

**MODELAMIENTO DEL EFECTO SELF PHASE MODULATION (SPM), EN UN  
SISTEMA DE COMUNICACIÓN OPTICO TENIENDO EN CUENTA FENOMENOS  
DE DISPERSION**

**HUGO ARMANDO BALLESTAS JOLY**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRICA Y ELECTRONICA**

**MEDELLÍN**

**2013**

**MODELAMIENTO DEL EFECTO SELF PHASE MODULATION (SPM), EN UN  
SISTEMA DE COMUNICACIÓN OPTICO TENIENDO EN CUENTA FENOMENOS  
DE DISPERSION**

**HUGO ARMANDO BALLESTAS JOLY**

**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 Director

---

Firma de Jurado

Medellín, Abril 23 de 2013

## **DEDICATORIA**

Gracias DIOS por todo lo bueno que has puesto en mi camino, y en llevarme de tu mano. A mi madre por tanta lucha para darme lo mejor, a mi padre por alentarme y a los que nunca creyeron en mi, aquí está el resultado.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa sus agradecimientos a:

William Segundo Puche Plaza, Magister en Ingeniería, por su colaboración en el conocimiento y en el buen enfoque del proyecto.

Y en general a todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este proyecto.

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <b>Características redes HFC Y xDSL</b> .....	22
Tabla 2 <b>Pérdidas por usuario en una red Óptica</b> .....	66
Tabla 3 <b>Valores de principales del MZ empleado</b> ¡Error! <b>definido.</b> 8	<b>Marcador no</b>
Tabla 4 <b>Valores de simulación fibra óptica</b> .....	69
Tabla 5 <b>Valores de simulación filtro óptico</b> .....	70
Tabla 6 <b>Valores de simulación fotodetector PIN</b> .....	70
Tabla 7 <b>Datos usados en la simulación del enlace de fibra</b> .....	73
Tabla 8 <b>Resultados de la señal eléctrica</b> .....	77
Tabla 9 <b>Resultados de la señal eléctrica</b> .....	81
Tabla 10 <b>Resultados Señal Óptica</b> .....	86
Tabla 11 <b>Resultados Señal Óptica</b> .....	89

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Arquitecturas de red FTTx.....	244
Figura 2	Incremento en capacidad de los enlaces de transmisión previsto para los próximos años. ....	¡Error! Marcador no definido.8
Figura 3	Partes que compone la fibra. ....	¡Error! Marcador no definido.5
Figura 4	Transmisor y Receptor Óptico.....	¡Error! Marcador no definido.6
Figura 5	Fenómeno de flexión de las fibras ópticas¡Error! Marcador no definido.6	
Figura 6	Configuración de índice de refracción trinchera¡Error! Marcador no definido.7	
Figura 7	Distancias máxima de un enlace para distintos tipos de fibra óptica a distintas longitudes de onda.....	¡Error! Marcador no definido.8
Figura 8	Perfiles de índice de refracción .....	40
Figura 9	Mach-Zender.....	372
Figura 10	Aislador óptico .....	653
Figura 11	Circulador Óptico .....	¡Error! Marcador no definido.4
Figura 12	Dispositivo Add-Drop teniendo en cuenta un circulador Óptico .	725
Figura 13	Generación del haz lumínico (Fuente óptica) .....	738
Figura 14	Técnica de implementación de SPM en fibra óptica¡Error! Marcador no definido.	
Figura 15	Representación del coeficiente de ganancia de Raman en una fibra de silicio en función de la longitud de onda.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 16	Enlace de red Óptica.....	¡Error! Marcador no definido.5
Figura 17	Componentes del OLT empleados en el enlace óptico. ....	¡Error! Marcador no definido.3
Figura 18	Componentes para el transmisor del enlace¡Error! Marcador no definido.3	
Figura 19	Graficas resultado de simulación para 10 Gbps¡Error! Marcador no definido.4	

Figura 20 <b>Graficas resultado de simulación Óptica para 10 Gbps. ....</b>	<b>¡Error!</b>
<b>Marcador no definido.9</b>	
Figura 21 <b>Resultados de la señal eléctrica .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.3</b>
Figura 22 <b>Graficas resultado de simulación Óptica para 2.5 Gbps. ....</b>	<b>¡Error!</b>
<b>Marcador no definido.6</b>	
Figura 23 <b>Curva OSNR Vs Distancia para 2,5 Gbps y 10 Gbps.....</b>	<b>87</b>



## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Anteproyecto

Anexo 2 Artículo

## CONTENIDO

<b>GLOSARIO .....</b>	<b>11</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>155</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>166</b>
<b>1. SISTEMAS DE ENLACES OPTICOS.....</b>	<b>199</b>
<b>1.1. Red de Acceso, teniendo en cuenta par Cobre .....</b>	<b>20</b>
<b>1.1.1. Red de Abonado Digital Asimétrica xDSL.....</b>	<b>20</b>
<b>1.1.2. Redes Hibridas Fibra Coaxial HFC.....</b>	<b>21</b>
<b>1.2. Red de Acceso Óptica .....</b>	<b>23</b>
<b>2. ANALISIS DE SEÑALES Y EVOLUCION DE LAS REDES OPTICAS</b>	<b>25</b>
<b>3. DISPOSITIVOS OPTICOS.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1. Fibra Óptica .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2. Acopladores Ópticos .....</b>	<b>41</b>
<b>3.3. Interferómetro de Mach-Zender .....</b>	<b>41</b>
<b>3.4. Aislador Óptico.....</b>	<b>42</b>
<b>3.5. Circulador Óptico .....</b>	<b>43</b>
<b>3.6. Filtros Ópticos .....</b>	<b>45</b>
<b>3.7. Detector Óptico .....</b>	<b>46</b>
<b>3.8. Transmisor Óptico Amplificadores Óptico .....</b>	<b>46</b>
<b>3.9. Amplificadores Óptico. ....</b>	<b>48</b>
<b>4. ANALISIS DE LOS FENOMENOS DE NO LINEALIDAD Y (SPM) EN LA RED OPTICA.....</b>	<b>49</b>
<b>4.1. Modulacion de Auto-Fase (SPM) .....</b>	<b>51</b>

<b>4.1.1. Aplicación del fenómeno no lineal SPM, generado por la fibra Óptica</b> .....	<b>53</b>
<b>4.2. Modulación de Fase Cruzada (XPM)</b> .....	<b>55</b>
<b>4.3. Mezcla de Cuarta Onda (FWM) Scattering Estimulado</b> .....	<b>56</b>
<b>4.4. Scattering Estimulado</b> .....	<b>57</b>
<b>4.5. Scattering Estimulado de Efecto Raman (FWM)</b> .....	<b>58</b>
<b>4.6. Scattering Estimulado de Efecto Brillouin</b> .....	<b>60</b>
<b>5. ANALISIS Y RESULTADOS</b> .....	<b>64</b>
<b>5.1. Modelo Físico de la Simulación</b> .....	<b>65</b>
<b>5.2. Análisis de los componentes utilizados en las simulaciones</b> .....	<b>67</b>
<b>5.2.1. Elementos del transmisor óptico</b> .....	<b>67</b>
<b>5.2.2. Elementos de la red de distribución Óptica</b> .....	<b>68</b>
<b>5.2.3. Elementos del receptor óptico</b> .....	<b>69</b>
<b>5.2.4. Instrumentos de medida</b> .....	<b>71</b>
<b>5.3. Simulación del Transmisor</b> .....	<b>72</b>
<b>5.4. Resultados de simulación para una tasa de transmisión de 10 Gbps con fibra de 20 km hasta 200 km</b> .....	<b>74</b>
<b>5.5. Resultados de simulación para una tasa de transmisión de 2.5 Gbps con fibra de 20 km hasta 200 km</b> .....	<b>83</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>90</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>92</b>

## GLOSARIO

- **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.
- **CATV**: es un sistema de servicios de televisión prestado a los consumidores a través de señales de radiofrecuencia que se transmiten a los televisores fijos a través de fibras ópticas o cables coaxiales. Usualmente se distribuyen a lo largo de la ciudad compartiendo el tendido con los cables de electricidad y teléfono; en oposición al método a través del aire que se utiliza en la radiodifusión televisiva tradicional (a través de ondas de radio) en la que se requiere una antena de televisión. Los programas de radio FM, la Internet de alta velocidad, la telefonía y otros servicios similares no televisivos también pueden ser proporcionados por este sistema, en los que la central de cable reciba estos otros tipos de señal.
- **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.
- **Factor Q:** Es un parámetro que mide la relación entre la energía reactiva que almacena y la energía que disipa durante un ciclo completo de la señal.
- **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.
- **Relación señal a ruido o SNR:** se define como el margen que hay entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe. Este margen es medido en decibelios.
- **Relación señal a ruido óptica o OSNR:** El parámetro óptico OSNR es el parámetro por excelencia utilizado para valorar la calidad de la transmisión óptica en los enlaces de comunicaciones. Sin embargo, las técnicas de medida y los equipos comerciales actuales, que contemplan tanto la medida tradicional fuera de banda ("OSNR") como la medida dentro de banda ("In-band OSNR"), no son válidos en los nuevos escenarios de red en los cuales se utilizan sistemas ROADMs, canales multiplexados en polarización (Pol-Mux), y la medida dentro de banda es la única opción posible de medida.

- **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

En este documento se presentan resultados de simulación de un enlace óptico, teniendo en cuenta el fenómeno no lineal SPM, con el propósito de analizar su desempeño. Se realizaron cierto número de pruebas con tasas de transmisión en bits para 2.5 y 10 Gbps, teniendo en cuenta una longitud de onda para la transmisión de datos 1550 nm. Se realizaron pruebas con amplificadores ópticos EDFAS para analizar la robustez del enlace a una distancia máxima de 200 km. Los resultados pueden ser útiles para determinar aspectos de implementación de esta tecnología teniendo en cuenta parámetros de OSNR, SNR y BER.

