Óptico

Los receptores ópticos transforman las señales ópticas en señales eléctricas, en concreto es el fotodetector el encargado de esta transformación.

El receptor consta de: Un filtro óptico, encargado de eliminar ruido y de seleccionar el canal adecuado. Un fotodetector, elemento encargado de generar una corriente eléctrica proporcional a partir de una potencia óptica. Un amplificador front-end , que amplifica la señal eléctrica decisora, que decide cuando se está recibiendo un "1" o un "0". Los fotodetectores más útiles son los basados en semiconductores. Los fotodiodos más adecuados ya que con ellos es más sencillo lograr tener fotodetectores con una sensibilidad alta, una rápida respuesta, introducen poco ruido, tienen un bajo coste y una alta fiabilidad. Los más comunes son los fotodiodos p-i-n y los fotodiodos de avalancha.

2.6.9 Transmisor Óptico

Los emisores de luz para comunicaciones ópticas que existen son de dos tipos:

- Emisores de luz no coherente: los diodos de luz (LED).

- Emisores de luz coherente: los láseres, y en concreto, los láseres semiconductores.

En algunas aplicaciones se podrían usar indistintamente cualquiera de las dos fuentes, pero para situaciones con requisitos más exigentes, únicamente, los láseres dan una señal luminosa adecuada. Éstos emiten luz coherente, de gran intensidad y monocromática (el ancho de banda es muy estrecho y facilita el acoplamiento a las fibras ópticas). Además son modulables hasta frecuencias de gigahercios [15] [16].

Para entender los fundamentos de la radiación láser antes es necesario conocer varios conceptos, como son: los procesos de absorción y emisión de radiación y la inversión de la población.

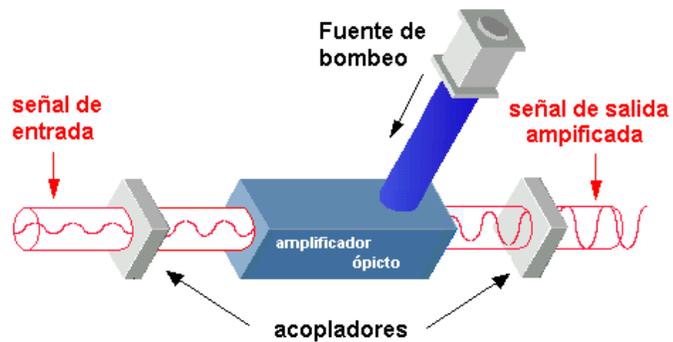
Absorción de la radiación: se produce cuando el electrón pasa del estado fundamental a un nivel energético más alto. Para poder pasar al estado excitado necesita absorber un fotón.

Emisión de la radiación: se produce cuando el electrón pasa del estado excitado al estado fundamental, desprende energía en forma de fotón, emite un fotón. Si el cambio de estado del electrón se produce de forma espontánea, sin que haya ninguna causa que lo propicie, entonces se produce luz normal y el fenómeno se conoce como emisión espontánea. Si el tránsito se produce por acción un fotón de igual energía que el electrón, estamos ante un proceso de emisión estimulada, donde el electrón al desprender energía lo hará en forma de otro fotón coherente con el primero [17] [18][19].

2.6.10 Amplificador Óptico

Cuando una señal se propaga por la fibra óptica se necesitan emplear regeneradores para amplificar la señal debido a los efectos de la atenuación y la dispersión, así como de la longitud máxima permitida para la fibra entre transmisor y receptor, que no alcanza para cubrir todo la distancia del enlace.

Figura 22. Modelo de amplificador Óptico



Fuente: Tutorial de comunicaciones ópticas. 2012. [En línea]. <http://nemesis.tel.uva.es>. [Consulta 15 de junio de 2012]

Estos dispositivos generan una réplica de la señal de entrada pero con mayor nivel de potencia, operando completamente en el dominio óptico. Además pueden emplearse en otros procesos como la conmutación, la demultiplexación, o bien en la conversión de longitud de onda, aprovechando su comportamiento no lineal. Las ventajas de estos dispositivos frente a los regeneradores:

- Funcionamiento independiente del tipo de modulación de la señal.
- Tiene un amplio ancho de banda, por lo que amplifica varias longitudes de onda simultáneamente.

- Mayor simplicidad y por tanto menor probabilidad de fallos y menor coste que los regeneradores.
- Permiten emplear reflectómetros ópticos para el testeo y supervisión de las líneas de fibra óptica.
- Pueden ser integrados.

Las limitaciones más importantes que supone su empleo son:

- Introducen un ruido adicional que es amplificado junto con la señal.
- Al no regenerar la señal se produce un efecto acumulativo de la dispersión.
- Su ancho de banda es finito por lo que limita el número de canales en los sistemas WDM.
- Su ganancia no es uniforme en todo el rango de amplificación, por lo que debe ser ecualizada.

2. EFECTO NO LINEAL FOUR-WAVE MIXING O MEZCLADO DE CUARTA ONDA (FWM) EN LA RED OPTICA

El hecho de asumir que los sistemas de comunicaciones ópticas se comportan linealmente es una aproximación adecuada cuando se opera a unos niveles de potencia moderados (unos pocos mW) y a velocidades de transmisión que no superen los 2.5 Gbps. Sin embargo, a velocidades (10Gbp/s) o potencias superiores ya empiezan a ser importantes los efectos de las no linealidades, y en el caso de sistemas WDM estos efectos son importantes incluso con potencias y

velocidades de transmisión moderadas, condicionando el número de canales del sistema y la separación entre ellos. Es importante analizar los fenómenos a una tasa de 2.5 Gbps porque es una tasa comercial al cual todavía se trabaja para industria, y sería bueno identificar y mejorar patrones de ineficiencia.

Las no linealidades se pueden clasificar en dos categorías:

- Las que se producen debido a la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo (también conocido como efecto Kerr) aplicado, que a su vez es proporcional al cuadrado de la amplitud: modulación de autofase (SPM), modulación de fase cruzada (CPM) y la mezcla de cuarta onda (FWM).
- Las que se producen por efectos de scattering en la fibra, debido a la interacción de las ondas de luz con los fonones (vibraciones moleculares) en el silicio: scattering estimulado de Raman (SRS) y el scattering estimulado de Brillouin (SBS) [35].

La respuesta de cualquier dieléctrico a campos electromagnéticos intensos es una respuesta no lineal. Por lo tanto, al aplicar un campo eléctrico E a una fibra óptica, aparece un campo de polarización inducida P que resulta no ser lineal con el campo E . En condiciones de homogeneidad, isotropía, pero no linealidad, este campo P se puede expresar como [35]:

$$P_{(r,t)} = P_L(r,t) + P_{NL}(r,t), \quad (1)$$

Donde $P_L(r,t)$ corresponde a la polarización en condiciones de linealidad y $P_{NL}(r,t)$ se denomina polarización no lineal, que como su nombre indica surge debido a las condiciones de no linealidad. Además se cumple que [35]:

$$P_{NL}(r,t) = \epsilon_0 c^{(3)} E^3(r,t), \quad (2)$$

Donde $c^{(3)}$ recibe el nombre de susceptibilidad no lineal de tercer orden. La susceptibilidad no lineal de segundo orden $c^{(2)}$ no se tiene en cuenta por carecer de importancia en materiales con simetría molecular como es el caso del SiO_2 .

Puesto que el índice de refracción está relacionado con la susceptibilidad por la ecuación [42]:

$$\hat{n}(E) = n + \frac{3}{8n} X^{(3)} E^2, \quad (3)$$

La polarización no lineal es la causante de que el índice de refracción llegue a depender de la intensidad del campo dando lugar a efectos no lineales como el SPM, CPM o FWM. Por otra parte, en los efectos de scattering, un fotón de la onda incidente desaparece para dar lugar a un fotón de frecuencia inferior y un fonón con la energía y el momento adecuado. De este forma, a medida que la onda incidente se propaga por la fibra, pierde potencia que va a para a otra onda llamada onda Stokes. En general, los fenómenos de scattering se caracterizan por un coeficiente de ganancia g , y una potencia umbral a partir de la cual los efectos comienzan a ser notables [40].

La FWM es un fenómeno por el cual cuando se propagan varias ondas a frecuencias $w_1, w_2 \dots w_n$, donde la dependencia con la intensidad del índice de refracción no sólo induce a desplazamientos de fase dentro de cada canal sino también a la aparición de nuevas ondas a frecuencias $w_i \pm w_j \pm w_k$. Entre estas señales, las más problemáticas son las que corresponden a:

$$w_{ijk} = w_i + w_j - w_k, \text{ con } i \text{ y } j \text{ distintos de } k$$

Porque para medios en los que la dispersión no es nula el resto de ellas puede despreciarse debido a la carencia de concordancia de fase. Para comprender los efectos de la FWM se puede considerar un sistema WDM con tres canales donde el campo eléctrico es de la forma [35]:

$$E(z,t) = \sum_{i=1}^3 E_i \cos(w_i t - \beta_i z) \quad (4)$$

$$w_{ijk} = w_i + w_j - w_k, \quad i,j,k=\{1,2,3\} \text{ con } i \text{ y } j \text{ distintos de } k$$

Aún en presencia de dispersión, pueden llegar a satisfacer la condición de concordancia de fase por tener una constante de propagación casi constante para esas frecuencias, sin embargo el resto de componentes no la satisfarán, y por lo tanto podrán desprejarse. Teniendo en cuenta las pérdidas en la fibra, la potencia de estas nuevas ondas generadas debido al efecto FWM [42][45][46], será de:

$$P_{ijk} = \left(\frac{w_{ijk} \bar{n} d_{ijk}}{3 * c * A_e} \right)^2 * P_i * P_j * P_k * Z_e^2 e^{-\alpha z} \quad (5)$$

Donde d_{ijk} es un factor de degeneración cuyo valor es 3 cuando $i=j$, y de valor 6 cuando i es distinto de j .

De entre los distintos dispositivos fotónicos utilizados para inducir FWM, las fibras ópticas son uno de los más estudiados. Como se ha comentado en la introducción, para que el proceso de generación sea eficiente, es necesario trabajar cerca de la longitud de onda de dispersión nula. Por ello, las fibras de dispersión desplazada se convierten en el principal candidato. A continuación pasaremos a estudiar las características del FWM en estos dispositivos. El proceso de FWM en fibras ópticas ha sido extensamente estudiado [30, 31, 39, 46]. Su origen se debe a que la polarización inducida en el medio no es lineal con respecto al campo aplicado, sino que contiene un término no lineal cuya magnitud depende de la susceptibilidad no lineal de tercer orden, $\chi^{(3)}$, de acuerdo a [31]

$$P_{NL} = \epsilon_0 \chi^{(3)} * E \quad (6)$$

Donde E es el campo eléctrico, P_{NL} es la polarización no lineal inducida y ϵ_0 es la permitividad del vacío. Ahora Considerando cuatro ondas ópticas oscilando a frecuencias w_1, w_2, w_3 y w_4 linealmente polarizadas a lo largo del mismo eje x , el vector campo eléctrico total puede escribirse como:

$$E = \hat{x} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 E_i \exp [j(w_i t - k_i z)] + c \quad (6)$$

$$\text{Donde: } k_i = \frac{\tilde{n}_i w_i}{c}$$

Siendo \tilde{n} el índice de refracción de la onda i -ésima, y se supone que todas las ondas se propagan en la misma dirección z . Si a continuación sustituimos (5.2) en la ec. (5.1) y expresamos P_{NL} de la forma [43]:

$$P_{NL} = \hat{x} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 P_i \exp [j(w_i t - k_i z)] + c \quad (7)$$

Se encuentra que P_i para $i = 1 \dots 4$, consiste en un gran número de términos que involucran productos de tres campos eléctricos. Por ejemplo, P_4 puede expresarse como [43]:

$$P_4 = \frac{3\epsilon_0}{4} x \{ [|E_4|^2 + 2(|E_2|^2 + |E_3|^2)] E_4 + 2E_1 E_2 E_3 \exp(j\theta_+) + 2E_1 E_2 E_3 \exp(j\theta_-) + \dots \} \quad (8)$$

Donde $x = \frac{3n_0}{8} N_2$ y las fases se calculan como [43]:

$$\theta_+ = (w_1 + w_2 + w_3 - w_4)t - (k_1 + k_2 + k_3 - k_4)z, \quad (9)$$

$$\theta_- = (w_1 + w_2 - w_3 - w_4)t - (k_1 + k_2 - k_3 - k_4)z, \quad (10)$$

El término proporcional a E_4 es responsable de los fenómenos de SPM y XPM, mientras que los restantes términos son responsables del FWM. La eficiencia de estos términos depende de la fase relativa entre E_4 y P_4 , dada por θ_-, θ_+ , o un ángulo similar. Un FWM significativo ocurre si la fase relativa se anula prácticamente, lo cual requiere la coincidencia de las frecuencias

además de los vectores de onda. Este requerimiento se le conoce habitualmente con el nombre de coincidencia de fase (phase matching).

En términos de mecánica cuántica, el FWM ocurre cuando los fotones de dos o más ondas son destruidos y se crean nuevos fotones a frecuencias diferentes, de tal forma que la energía y momento netos se conservan durante la interacción paramétrica. La principal diferencia entre los procesos paramétricos y los procesos de scattering estimulado es que la condición de fase se satisface automáticamente en el caso del scattering estimulado de Raman o de Brillouin, como consecuencia de la participación activa del medio no lineal. Por el contrario, la condición de fase requiere una elección adecuada de las frecuencias e índices de refracción para que los procesos paramétricos ocurran.

Ahora, existen dos tipos de términos de FWM. El primero de ellos corresponde al caso en el cual tres fotones transfieren su energía a un único fotón de frecuencia $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3$. Este término es responsable del fenómeno conocido como generación de tercer armónico cuando $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$, o conversión de frecuencia a la onda $2\omega_1 + \omega_3$ cuando $\omega_1 = \omega_2 \neq \omega_3$.

En general, resulta difícil satisfacer la condición de fase para que estos procesos ocurran con altas eficiencias en fibras ópticas, por lo que desde este momento nos referiremos con FWM al segundo de los términos. Este último término corresponde al caso en que dos fotones de frecuencias ω_1 y ω_2 desaparecen junto con la creación simultánea de dos fotones a frecuencias ω_3 y ω_4 tales que [42]:

$$\omega_3 + \omega_4 = \omega_1 + \omega_2, \quad (11)$$

La condición de fase para que este proceso ocurra es $k = 0$, donde:

$$\Delta k = k_1 + k_2 - k_3 - k_4 = \frac{\tilde{n}_1 \omega_1 + \tilde{n}_2 \omega_2 - \tilde{n}_3 \omega_3 - \tilde{n}_4 \omega_4}{c}, \quad (12)$$

Sin embargo, resulta relativamente fácil de satisfacer $\Delta k = 0$ en el caso particular en que $w_1 = w_2$, en lo que se conoce como FWM parcialmente degenerado (PDFWM, partially degenerate FWM). Físicamente, se manifiesta de forma similar al scattering estimulado de Raman. Una fuerte onda de bombeo a frecuencia w_1 crea dos bandas laterales localizadas de forma simétrica a las frecuencias w_3 y w_4 , con un desplazamiento de frecuencia dado por [45]:

$$\Omega_S = w_1 - w_3 = w_4 - w_1, \quad (13)$$

Donde se ha supuesto por definición $w_3 < w_4$. De hecho, a la banda inferior de frecuencia w_3 y a la superior de frecuencia w_4 se les conoce como bandas de Stokes y anti-Stokes, respectivamente, en analogía con el scattering Raman.

Así pues, el PDFWM transfiere la energía desde una fuerte onda de bombeo a dos ondas desplazadas S de la frecuencia de bombeo w_1 . Si únicamente incide la onda de bombeo en la fibra y se satisface la condición de fase, entonces las ondas de Stokes y anti-Stokes a frecuencias w_3 y w_4 pueden generarse a partir de ruido de forma similar a los procesos de scattering estimulado. Por otra parte, si también se inyecta una señal débil a w_3 junto con el bombeo, la señal se amplifica y una nueva onda a w_4 se genera simultáneamente. La ganancia responsable de dicha amplificación se conoce con el nombre de ganancia paramétrica.

3.1 Scattering Estimulado de Efecto Raman (FWM)

En general el scattering de la luz se produce por fluctuaciones de las propiedades ópticas del material (por ej. de densidad que dan lugar a fluctuaciones de índice), Si las fluctuaciones están originadas por el mismo haz de luz hablaremos de Scattering estimulado y se tratará de un mecanismo óptico no lineal. Mecanismos más importantes: Scattering Raman y Brillouin por vibraciones

ópticas o acústicas de frecuencia Ω de la red o las moléculas del material respectivamente [35].

La frecuencia de la onda esparcida se modifica:

$\omega_S = \omega - \Omega$ Componente Stokes

$\omega_A = \omega + \Omega$ Componente Anti-Stokes

A veces se clasifican los mecanismos ópticos no lineales en:

- Elásticos: sin pérdida de energía por la luz como por ejemplo, las no linealidades paramétricas

- Inelásticos: hay transferencia de energía óptica a la red.

Se generan fonones ópticos o acústicos como por ejemplo, el esparcimiento Brillouin o Raman estimulados. El SRS es un efecto de banda ancha mediante el cual si se introducen en una fibra dos o más señales a diferentes longitudes de onda se producen una transferencia de potencia de la señal de mayor frecuencia a la de menor frecuencia. Además el acoplo de potencia se puede producir tanto en el sentido de la propagación de las señales como en el sentido inverso, siempre y cuando en ese momento haya presencia de potencia en los dos canales.

La interacción entre la onda incidente y la onda Stokes (onda a la que se le transfiere la potencia) está gobernada por la siguiente pareja de ecuaciones [39]

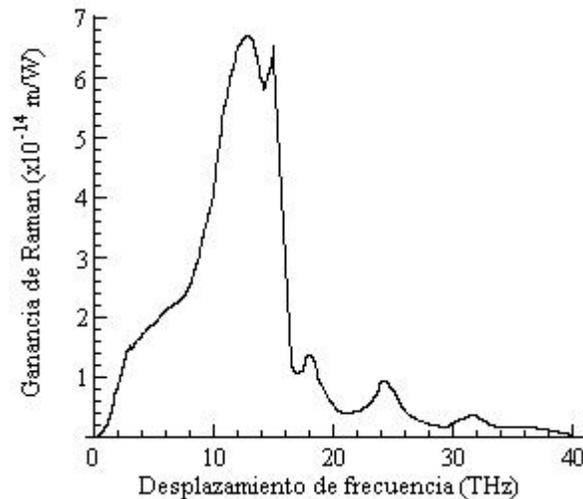
$$\frac{dI_S}{dz} = g_R I_P I_S - \alpha_S I_S, \quad (14)$$

$$\frac{dI_P}{dz} = -\frac{w_P}{w_S} g_R I_P I_S - \alpha_P I_P, \quad (15)$$

Donde I_P es la intensidad de la onda incidente, I_S es la intensidad de la onda Stokes, los términos α_P y α_S son los coeficientes de absorción de la onda incidente y Stokes respectivamente y g_R es el coeficiente de ganancia de Raman,

que depende de la composición del núcleo de la fibra. En la siguiente figura se puede ver el coeficiente g_R para una fibra de silicio en función del desplazamiento de frecuencia a una longitud de onda $\lambda_P=1550$ nm.

Figura 23 Representación del coeficiente de ganancia de Raman en una fibra de silicio en función de la longitud de onda



Lo más destacable de la ganancia de Raman es que se extiende a lo largo de un gran rango de frecuencias (hasta 40 THz.), y para una longitud de onda de $\lambda_P=1550$ nm, y alcanza un valor máximo aproximado de $6.67 \cdot 10^{-14}$ m/W para un desplazamiento de frecuencia de aproximado de 13.2 THz [38].

Por otra parte en el SRS existe una potencia umbral que se define como la potencia de la onda incidente para la cual las dos ondas, incidente y Stokes, tienen a la salida de la fibra la misma potencia. Según [44] y [40], una buena aproximación para esta potencia umbral es:

$$P_{Umbral} = 16 * b \frac{A_s}{L_e g_R}, \quad (16)$$

Donde L_e es la longitud efectiva de la fibra, y b puede tomar un valor entre 1 y 2 dependiendo de las polarizaciones relativas de la onda incidente y Stokes. El

peor de los casos será para $b=1$ ya que entonces la potencia umbral será la menor posible. Por ejemplo, asumiendo $b=1$, un valor típico de la potencia umbral para una onda incidente a $\lambda=1550$ nm, es de 600 mW.

Del mismo modo, también existe una potencia umbral para la onda Stokes que se puede generar en el sentido opuesto al de la propagación de la onda incidente, y la expresión es similar, sin más que sustituir el valor 16 por 20. Como el umbral para el SRS hacia delante se alcanza antes que el umbral para el SRS hacia atrás, esa es la razón por la cual éste último no se suele tener tanto en cuenta en el estudio de los sistemas de comunicaciones ópticas.

Por último cabe destacar que para reducir los efectos de la SRS conviene reducir al máximo el espaciado entre canales y a ser posible no superar la potencia umbral.

3.2 Análisis del (FWM) en la fibra.

Ahora consideremos la propagación del proceso de FWM en una SMF. Utilizando notaciones similares a las de [45], los campos eléctricos de las cuatro ondas pueden escribirse como:

$$E_j = A_j(z)F_j(x, y)\exp[j(\omega_j t - k_j z)], \text{ Donde } j = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (17)$$

Donde $F_i(x, y)$ son funciones de onda que describen la distribución transversal de cada onda en la fibra. A_1 y A_2 representan las ondas de bombeo, mientras que A_3 es la señal de entrada y A_4 la señal conjugada generada por FWM. Obsérvese que A_i no depende del tiempo, dado que se está analizando el caso de onda continua (sin modulación).

En el análisis se supondrá que las cuatro frecuencias se encuentran cerca del punto de dispersión nula de la SMF. No obstante, el espaciado entre las

cuatro ondas se supone lo suficientemente grande como para que sólo se induzca FWM, mientras que procesos de mezclado de orden superior entre las nuevas ondas generadas y las de entrada puedan despreciarse. Además, el análisis se realiza sin considerar el SPM o XPM. Esto se justifica en el caso de potencias de entrada moderadas, lo cual es cierto para diodos láser operando cerca de 1300 ó 1500 nm. En primer lugar, se analizará el caso de FWM no degenerado, donde las cuatro frecuencias se consideran distintas. Este proceso está gobernado por el siguiente sistema de ecuaciones de modos acopladas [47, 46]:

$$\frac{dA_1}{dz} = -j \frac{N_2 w_1}{c} 2f_{1234} A_2^+ A_3 A_4 \exp(j\Delta kz) - \frac{\alpha}{2} A_1, \quad (18)$$

$$\frac{dA_2}{dz} = -j \frac{N_2 w_2}{c} 2f_{2134} A_1^+ A_3 A_4 \exp(j\Delta kz) - \frac{\alpha}{2} A_2, \quad (19)$$

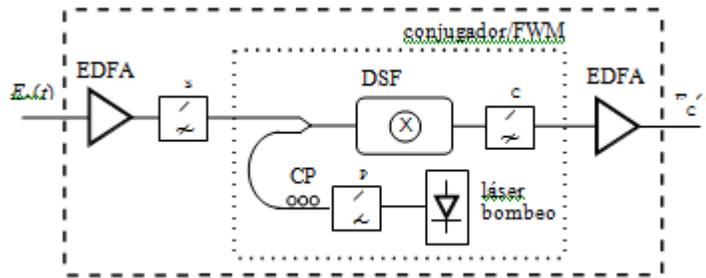
$$\frac{dA_3}{dz} = -j \frac{N_2 w_3}{c} 2f_{3412} A_1^+ A_2 A_4 \exp(j\Delta kz) - \frac{\alpha}{2} A_3, \quad (20)$$

$$\frac{dA_4}{dz} = -j \frac{N_2 w_4}{c} 2f_{4312} A_1^+ A_2 A_3 \exp(j\Delta kz) - \frac{\alpha}{2} A_4, \quad (21)$$

Donde las f_{ijkl} son constantes que describen el solapamiento de los modos en la SMF. Como se observa, los términos responsables del SPM y XPM se han descartado en (18) (21), al igual que los efectos dispersivos puesto que no existe modulación de las portadoras [48].

Para resolver (18) (21), se supondrá que $w_1 \approx w_2 \approx w_3 \approx w_4$ y que las constantes f_{ijkl} son iguales a $1/A_{eff}$ [48]. Además, se analizará el caso en el que se satisfaga la condición de fase, es decir, $\Delta k = 0$. Esto puede conseguirse fijando $w_1 - w_{ZD} = w_{ZD} - w_2$, donde w_{ZD} es la frecuencia de dispersión nula de la fibra. De ahí la importancia de trabajar cerca del punto de dispersión nula de la fibra, lo que conlleva en la práctica el uso de DSFs [49].

Figura 24 Diagrama de bloques de un dispositivo OPC basado en FWM en una configuración DSF.



La arquitectura de un dispositivo OPC basado en FWM en un medio no lineal se representa esquemáticamente en la figura 24. Aunque suelen formar parte del OPC otros componentes como EDFAs o filtros ópticos para reducir ASE, tal y como se mostraba en la figura 16, en este caso nos hemos centrado en los elementos indispensables para realizar el proceso de conjugación y consideraremos que el resto de componentes son externos al dispositivo [50].

La señal óptica de entrada al OPC se combina con la señal de bombeo de gran potencia para inducir efectos no lineales en el SOA o en la DSF. Para que el proceso de FWM se produzca con la máxima eficiencia es indispensable que ambas ondas presenten el mismo estado de polarización a la entrada del medio no lineal. Esto se consigue por medio de un controlador de polarización sobre la onda de bombeo cuando la polarización de la onda de señal es conocida y estable. Sin embargo, la polarización del campo eléctrico durante la propagación a través de las fibras ópticas varía aleatoriamente, de tal forma que no es posible conocer de antemano su estado a la entrada del OPC en un sistema real de compensación de dispersión. Estas variaciones aleatorias afectan significativamente a la eficiencia del proceso de FWM, haciendo que la técnica de inversión espectral no sea adecuada para aplicaciones reales. Afortunadamente, se ha investigado activamente en este tema y se han encontrado configuraciones de FWM insensibles a la polarización de la señal de entrada. Entre ellas se encuentran varios experimentos realizados

empleando técnicas de diversidad de polarización [53] o utilizando dos ondas de bombeo polarizadas ortogonalmente [51, 52]. Recientemente se han propuesto nuevas técnicas basadas en estructuras interferométricas Mach-Zehnder y SOAs [54] o interferómetros de Sagnac [56] que también consiguen este propósito. Sin embargo, una técnica que destaca por su simplicidad es la realizada en [53]. Consiste en FWM en una estructura construida completamente en fibra que utiliza láseres DFB con bombeos ortogonales, y consigue una dependencia con la polarización tan pequeña como 0,5 dB.

Además del problema de la polarización, el proceso de conjugación mediante FWM presenta otro efecto no deseado como es el desplazamiento de la portadora óptica. En este esquema de generación la longitud de onda de la señal conjugada aparece separada de la longitud de onda de la señal original en una cantidad dada por $2(SP)$. Este es un factor a tener en cuenta en los sistemas de compensación de dispersión mediante OPC, ya que las propiedades de propagación a través del segundo trayecto de fibra serán diferentesxiii, además de que reduce a la mitad el ancho de banda óptico de transmisión disponible [Lim99]. Para evitar este efecto se han propuesto distintas configuraciones basadas en el empleo de dos ondas de bombeo ortogonales [50,51,53]. En este caso, la longitud de onda de la señal conjugada viene dada por:

$$\lambda_c = \lambda_{P1} + \lambda_{P2} - \lambda_s, \quad (22)$$

Y situando las ondas de bombeo de forma simétrica con respecto a S se consigue que $\lambda_c = \lambda_s$. En [53], por ejemplo, se utilizan también dos ondas de bombeo para conseguir sintonizar la longitud de onda de la señal conjugada en una cierta región.

Otros métodos de inversión espectral sin desplazamiento de longitud de onda hacen uso de un PALM (parametric loop mirror) [54] o de un interferómetro de Sagnac [55], el cual además puede ser insensible a la

polarización de la señal de entrada como se ha dicho con anterioridad.

La eficiencia relativamente pequeña del proceso de conjugación en fibras ópticas merece una mención especial. Típicamente, la eficiencia de conversión se encuentra por debajo del 1%, siendo necesaria la amplificación posterior de la señal conjugada. Efectivamente, la pérdida de inserción del conjugador excede los 20 dB [57]. Sin embargo, el fenómeno de FWM no es inherentemente un proceso de baja eficiencia y puede, en principio, proporcionar ganancia [56]. De hecho, el análisis de las ecuaciones de FWM muestra que se incrementa considerablemente aumentando la potencia de bombeo a la vez que decrece la potencia de señal. Puede incluso exceder el 100 % optimizando los niveles de potencia y la diferencia entre las longitudes de onda de bombeo y de señal [56]. Pero suelen evitarse las altas potencias como consecuencia del SBS que ocurre cerca de los 10 mW. Si bien, éste puede suprimirse modulando la onda de bombeo a una frecuencia de ~ 100 MHz. En un experimento realizado en [57] se consigue una eficiencia de conversión del 35 % utilizando esta técnica.

4. ANALISIS Y RESULTADOS

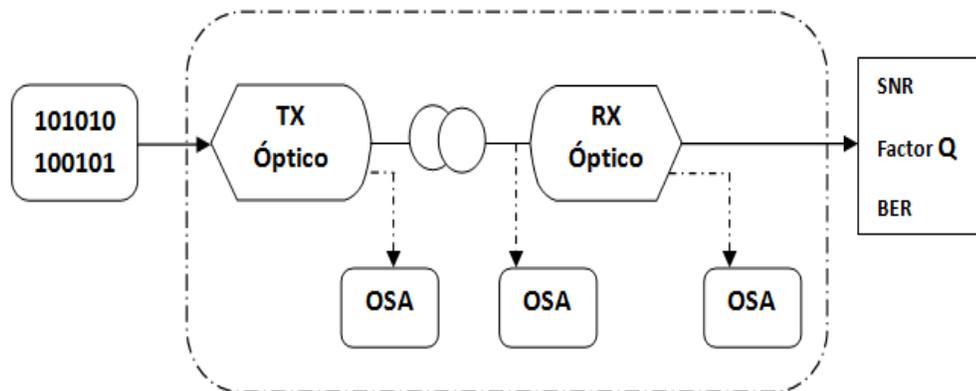
En este capítulo se pretenden desarrollar una serie de simulaciones donde se evaluará el comportamiento de la señal transmitida, partiendo de una breve explicación acerca de la topología de esta tecnología. Analizar el escenario de simulación para una señal de video con longitud de onda de 1450 nm, 1550 nm y 1650 nm de 20 a 200 km con la idea de analizar los efectos no lineales FWM, y el espectro de potencia que se genera, debido a la FWM, a la salida de una fibra óptica. Los valores implementados son longitudes de onda reales aplicadas a la transmisión de datos de video. La simulación en cierta parte considera un sistema formado por tres tonos diferentes de la tercera ventana de transmisión cuya potencia no sea superior a un watio. Por otra parte se analizara los

parámetros de relación señal a ruido, factor Q, diagrama de ojo y potencia Óptica en el enlace. Es importante mirar el comportamiento de fenómenos de no linealidad a estas distancias, ya que nos permiten identificar que tan robusta es el enlace y que podemos anticipar para el mejoramiento de la transmisión en un enlace de 1500 km (en investigación), mejorar el numero de repetidores, splitters, amplificadores, filtros, etc. Teniendo en cuenta estos análisis puedo determinar que tan eficaz es el enlace.

4.1 Modelo Físico de la Simulación

El diagrama de conexión del enlace óptico se presenta en la Figura 25, esta topología es igual al trabajo de tesis del estudiante Hugo ballesta y es un modelo de enlace óptico en donde se estudiarán los fenómenos de no linealidad FMW en la red óptica.

Figura 25 Enlace de red Óptica



En el enlace se emplearon longitudes de onda 1450 nm, 1550 nm y 1650 nm de 20 a 200 km. Los principales efectos en propagación que afecta al sistema son los fenómenos de no linealidad y la dispersión, los cuales depende de la tasa de bits, el ancho espectral de la fuente óptica y la longitud de la fibra óptica. El objetivo principal de las simulaciones es medir los parámetros de desempeño como son el BER, Factor Q, relación señal a ruido SNR y señal Óptica en el enlace, afectado

principalmente por la dispersión cromática, para diferentes tasas de bits y diferentes anchos espectrales, para distancias entre 20 km y 200 km en longitud de fibra. Las pruebas se realizaron con el detector PIN.

Para la propagación de la señal en el enlace óptico teniendo en cuenta el efecto no lineal FWM, se implementaron pruebas con tasas de 2.5 Gbps y 10 Gbps, suficiente para transmitir video a todos los usuarios de la red. Se realizaron pruebas con diferentes valores de ancho espectral (FWHM). El ancho espectral de la fuente óptica incide directamente en su costo.

Se empleó fibra tipo estándar de 20 km, 40 km, 60 km, 90 km, 120 km, 150 km, 170 km, 200 km de longitud y se realizaron pruebas con diferente número de usuarios en la red aplicando WDM.

En la Tabla 1 se presentan las pérdidas por división para diferentes valores de división óptica N.

Tabla 1 Pérdidas por usuario en una red Óptica

División óptica	PERDIDAS (dB)
2	3
4	6
8	9
16	12
32	15
64	18

A continuación se presenta el cálculo de los usuarios de la red óptica a simular. Se consideran las pérdidas por atenuación a través de la fibra, pérdidas por división óptica y un margen de pérdidas de 3 dB. Se emplea fibra tipo estándar y un coeficiente de atenuación de 0.22 dB/km. Asumiendo 20 dB de pérdidas para la fibra, se obtienen las pérdidas disponibles para división óptica:

$$20 \text{ dB} - 0.22 \left(\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right) 20 \text{ km} - 3 \text{ dB} = 12.6 \text{ dB} \quad (24)$$

Al observar la Tabla 2 el valor más cercano es 12 dB correspondiente a 16 usuarios.

Con el mismo, asumiendo 25 dB de pérdidas, se obtienen las pérdidas disponibles para división óptica:

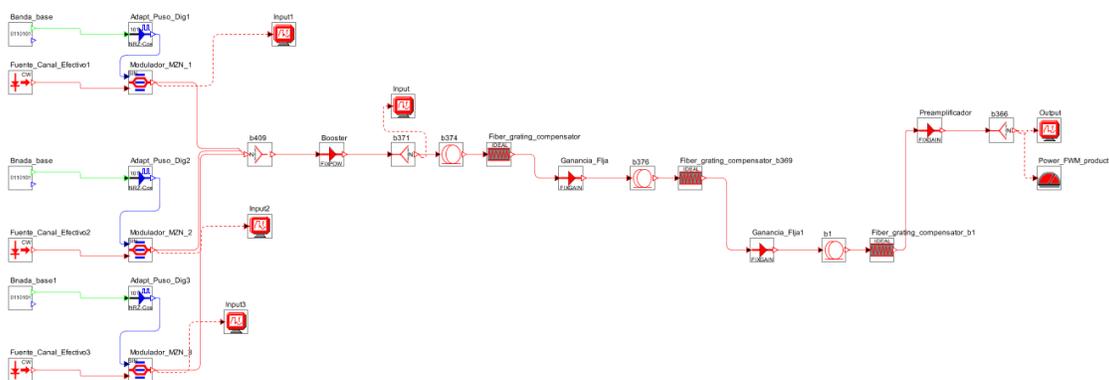
$$25 \text{ dB} - 0.22 \left(\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right) 20 \text{ km} - 3 \text{ dB} = 17.6 \text{ dB} \quad (23)$$

Al observar la Tabla 2 el valor más cercano es 18 dB correspondiente a 64 usuarios.

Teniendo en cuenta estos análisis nosotros podemos saber qué tipo de fibra se podría utilizar en tal caso, si queremos trabajar con distintos usuarios y cuál sería la optima para nuestro enlace óptico.

El simulador tiene disponibilidad de otros instrumentos de medida tanto ópticos como eléctricos. Entre los elementos ópticos se tiene: medidor de potencia, analizador de espectro y detector óptico. Para señales eléctricas se tiene: medidor de potencia, estimador de BER y scope eléctrico.

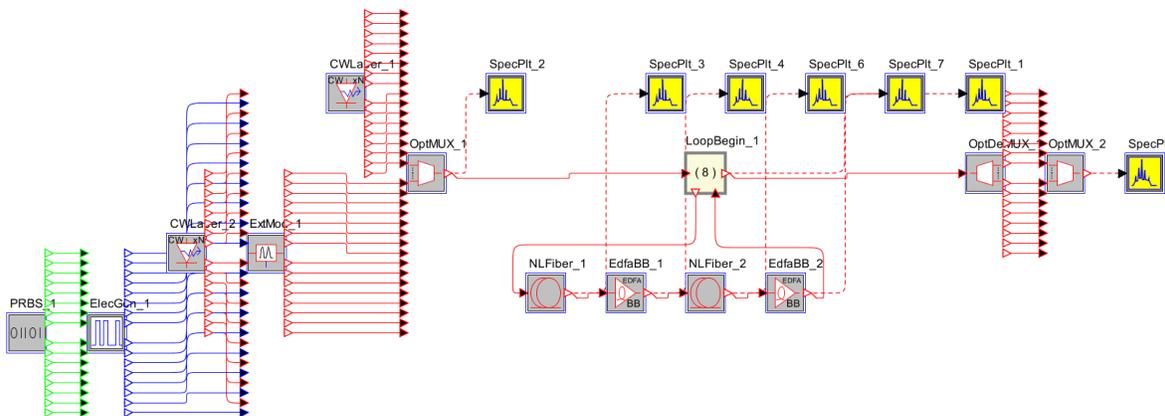
Figura 26 prueba de enlace para tres longitudes de onda.



En la figura 26 podemos analizar el enlace de prueba para las tres longitudes de ondas establecidas, pero la idea es que se implementen un rango amplio entre la longitud de onda mínima hasta la máxima, permitiendo tener mayor números de usuarios y visualizar que tan robusto se comporta.

Ahora mostraremos la simulación teniendo en cuenta 32 canales teniendo en cuenta los parámetros establecidos en un principio de longitudes de onda es decir desde 1450 nm hasta 1650 nm con una longitud principal de 1550 nm.

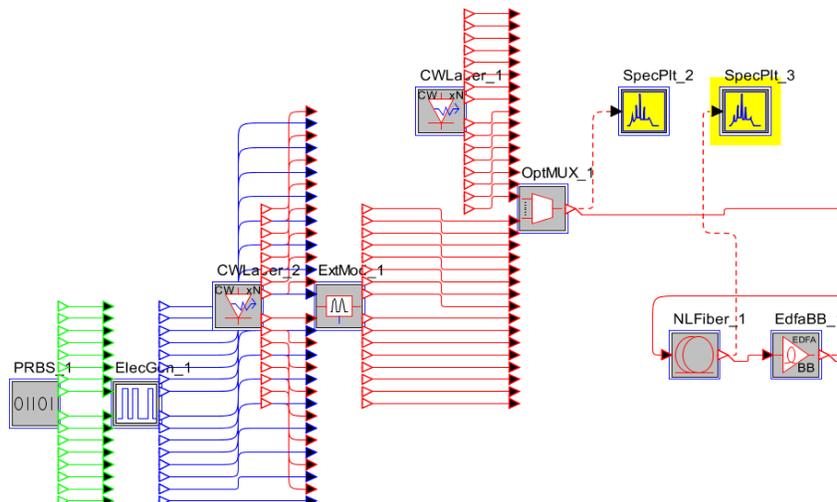
Figura 27 Enlace real con 32 canales



4.2 Simulación del Transmisor

El detalle de los componentes para el enlace óptico, se presenta en la Figura 28.

Figura 28 Componentes del OLT empleados en el enlace óptico.



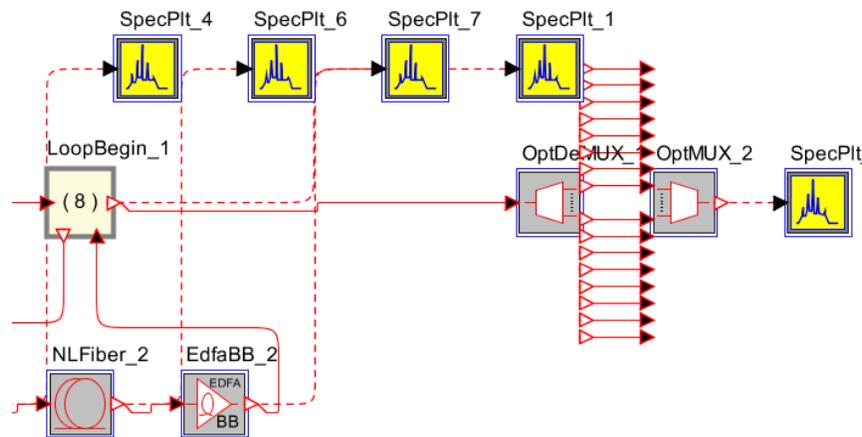
El transmisor del canal emplea un láser de onda continua con distribución espectral Lorentziana a una frecuencia central de 1550 nm, para la transmisión de video digital. Se realizaron simulaciones para datos a tasas de bits de 2.5 y 10 Gbps, que se ajustaron en el generador de secuencia pseudo-aleatorio. El video se ajustó cada una de estas tasas de velocidad.

Los parámetros empleados en los componentes del transmisor en las simulaciones se presentan en la Tabla 2. Las pruebas se realizaron empleando receptor tipo PIN. Se realizaron varias pruebas y se usó un valor de FWHM que permitiera obtener un adecuado nivel de BER.

Tabla 2 Datos usados en la simulación del enlace de fibra

Fotodetector	Velocidad de transmisión (Gbps)	Longitud de onda central (nm)	Potencia CW (mW)	FWHM Linewidth (MHz)
PIN	2.5	1550	10	6.2e1
	10	1550	10	6.7e2

Figura 29 Componentes para el receptor del enlace

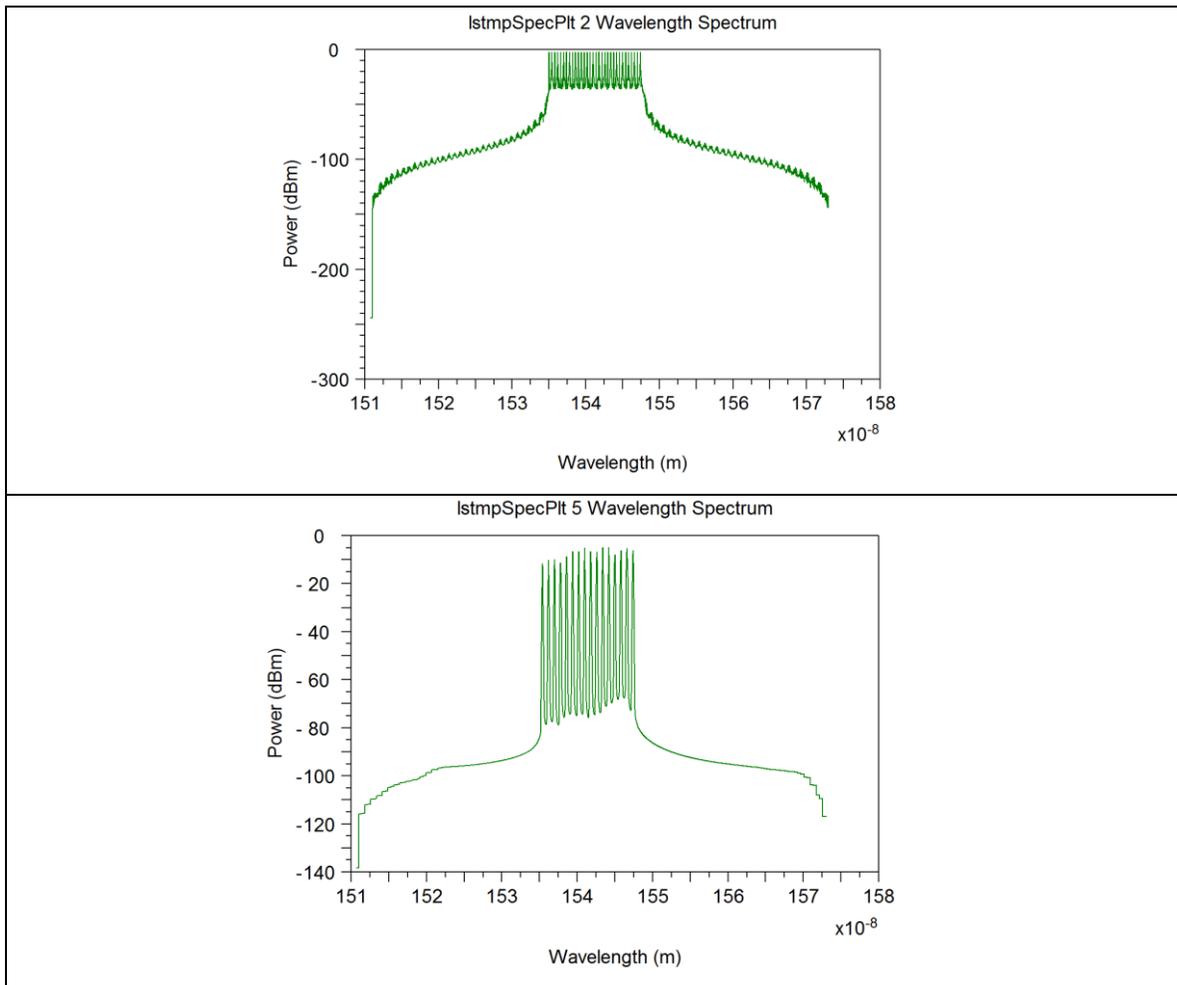


Para red Óptica implementada se emplea una longitud total de 200 km de fibra óptica, la cual está distribuida de la siguiente forma. Una fuente con 32 canales desde 1450 nm hasta 1650 nm con una separación de 100 GHz, luego adaptamos la señal a un modulador externa, y multiplexamos la señal para generar los 32 canales, que permiten trabajar el efecto FWM de manera efectiva se manejan tramos de 20Km hasta 200 km. El divisor óptico tiene unas pérdidas de 3 dB en cada una de sus salidas. Se analizan en dos tramos su factor Q por medio de un dispositivo eléctrico de medida y otro tramo teniendo en cuenta el fotodetector.

4.3 Resultados de simulación para una tasa de transmisión de 10 Gbps con fibra de 20 km hasta 200 km

En esta sección se presentan los resultados de simulación del enlace óptico teniendo en cuenta los parámetros de desempeño y empleando la herramienta Rsoft de Optsim.

Figura 30 Simulación espectro, entrada y salida de potencia



En esta figura 30 podemos observar como es el comportamiento de la señal entrada y salida de potencia en el espectro, teniendo en cuenta el FWM. Para el caso se están propagando los 32 canales con un consumo de potencia significativo. Ahora mostraremos la simulación del BER, Factor Q y SNR para los diferentes resultados de simulación del enlace óptico tiene en cuenta: La tasa de transmisión de 10 Gbps, la Distancia en Km, Longitud de onda empleada. Esto se presenta en la figura 31.

Figura 31 Graficas resultado de simulación para 10 Gbps

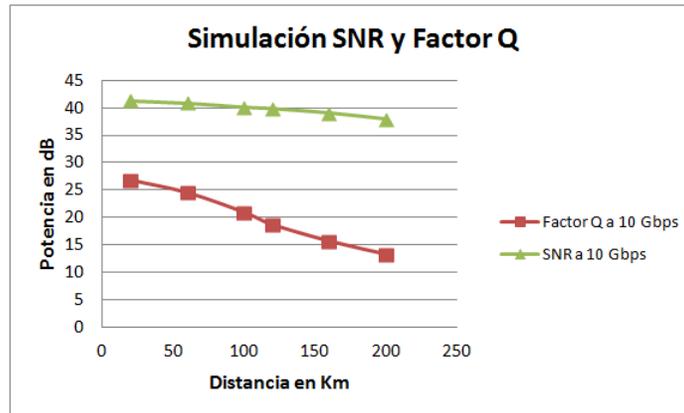
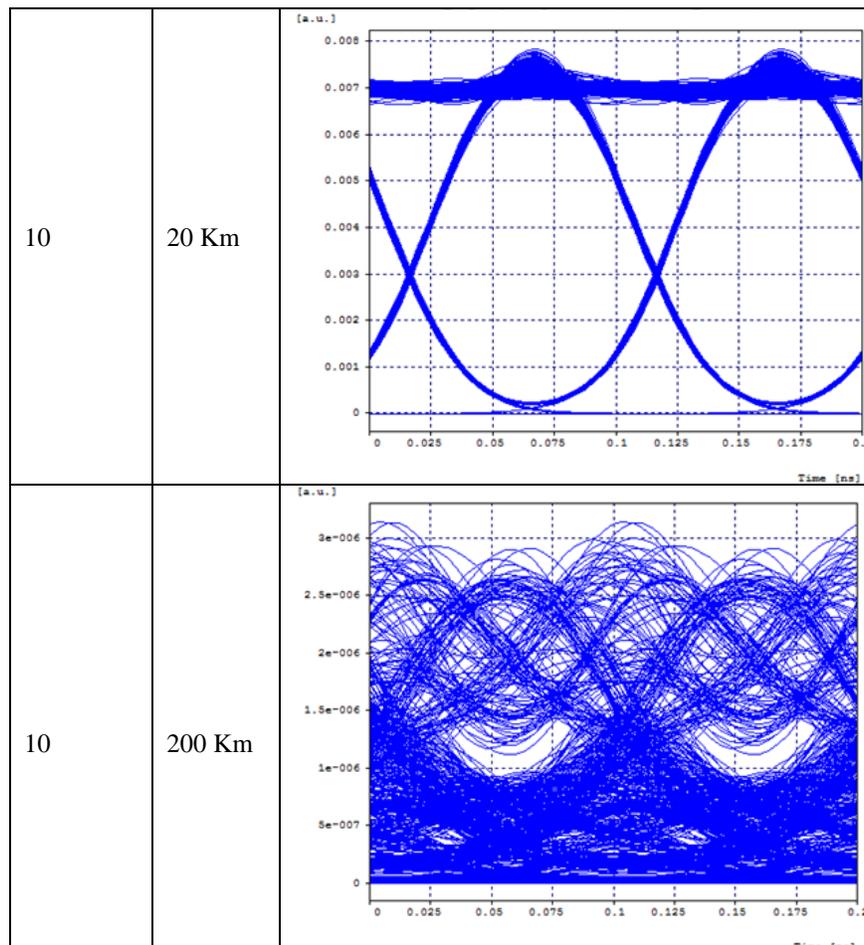


Figura 32 Diagrama de ojo para 20 Km y 200Km



Al correr las simulaciones teniendo en cuenta una tasa de transmisión de 10 Gbps con diferentes distancias, se nota de manera significativa como es el

comportamiento de la señal eléctrica por medio del diagrama de ojo. A medida que aumentamos la distancia para esta tasa de propagación el fenómeno de dispersión afecta de manera significativa a la señal del enlace, tratando de distorsionar la figura de propagación. Esto se debe a los fenómenos de FWM que a medida que aumenta su distancia para esta tasa de velocidad, aumenta de manera significativa, generando menos robustez en la propagación de la señal óptica. La simulación en la figura 33 nos permite ver el espectro de potencia generado por el efecto de la mezcla de cuarta onda (FWM) a partir de tres tonos diferentes de la tercera ventana de transmisión. Por lo tanto, el espectro mostrará tanto la potencia como la longitud de onda de cada tono de partida y de cada uno de los espúreos generados. Además, para tener en cuenta también el efecto de las pérdidas de la fibra, el usuario podrá seleccionar el coeficiente de absorción de la fibra.

En primer se colocaron los siguientes datos: primer tono a una longitud de onda $\lambda_1=1551$ nm, segundo tono a una longitud de onda $\lambda_2=1554.5$ nm. Y tercer tono a una longitud de onda $\lambda_3=1558$ nm, todos con una potencia de 10 mW; la distancia de paso igual a 1 km. Y el coeficiente de absorción de la fibra 0.217 dB/km.

En la representación gráfica sólo podrá apreciar los tres tonos de partida puesto que todavía no se han comenzado a propagar y por lo tanto no se ha generado ningún espúreo, sin embargo, el cuadro resumen situado a la derecha ya indica a qué longitudes de onda se generarán los espúreos cuando se propaguen los tonos.

Figura 33 Simulación en pasos 1 del efecto FWM, Potencia Vs Longitud de onda

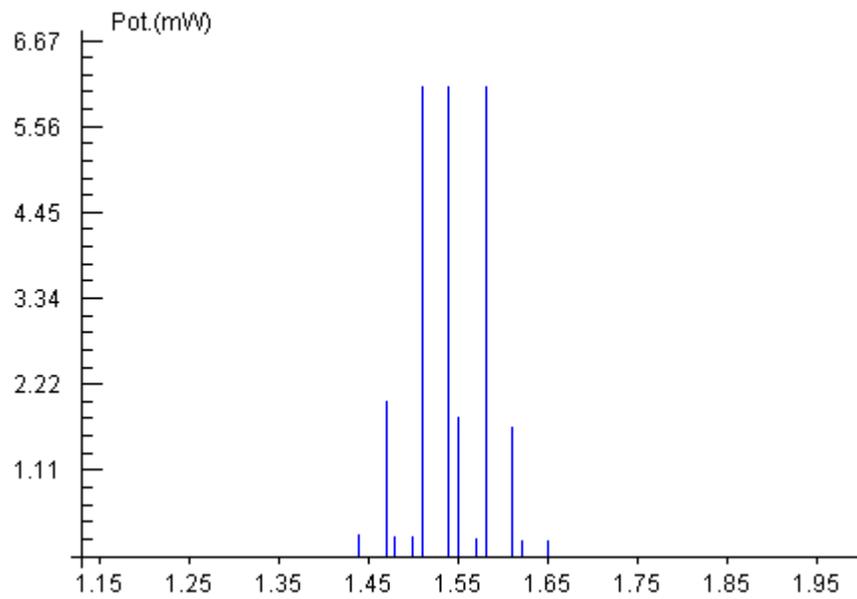
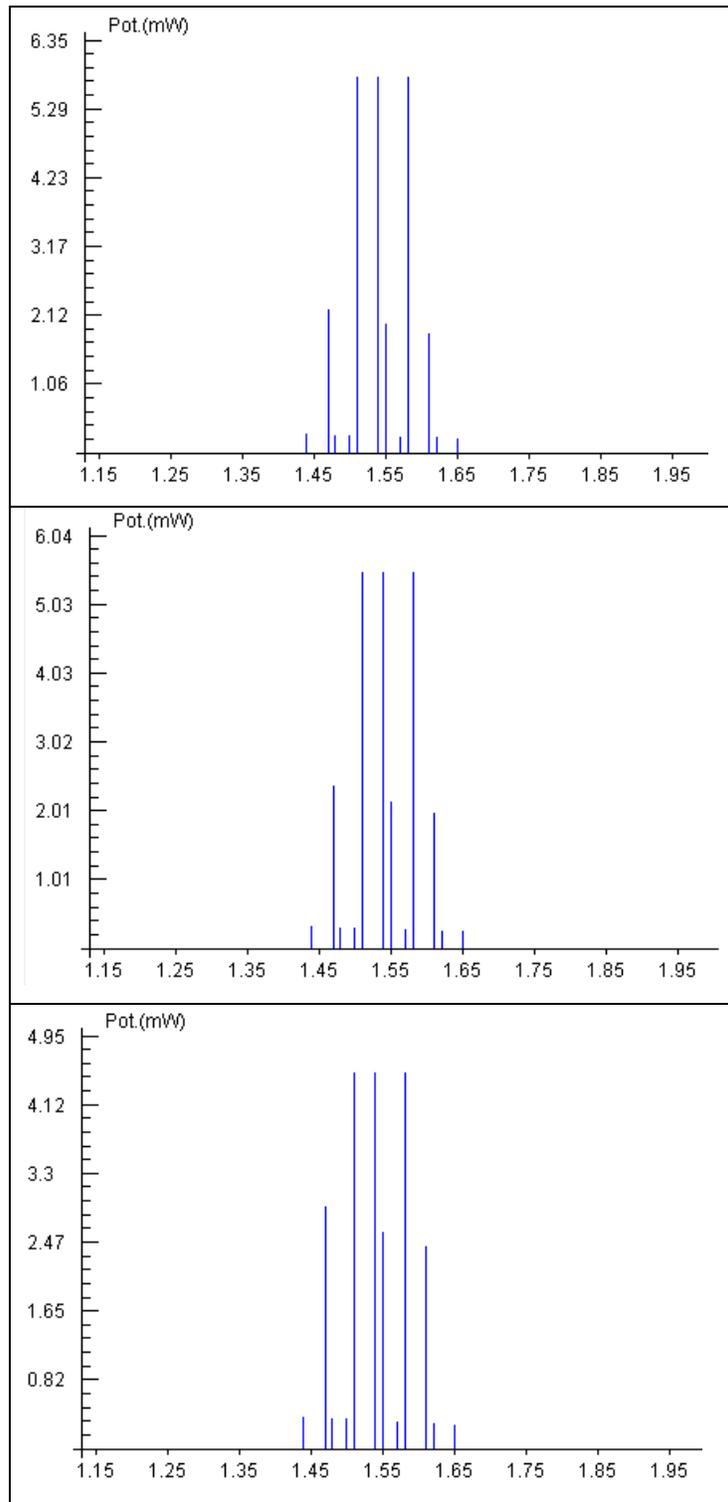


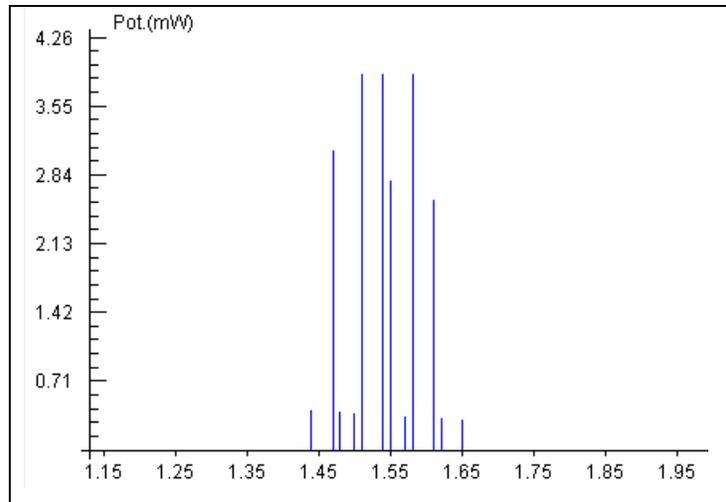
Tabla 3 Relación longitud de onda Vs potencia

Lambda (nm)	Potencia (mW)
1444	0.259
1470	1.988
1480	0.245
1500	0.239
1510	6.067
1540	6.067
1550	1.788
1570	0.218
1580	6.067
1610	1.657
1620	0.205
1650	0.197

Se analiza y comprueba que las longitudes de onda a las que se generarán los espúreos son 1.44, 1.47, 1.48, 1.5, 1.51, 1.54 y 1.55 mm, Tabla 3, estos corresponden a las de la expresión $\lambda_{ijk} = \lambda_i + \lambda_j - \lambda_k$ para $i, j, k = \{1, 2, 3\}$ con i y j distintos de k .

Figura 34 Simulación en paso 2 del efecto FWM, Potencia Vs Longitud de onda





Ahora si analizamos la simulación las figuras 33 y 34, en varios pasos, se verá que al propagarse los tonos 3 km y 6 km. Los espúreos comienzan a crecer en potencia puesto que a pesar de las pérdidas de la fibra, el efecto de la FWM provoca que la potencia de los espúreos aumente con la distancia. Sin embargo, los tonos de partida al sufrir las pérdidas van perdiendo potencia. También puede parecer curioso que considerando unas pérdidas constantes con la frecuencia, los tres tonos iniciales no sigan teniendo el mismo valor de potencia (potencia 1 es distinto de potencia 2 y de potencia 3). Esto se debe a que el batido de los tonos de partida ha provocado que se generen algunos espúreos con distintas potencias en las mismas frecuencias que las de los tonos de partida.

Si cambiáramos la longitud de onda del tercer tono de partida, no se generará ningún espúreo que se solape con los tonos de partida, y por lo tanto éstos, aunque a medida que se vayan propagando van a perder potencia, siempre coincidirán en su valor.

Si le damos y analizamos mas pasos como las figuras anteriores se analizo como los espúreos van tomando cada vez más presencia en relación con los tonos de partida. Es muy importante tener presente este hecho, ya que en general nuestro sistema tendrá que satisfacer una cierta relación SNR y por lo tanto la FWM limitará la distancia de los enlaces. De todas formas, a partir de una cierta distancia, en este caso 200 km. Aproximadamente, para los espúreos las pérdidas

de la fibra tendrán más peso que el efecto de la FWM y también comenzarán a perder potencia.

Ahora si se aumentan la potencia de alguno o todos los tonos de partida teniendo en cuenta las mismas longitudes de onda con la misma potencia de 10 mW, se analizó el valor de potencia de los espúreos generados a esa distancia, los efectos de la FWM aumentan con la potencia de los tonos de partida, es decir, si partimos con tonos con mayor potencia, los espúreos que se generan también tendrán mayor potencia. Por último si cambiamos el valor del coeficiente de absorción (0.217 dB/km a 0.3 dB/km), al aumentar la absorción aumentarán las pérdidas, y por lo tanto los tonos de partida como los espúreos perderán potencia con mayor rapidez.

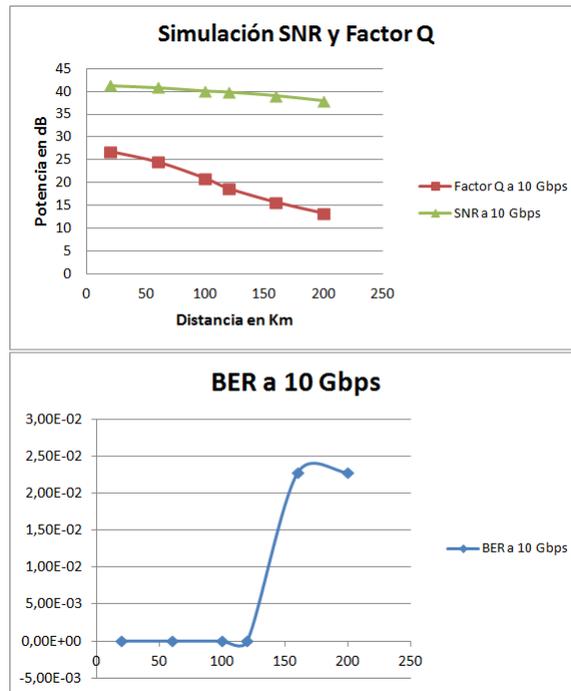
Por último podemos concluir para estos resultados que a medida que disminuimos la distancia de propagación existirá un mejor comportamiento en la propagación de la señal. Puede observarse que al incrementar la tasa de bits se disminuye el valor del BER. Este efecto se atribuye a la dispersión de la fibra óptica. Puede observarse que el BER en la señal de video incrementa al incrementar la tasa de bits. Esto se atribuye al efecto Raman, debido a que hay un intercambio de potencia entre las longitudes de onda establecidas y la teoría predice que el efecto es más notable al disminuir la tasa de bits.

Los resultados del BER, Factor Q, SNR para la señal se presentan en la Tabla 8.

Tabla 4 Resultados de la señal eléctrica

Tasa de Tx	Valores del enlace			
	Distancia	BER	Factor Q	SNR
10 Gbps	20 km	2,65E-10	26,754	41,32
10 Gbps	60 km	3,20E-11	24,46	40,865
10 Gbps	100 km	1,49E-08	20,875	40,135
10 Gbps	120 km	3,51E-07	18,652	39,854
10 Gbps	160 km	2,28E-02	15,652	39,032
10 Gbps	200 km	2,28E-02	13,254	37,854

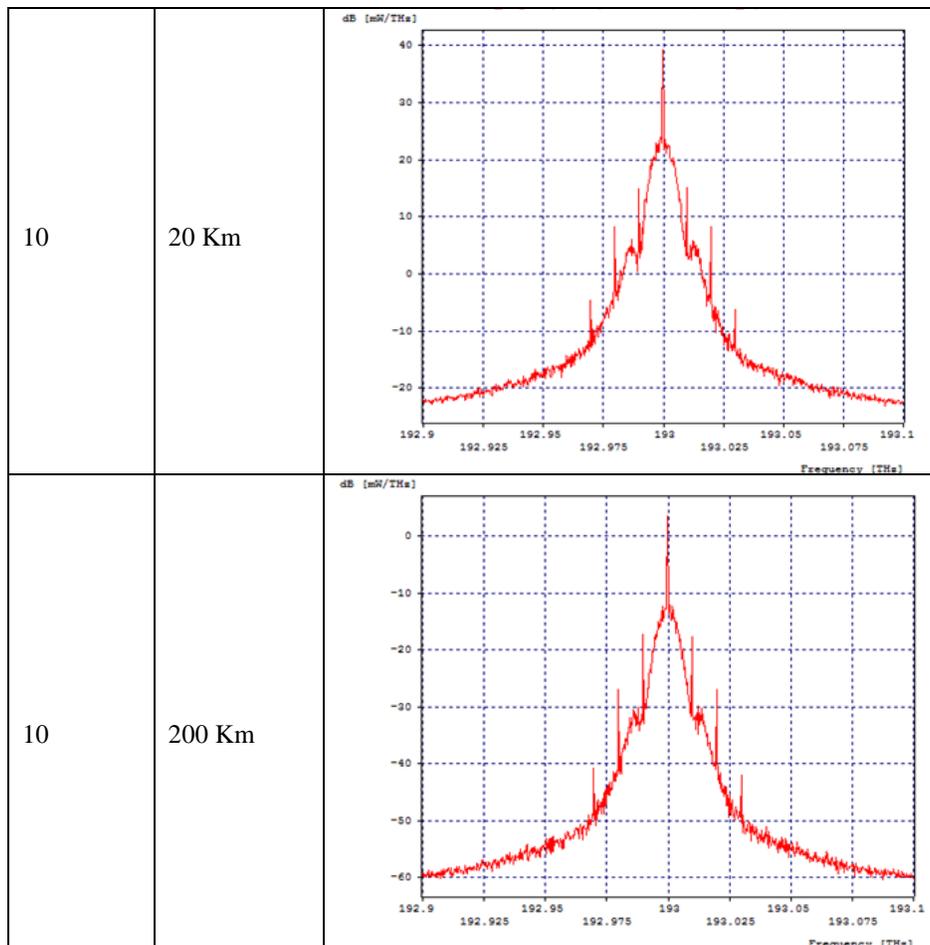
Figura 35 Curvas Factor Q, SNR, BER Vs Distancia para 10 Gbps



La relación señal a ruido (SNR) debe permanecer a un determinado nivel para mantener la señal de datos separada de la señal de ruido, Al amplificar la señal, también se amplifica el ruido, por lo que la elección de la distancia entre los amplificadores es una decisión importante, por lo tanto a mayor sea la SNR, mejor comportamiento tendrá el enlace óptico. Podemos observar que la simulación a menor distancia mejor SNR, pero no quiere decir que para 160 km o 200 km es ineficiente; este se encuentra entre los rangos de propagación efectiva para señales de información. Ahora a medida que el orden del factor Q aumenta el fenómeno de no linealidad es menor, esto se hace más efectivo a mejoramiento de potencia en la salida del amplificador y análisis de módulos dispersivos que permiten mejorar la propagación de la señal. Al analizar la tasa de BER, para 10 Km presenta un valor de $2,65E-10$ estando en un margen efectivo según estándares analizados en artículos y simulaciones [50], ahora el limite efectivo de BER para una distancia de 100 Km es de $1,49E-08$, presentando un valor efectivo para sistemas de comunicaciones, pero se ve afectado por los fenómenos no lineales de FWM.

Ahora, el diagrama de Potencia Óptica para los diferentes resultados de simulación del enlace óptico tiene en cuenta: La tasa de transmisión de 10 Gbps, la Distancia en Km, Longitud de onda empleada. Esto se presenta en la Figura 36.

Figura 36 Graficas resultado de simulación Óptica para 10 Gbps



La potencia óptica si se ve afectada de tal manera que hay una variación de 15 db entre las distancias de 10km hasta 160 Km, presentando un cambio importante para analizar, ya que podemos mejorar la intensidad de potencia al mejorar la amplificación de la señal, cambiando su relación de potencia de entrada con la distancia. Su valor se calcula de la siguiente manera $OSNR = 10 \text{Log} \frac{PS + PR}{PR}$ donde PS es la potencia de la señal, PR es la potencia de ruido en el sistema. Ahora el

cálculo de la potencia de ruido se mide promediando el nivel de ruido a la izquierda y a la derecha del pico de la señal de la siguiente manera:

$$PR = \frac{P(\lambda_R - \Delta\lambda) + P(\lambda_R + \Delta\lambda)}{2},$$

Donde el valor de $\Delta\lambda$ se define como la mitad de la

separación entre canales. A medida que aumentamos su distancia, el cambio de la señal es propenso a ser distorsionada, ya que los fenómenos que afectan la fibra los afecta.

Tabla 5 Resultados Señal Óptica

Tasa de Tx	Valores del enlace Óptico	
	Distancia	OSNR
10 Gbps	20 km	26,365
10 Gbps	60 km	22,788
10 Gbps	100 km	18,965
10 Gbps	120 km	11,425
10 Gbps	160 km	2,095
10 Gbps	200 km	-3,265

Ahora la tabla 5 muestra resultados para diferentes distancias pero teniendo en cuenta el OSNR o relación señal a ruido óptica. Los resultados son congruentes con respecto a la señal SNR eléctrica, notando que sus valores son aproximadamente un poco menos de la mitad de la señal de propagación SNR eléctrica, esto se debe a que las señales pasan por un filtrado y amplificación de estas, y al recuperar el pulso eléctrico estas debe ser regeneradas para que la información del pulso óptico no se vea deteriorado por los fenómenos de no linealidad. Para el caso de 20 km se presenta un pulso efectivo en un orden de 26,365dB aproximadamente, en 60 km se presenta un fenómeno importante, ya que se ve una disminución del OSNR a 22,788 dB, esto se debe a fenómenos de no linealidad para ese tramo de fibra al igual que en 100 km. Podemos observar que para 200 km trabajan por debajo del umbral positivo, es decir -3,265 db

respectivamente, esto se debe a la regla del fenómeno de no linealidad, a mayor distancia menor propagación y a mayor tasa de transmisión mayor es su efecto FWM pero recordando que su efecto se hace evidente al llegar al receptor o fotodetector. Pero no quiere decir que sean valores ineficientes, ya que haciendo comparaciones con valores reales, estos datos obtenidos son eficientes ya que están dentro del umbral de señal. Con respecto a 10 Gbps es muy efectiva su propagación y se visualiza que el comportamiento del pulso no se deteriora ya que se presentan distintos fenómenos para dañar el pulso óptico. Esto a su vez, se agradece su mejoría al fenómeno de mejoramiento en fibra dispersiva que se le adiciono a la simulación para mejorar los fenómenos no lineales.

Ahora es importante analizar la intensidad de la relación señal a ruido óptica OSNR, esta es eficiente como es de esperarse debido a que el efecto de no linealidad SPM no es afectado de manera drástica por su tasa de transmisión. De

igual forma su valor se calcula de la siguiente manera $OSNR = 10 \log \frac{PS + PR}{PR}$ donde

PS es la potencia de la señal, PR es la potencia de ruido en el sistema. Ahora el cálculo de la potencia de ruido se mide promediando el nivel de ruido a la izquierda y a la derecha del pico de la señal de la siguiente manera:

$$PR = \frac{P(\lambda_R - \Delta\lambda) + P(\lambda_R + \Delta\lambda)}{2}, \text{ Donde el valor de } \Delta\lambda \text{ se define como la mitad de la}$$

separación entre canales.

4.4 Resultados de simulación para una tasa de transmisión de 2.5 Gbps con fibra de 20 km hasta 200 km

El diagrama de ojo para los diferentes resultados de simulación del enlace óptico tiene en cuenta: La tasa de transmisión de 2.5 Gbps, la Distancia en Km, Longitud de onda empleada. Esto se presenta en la Figura 37.

Figura 37 Graficas resultado de simulación para 2.5 Gbps

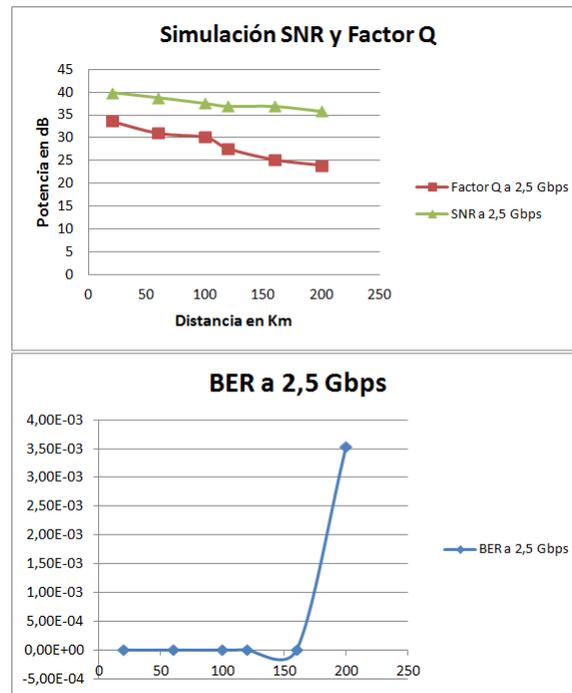
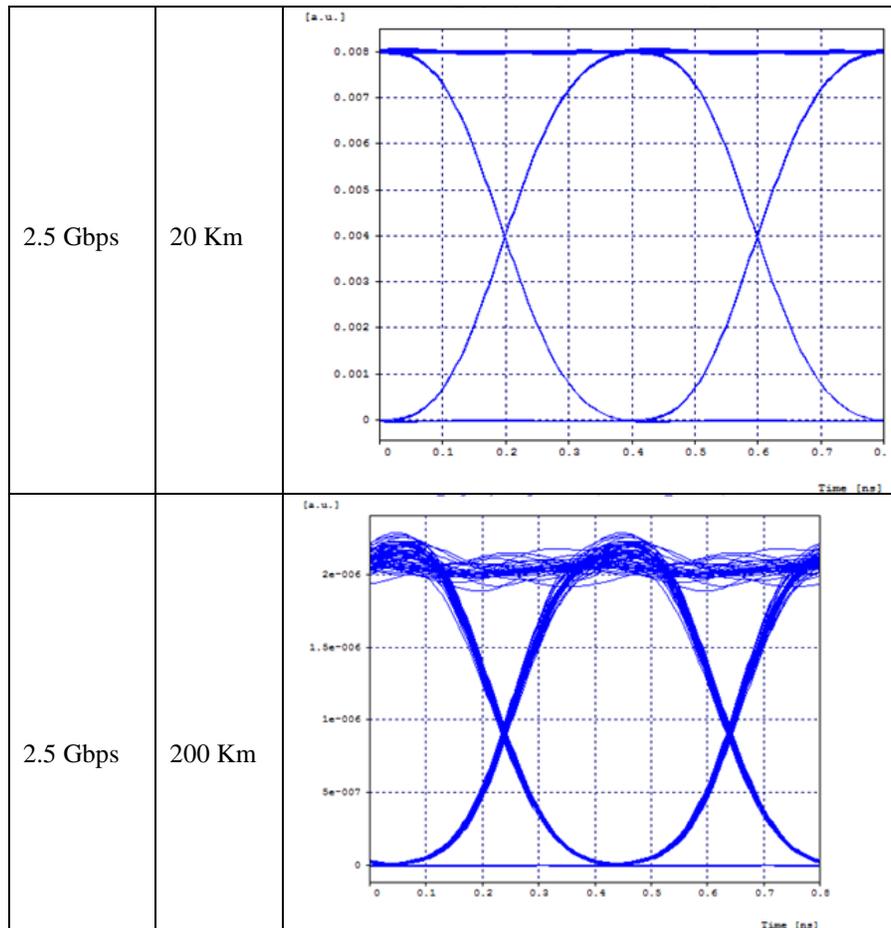


Figura 38 Resultados de la señal eléctrica



Teniendo en cuenta los resultados de la tabla 6 podemos observar que a medida que la tasa de transmisión del enlace disminuye, su propagación a través de la red óptica es muy efectiva. Los diagramas de ojo presentan menos distorsiones y dispersiones en sus cuadrículas generando menos ruido y robustez en el sistema. Analizando las distintas distancias entre 20 km y 200 km la tasa de error es muy efectiva para no decir caso ideal, veamos que su tasa entre las distancias de 20 km y 60 km es casi ideal $1,52E-09$ y un factor Q de 38,7854, para un medio de comunicación óptico, al igual que para 100 km y 160 km el BER $8,75E-07$, es muy efectivo. Ya para transmisiones de mayor distancia alrededor de los 200 km obtuvimos una tasa de $3,53E-03$ con un factor Q de 23,8754, que significa una eficiente propagación de señal. La relación SNR podemos observar que es muy efectiva para distancias superiores a 120 km, ($36,8952$ dB – $36,8745$ dB – $35,7854$

dB), teniendo en cuenta que para comunicaciones ópticas un valor de relación señal a ruido eléctrica esta en el orden de los (30 – 40) dB; para nuestra simulación se presentan valores muy efectivos debido al mecanismo de amplificación óptica que empleamos, el amplificador EDFA con su ganancia de regeneración y fibra dispersiva permitió que el enlace trabajara de manera robusta y eficaz.

Tabla 6 Resultados de la señal eléctrica

Tasa de Tx	Valores del enlace			
	Distancia	BER	Factor Q	SNR
2.5 Gbps	20 km	1,00E-10	33,65	39,895
2.5 Gbps	60 km	1,52E-09	30,986	38,7854
2.5 Gbps	100 km	5,66E-08	30,1023	37,5326
2.5 Gbps	120 km	8,75E-07	27,564	36,8952
2.5 Gbps	160 km	1,25E-06	25,075	36,8745
2.5 Gbps	200 km	3,53E-03	23,8754	35,7854

Figura 39 Curvas Factor Q, SNR, BER Vs Distancia para 2,5 Gbps



Ahora, el diagrama de Potencia Óptica para los diferentes resultados de simulación del enlace óptico tiene en cuenta: La tasa de transmisión de 2.5 Gbps, la Distancia en Km, Longitud de onda empleada. Esto se presenta en la Figura 40.

Figura 40 Graficas resultado de simulación Óptica para 2.5 Gbps

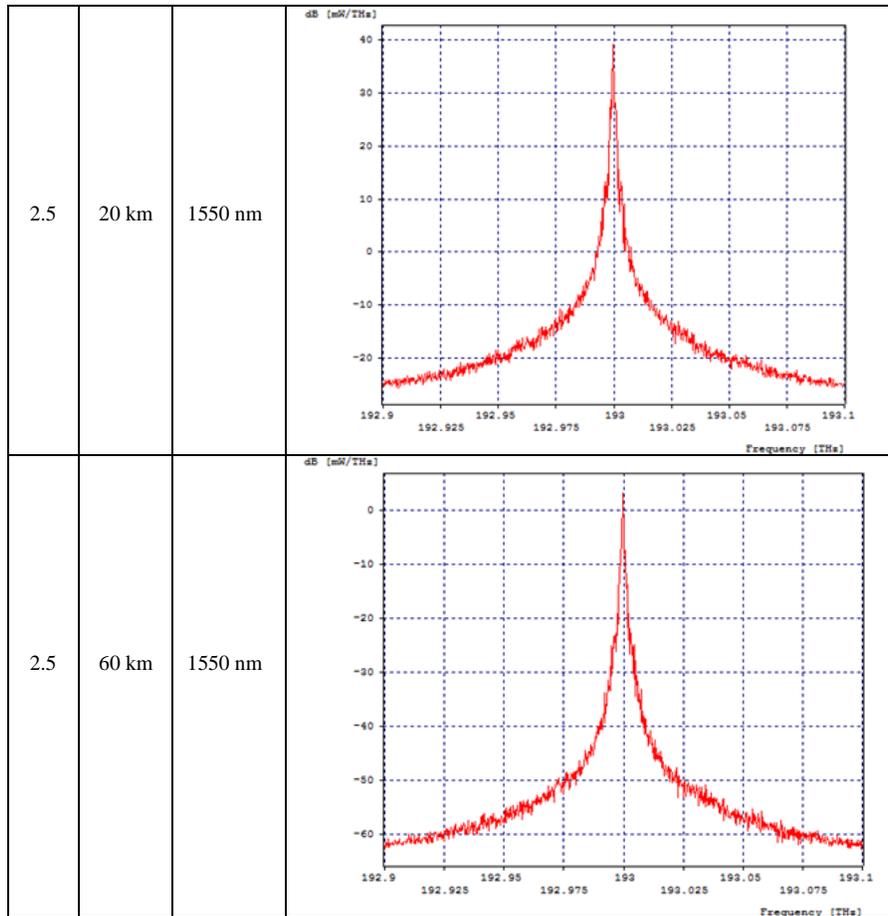
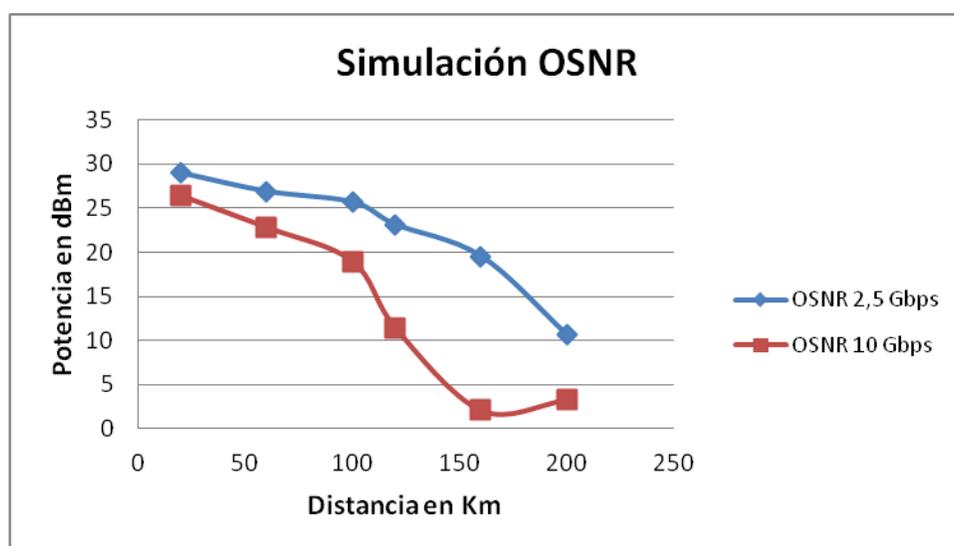


Tabla 7 Resultados Señal Óptica

Tasa de Tx	Valores del enlace Óptico	
	Distancia	OSNR
2.5 Gbps	20 km	28,962
2.5 Gbps	60 km	26,8754
2.5 Gbps	100 km	25,652
2.5 Gbps	120 km	23,1254
2.5 Gbps	160 km	19,523
2.5 Gbps	200 km	10,6325

Figura 41 Curva OSNR Vs Distancia para 2,5 Gbps y 10 Gbps



Los resultados de la relación señal a ruido óptica u OSNR se presentan en la Tabla 7.

El comportamiento en la señal óptica es muy efectivo, teniendo en cuenta el efecto SPM el cual es eficiente para las distancias establecidas permitiendo así que el enlace en la parte eléctrica y óptica sea eficaz. Su relación OSNR es casi ideal haciendo que el motor computacional de OPTSIM y el modulo de fibra dispersiva generara de manera optima los resultados. Ahora, el diagrama de Potencia Óptica para los diferentes resultados de simulación del enlace óptico tiene en cuenta: La

tasa de transmisión de 2.5 Gbps, la Distancia en Km, Longitud de onda empleada. A medida que aumenta la distancia la potencia óptica varía en relación a 4,6 db aproximadamente, pero presentando un fenómeno interesante en algunas distancias. Por ejemplo para el caso de 20 km se presenta un pulso efectivo en un orden de 28,962 db aproximadamente, de 60 a 120 su diferencia es de 3 db aproximadamente disminuyendo su potencia óptica a un 2 db para 120 km, y para los casos de 200 km la potencia óptica se presenta por debajo del umbral de 14 dB. Con respecto a 10 Gbps es muy efectiva su propagación y se visualiza que el comportamiento del pulso no se deteriora y se presentan distintos fenómenos para dañar el pulso óptico. Esto a su vez, se agradece su mejoría al fenómeno de mejoramiento en fibra dispersiva que se le adiciono a la simulación para mejorar los fenómenos no lineales.

5. CONCLUSIONES

Se presentó un análisis de propagación de señales a través de la herramienta de simulación OPTSIM, empleando diferentes efectos de propagación en enlace óptico como lo es la dispersión, distorsión y efecto no lineal FWM, que dependen esencialmente de las longitudes de onda con que se trabajen y su frecuencia de separación. Para las diferentes distancias (20km hasta 200km), se simularon como impactan los efectos de no linealidad en la red óptica real, lo cual se logró variando el número de longitudes de onda en la red. Las simulaciones se realizaron con tres longitudes de onda a una separación de 100 GHz, transmitiendo a 16 canales y generando 32 canales teniendo en cuenta el efecto FWM en la red óptica, con diferentes tasas de bits. Se realizaron pruebas con diferentes valores de FWHM, amplificación óptica y con receptores tipo PIN.

Se observó que al aumentar la tasa de bits se disminuye el valor del BER. Este efecto se atribuye a la dispersión de la fibra óptica o parámetro de fibra dispersiva. Se obtiene un mejor desempeño para la tasa de transmisión de 2.5 Gbps en comparación con 10 Gbps. Sin embargo, al emplear el parámetro de fibra

dispersiva y amplificación óptica ideal para el transporte de la señal, a tasas de 10 Gbps no se ve tan deteriorada la información, permitiendo trabajar de manera efectiva a las tasas de transmisión empleadas y a las distintas distancias.

Puede observarse que el BER en las distintas distancias aumenta al incrementar la tasa de bits en la longitud de onda de 1550 nm. Esto se atribuye al efecto Raman, debido a que hay un intercambio de potencia en la longitud de onda de 1550 nm y la teoría predice que el efecto es más notable al disminuir la tasa de bits.

En las simulaciones, los efectos de FWM tienen un mejor desempeño para las longitudes de fibra inferiores a 60 km; el amplificador EDFA permite generar un mejor desempeño para las longitudes de fibra superiores a 75 km. Esta información permite decidir el tipo de amplificador a emplear dependiendo de la longitud del enlace y dependiendo del desempeño o valor de SNR requerido.

Para los tipos de enlaces ópticos, la tasa de transmisión que más se ve afectada por los efectos de propagación y efectos no lineales es la de 10 Gbps; pero no quiere decir que es la más ineficiente ya que sus resultados gráficos y valores teóricos muestran un buen comportamiento al implementarles fibra dispersiva. En este caso se observa un mejor desempeño a tasas de 2.5. Este análisis prevé un buen desempeño para el transporte de señales de estándares de video y datos a través de la fibra óptica. De esta forma, la amplificación óptica puede usarse para extender la longitud de los enlaces ópticos para aplicaciones de enlaces ópticos teniendo en cuenta efectos dispersivos en la fibra. Adicionalmente, los resultados obtenidos permiten como trabajo futuro obtener un mayor entendimiento del funcionamiento de los enlaces ópticos, conocimiento que puede ser empleado en próximas aplicaciones para obtener una herramienta de simulación más completa. Por último estos resultados permiten a un diseñador de una red óptica realizar ajustes en los niveles de potencia, ganancia, SNR, OSNR y BER para obtener un mejor aprovechamiento de los recursos de la red y establecer el máximo número de usuarios a ser atendidos en el enlace.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. SKLAR, Bernard. Digital communications: fundamentals and applications. 2.ed. s.l. Prentice Hall, 2002. 1079 p.

HUIDOBRO MOYA, José Manuel; ROLDAN MARTINEZ, David; MILLAN TEJEDOR, Ramón J. Redes y servicios de banda ancha : tecnologías y aplicaciones. Madrid: MCGRAW HILL, 2004, 309 p.

WIKIPEDIA, la enciclopedia libre. Divisor óptico. [En línea]. <http://wikitel.info/wiki/Divisor_%C3%B3ptico> [Consulta: Noviembre 2011].

Banda ancha. DSL. [En línea] <<http://www.bandaancho.es/Informacion/Tecnologias/TecnologiasCableadas/Paginas/ADSL.aspx>>. [Consulta: Noviembre 2011].

DTV Answers. DTV. [En línea] <http://www.dtvanswers.com/esp_what.html>. [Consulta: Noviembre 2011].

WIKIPEDIA, la enciclopedia libre. Red Óptica Pasiva. EPON. [En línea] <<http://es.wikipedia.org/wiki/EPON>>. [Consulta: Junio 2010]. [10] FSAN. FSAN. [En línea] <<http://fsanweb.com/>>. [Consulta: Junio 2010].

Millán, Ramón. FTTx. [En línea] <<http://www.ramonmillan.com/tutoriales/gpon.php>>. [Consulta: Noviembre 2011].

WIKIPEDIA, la enciclopedia libre. Red Óptica Pasiva, GPON. [En línea] <<http://es.wikipedia.org/wiki/EPON>>. [Consulta: Noviembre 2011].

ISLAS LAZCANO, Kristian y SANDOVAL OROZCO, Iván (2007): tecnología de la alta definición en la televisión de alta definición, escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, instituto Politécnico Nacional, Unidad Culhuacan.

UNIVERSIDAD DE MURCIA. Diodos. [En línea] < <http://www.um.es/docencia/barzana/DIVULGACION/ELECTRONICA/Diodos.html> >. [Consulta: Noviembre 2011].

WIKITEL. Multiplexación. [En línea] < <http://es.wikitel.info/wiki/Multiplexación>>. [Consulta: Noviembre 2011].

2. OXUS GROUP. POF. [En línea] < <http://www.pof.cl/>>. [Consulta: Noviembre 2011].

3. Video por demanda. [En línea] <<http://www.angelfire.com/electronic/pfierro/docs/vod.pdf>>. [Consulta: Noviembre 2011].

4. RAMONMILLAN. FTTH y FTTB. [En línea] <<http://blogtelecomunicaciones.ramonmillan.com/2008/07/ftth-vs-fttb.htmf>>. [Consulta: Noviembre 2011].

5. RAMONMILLAN. FTTB y VDSL2. [En línea] < <http://www.ramonmillan.com/tutoriales/fttbvdsl2.php>>. [Consulta: Noviembre 2011].

6. WIKITEL. Redes PON. [En línea] < http://wikitel.info/wiki/UA-Redes_PON_Equipos >. [Consulta: Noviembre 2011]

7. UNIVERSIDAD NACIONAL SEDE MANIZALES. Tipos de Fibra. [En línea] < <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4040050/Descargas/capcinco/tiposfibras.pdf> >. [Consulta: Noviembre 2011].

8. ELECTRONICA UNICROM. Características de de la fibra óptica. [En línea] < <http://es.scribd.com/doc/64284433/40/Fibra-optica-Caracteristicas-Fibra-multimodo-indice-escalonado> >. [Consulta: Noviembre 2011].

9. THE FIBER OPTIC ASSOCIATION - TECH TOPICS. Fibra óptica de plástico POF. [En línea] < <http://www.thefoa.org/tech/pof.htm> >. [Consulta: Noviembre 2011].
10. JASP. Fuentes ópticas. [En línea] < <http://jasp.net/optics/fuentes.xhtml>>. [Consulta: Noviembre 2011].
11. PUCHE William. 2011. Seminario de Telecomunicaciones I – Comunicaciones ópticas. Diodo LED. Universidad Pontificia Bolivariana Medellín. [Consulta: Noviembre 2011].
12. TEXTOS CIENTÍFICOS. Emisores y receptores ópticos. [En línea] < <http://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/emisores-receptores>>. [Consulta: Noviembre 2011].
13. INGENIERO BORDA Y ASOCIADOS. Gigabit Ethernet sobre fibra optica. [En línea] < <http://ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Articulos%20Tecnicos%20de%20Consulta/Fibra%20optica/10GB%20sobre%20Ethernet.pdf> >. [Consulta: Noviembre 2011].
14. OPTSIM. Diseño de sistemas ópticos. [En línea] < <http://www.allopticdesign.com/productos/simulacion/optsim/OptSim.pdf>>. [Consulta: Noviembre 2011].
15. BANDAANCHA.EU. El FTTH y sus diferentes arquitecturas. [En línea] < <http://bandaancha.eu/articulo/5513/ftth-diferentes-arquitecturas> >. [Consulta: Noviembre 2011].

16. FIBER OPTICS FOR SALE CO. Plastic Optical Fiber Overview. [En línea] <
<http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/plastic-optical-fiber-overview/>>.
 [Consulta: Noviembre 2012].
17. THE TIA TR-42 ENGINEERING COMMITTEE ON USER PREMISES
 TELECOMMUNICATIONS INFRASTRUCTURE. Present State-of-the-art of
 Plastic Optical Fiber (POF) Components and System. [En línea] <
<http://www.pofto.com/downloads/WP-TIA-POFTO.pdf>>. [Consulta:
 Noviembre 2012].
18. CIENCIA 15. Pla. Iluminación LED. [En línea] <
<http://ciencia15.blogalia.com/historias/43675>>. [Consulta: Noviembre 2011].
19. IEEE JOURNAL ON SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS.
 Surface-Emitting Laser—Its Birth and Generation of New Optoelectronics
 Fiel. [En línea] <
<http://www.qudev.ethz.ch/phys4/studentpresentations/vcSEL/VCSELS.pdf> >.
 [Consulta: Noviembre 2012].
20. ROGELIO MONTAÑANA, Acceso residencial de banda ancha, XDSL,
 VDSL DSL. [En línea]
 <<http://www.bandaancho.es/Informacion/Tecnologias/TecnologiasCableadas/Paginas/ADSL.aspx>>. [Consulta: 29 Marzo 2012]
21. Redes HFC (Híbrido FiberCoaxial) y sus vulnerabilidades. [En
 línea] <<http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo322/1s08/project/JuanCartajena.pdf>>. [Consulta: 30 Marzo 2012]

22. Point-topic World Broadband Statistics: Short report. Q2 2011 UI T - T G.984.1. Marzo 2003. Serie G: sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales. Arquitectura de la red de acceso óptico
23. F. Amaya-Fernandez, A. Soto, I. Tafur; "Optimizing the Next Generation Optical Access" Latin America Transactions, IEEE., vol. 8, no 4, pp. 438-443, October 2010
24. Davey, R., Healey, P., Hope, I., Watkinson, P., Payne, D., Marmur, O., Ruhmann, J. and Zuiderveld, Y.
25. DWDM reach extension of a GPON to 135 km", Journal of Lightwave Technology, v. 24, no. 1, pp. 29-31, 2006
26. Dong Y and Martin K. Gigabit Communications over Plastic Optical Fiber. IEEE SOLID-STATE CIRCUITS MAGAZINE. (60- 69)
27. Características técnicas de la fibra óptica plástica, [En línea]. < http://www.luceat.it/spagnolo/come_funziona.html >. [Consulta 20 de Marzo de 2012]
28. Bend-Insensitive Fiber.2011. [En línea]. < <http://www.thefoa.org/tech/ref/fiber/Blfiber.html> >. [Consulta 30 de Marzo de 2012]
29. Benoit Héroux J, Takaki K, Schow C, Rylyakov A, John R, Nakagawa S. Optical transmitter with 1060 nm VCSEL for low power interconnect. OSA/OFC/NFOEC 2011.
30. Hofmann W, Moser P, Wolf P, Mutig A, Kroh M, and Bimberg D. 44 Gb/s VCSEL for optical interconnects. OSA/OFC/NFOEC 2011

31. MODELADO DINÁMICO DEL DIODO LÁSER DE CAVIDAD VERTICAL EMISOR DE SUPERFICIE (VCSEL). [En línea]. <http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos_modernos/articulos_zaragoza_2000/ursi_2000/trabajos/df0096.pdf>. [Consulta 30 de Marzo]
32. Fundamentos de espectroscopía Raman. [En línea]. <<http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6887/03Rpp03de11.pdf?sequence=3>>. [Consulta 30 de Marzo de 2012]
33. FIBRA ÓPTICA PARA NGN - DISPERSIÓN CROMÁTICA Y PMD. 2009. [En línea]. <http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/preventa/presentaciones/whitepaper%20-Fibra%20optica%20para%20NGN-dispersion%20cromatica%20y%20PMD-Telnet-RI%20-%20ES.pdf>. [Consulta 13 de marzo de 2012]
34. Comunicaciones ópticas. Conceptos esenciales y resolución de ejercicios. [En línea]. <http://books.google.com.co/books?id=E4z9jhLbQ7EC&pg=PA383&lpg=PA383&dq=efectos+no+lineales+de+la+red+%C3%B3ptica&source=bl&ots=KFJ618H_nU&sig=wDwKKGvRca5_a_4822y3fvfvsd4&hl=es&sa=X&ei=BTN7T7_BOI6Q8wT6g8TWBA&ved=0CCAQ6AEwADgU#v=onepage&q=efectos%20no%20lineales%20de%20la%20red%20%C3%B3ptica&f=false>. [Consulta 12 de Enero de 2012]
35. G. Felinskyi. Nonlinear Fitting of the complex raman gain profile in singlemode optical fibers. In Proc. 11 Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, pages: 378-380, 2006.
36. Aatur Rahman Sarkar, Mohammed Nazrul Islam, Mohammad Golam Mostaza. Performance of an optical wideband WDM system considering

stimulated Raman scattering, fiber attenuation and chromatic dispersion. *Optical and Quantum Electronics*, 39(8): 659-675, Sep. 2007.

37. G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics 3^a ED.*, Academic Press San Diego, CA, 2001.

38. Md. G. Mostafa¹, Md. Moshir Rahman, G. M. Haider Ali, Md. Jahangir Alam and Mohammed Nazrul Islam. Improved Analysis of Stimulated Raman Crosstalk in Wideband Optical WDM System. In Proc. First International Conference on ICOC 2002, pages: 401-404, Nov. 2002.

39. G. Felinskyi. Nonlinear Fitting of the complex Raman gain profile in singlemode optical fibers. In Proc. 11 Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, pages: 378-380, 2006.

40. R. H. Stolen. Polarization effects in fiber Raman and Brillouin lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 15(10): 1157–1160, Oct. 1979.

A. R. Chraplyvy. Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 8(10): 548-1557, Oct. 1990.

41. Victor E. Perlin and Herbert G. Winful. Optimizing the Noise Performance of Broad-Band WDM Systems With Distributed Raman Amplification. *IEEE Photonics Technology Letters*, 14(8): 1199- 1201, Aug. 2002.

42. Noboru Takachio, Hiro Suzuki. Application of Raman-Distributed Amplification to WDM Transmission Systems Using 1.55-um Dispersion-Shifted Fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 19(1): 60-69, Jan. 2001.

43. Jake Bromage. Raman Amplification for Fiber Communications Systems. Journal of Lightwave Technology, 22(1): 79-93, Jan. 2004.
44. T. Saitoh and T. Mukai, in Coherence, Amplification, and Quantum Effects in Semiconductor Lasers, Y. Yamamoto, Ed., Wiley, New York, 1991, Chap. 7.
45. G.-H. Duan, in Semiconductor Lasers: Past, Present, and Future, G. P. Agrawal, Ed., AIP Press, Woodbury, NY, 1995, Chap. 10.
46. X. S. Yao, "Phase-to-amplitude modulation conversion using Brillouin selective sideband amplification", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 10, no. 2, pp. 264-266, 1998.
47. Yariv, D. Fekete, D. M. Pepper, "Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation", Opt. Lett., vol. 4, no. 2, pp. 52-54, 1979.
48. H. Yonetani, T. Watanabe, K. Kamite, T. Takada, K. Shima, "Analysis of dispersion induced distortion in multichannel analog transmission", presented at ECOC 91, pp. 577-580, 1991.
49. H. Yoshinaga, "Influence of stimulated Brillouin scattering on nonlinear distortion in SCM video transmission", Electron. Lett., vol. 29, pp. 1707-1708, 1993.
50. V. E. Zakharov, A. B. Shabat, "Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media", Sov. Phys. JETP, vol. 34, no. 1, pp. 62-69, 1972.

- 51.X. Zhang, F. Ebskamp, B. F. Jorgensen, "Long-distance transmission over standard fiber by use of mid-way phase conjugation", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, no. 7, pp. 819-821, 1995.
- 52.X. Zhang, B. F. Jorgensen, "Analysis of optical phase conjugation using four-wave mixing in a dispersion-shifted fibre", IEE Proc.- Optoelectron., vol. 143, no. 3, pp. 195-199, 1996.
- 53.S. L. Zhang, J. J. O'Reilly, "Effect of dynamic stimulated Brillouin scattering on millimeter-wave fiber radio communication systems", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 9, no. 3, pp. 395-397, 1997.
- 54.J. Zhou, N. Park, J. W. Dawson, K. J. Vahala, M. A. Newkirk, B. I. Miller, "Efficiency of broadband four-wave mixing wavelength conversion using semiconductor traveling-wave amplifiers", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 6, no. 1, pp. 50-52, 1994.

ANEXO