Palabras Claves: EDFA, SPM, Redes de acceso, comunicaciones ópticas, OSNR, SNR, Fibra Óptica.



## INTRODUCCIÓN

El gran crecimiento y expansión de Internet en los últimos años, con el consecuente incremento de usuarios y tráfico, ha hecho que aumente la necesidad de ancho de banda en las redes de telecomunicación actuales. Esta demanda se debe en gran medida a la popularización de Internet y a la explosión de nuevos servicios que de ello se deriva y que exigen a la red mayor eficiencia, en términos de optimización de recursos y prestaciones. Es de esperar que en un futuro inmediato esta tendencia continúe sobre todo a la vista del fuerte incremento del tráfico de información (Video, Voz, etc). En la actualidad, la implementación y diseño de redes totalmente ópticas se han desplegado como una solución de acceso rápida para el transporte de información, pero a su vez representa un alto costo económico. El empleo de la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) en redes totalmente ópticas, se considera como una posible alternativa para ofrecer la alta tasa de bits requerida por los futuros servicios. Las tecnologías WDM en redes totalmente ópticas, se presentan como una alternativa de simple implementación, permitiendo el desarrollo de redes escalables y proporcionan al usuario final tasas de bits que van desde 100 Mbps hasta varios Gbps.

Algunos inconvenientes en la implementación de estas tecnologías son su falta de estandarización y sus altos costos de implementación y operación [2].

Las transmisiones ópticas a largas distancias entre 100km hasta 1000km aproximadamente, con múltiples usuarios, se convierten en un reto para los diseñadores de este tipo de redes y de gran importancia para los centros de investigación, analizar los comportamientos de ineficiencia y efectos no lineales como FWM o SPM que se pueden presentar en la transmisión, sobre todo en la fibra óptica teniendo en cuenta WDM.

A través del tiempo han existido muchas mejoras a medida que las redes ópticas han ido evolucionando, por ejemplo, las tasas máximas de datos han conseguido los toques más altos considerando la tecnología actual. Con este desarrollo se pretende iniciar de un conjunto de simulaciones que permitan evaluar el desempeño de enlaces en una red óptica, lo cual es de utilidad para los desarrolladores y prestadores de servicio, ya que ayudaría a determinar la mejor configuración de equipos y tecnología para alcanzar un alto desempeño del sistema. 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 trafico 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 SPM 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].

Uno de los desafíos actuales consiste en los aspectos de implementación y selección de componentes a emplear dependiendo del número de usuarios y requerimientos de tasas de bits de las zonas geográficas a cubrir, lo cual tendría un impacto directo en los costos de implementación. Un aspecto interesante es estimar el desempeño de la red al emplear tasas de 10 Gbps. El despliegue de esta tecnología debe realizarse en forma gradual, de forma que se incremente la tasa de bits y se agreguen más usuarios a la red óptica a lo largo del tiempo [6].

Este documento permitirá analizar el Impacto del fenómeno de no linealidad SPM en un enlace óptico teniendo en cuenta fenómenos de dispersión, lo que permitiría establecer parámetros de desempeño ofrecidos por las redes de acceso ópticas. Los resultados de las simulaciones permitirían contribuir al problema de establecer que tan robusto es el sistema de enlace óptico, buscando el mayor desempeño posible (alta velocidad de operación, baja distorsión, etc) y bajos costos. Este conocimiento puede ser interesante para una empresa de telecomunicaciones que este migrando hacia las tecnologías ópticas, ya que ayudaría a determinar la mejor configuración de equipos y tecnología para alcanzar una alta competitividad en el medio.

Este proyecto estimula procesos de aprendizaje y practica de conocimientos en el área de sistemas de comunicaciones que motivan un desarrollo profesional.

## 1. SISTEMAS DE ENLACES OPTICOS

En la actualidad los grandes centros de investigación a nivel mundial han enfocado sus estudios a analizar enlaces ópticos, esto ha cobrado gran importancia en los últimos años en el sector de las telecomunicaciones, debido al alto tráfico de información a altas tasas de velocidad, también al incremento en los requerimientos de servicio que demandan una gran cantidad de servicios. Para satisfacer las necesidades en los requerimientos de ancho de banda, es necesario incrementar la tasa de transmisión que ofrecen las distintas tecnologías de acceso basadas en cobre HFC (Híbrido de Fibra y Coaxial) y DSL (Digital Subscriber Line), las cuales hoy por hoy, han sido las más instaladas actualmente en el mundo<sup>1</sup>.

Las redes ópticas pueden llenar las necesidades y requerimientos de los usuarios, aumentando la calidad de los servicios y aplicaciones. En este sentido, los organismos de estandarización en telecomunicaciones han venido trabajando en la regulación de este tipo de redes y hoy se cuenta con nuevos estándares para las redes ópticas de última generación, los cuales son el resultado de un programa de trabajo iniciado por la UIT para definir tecnología óptica punto a punto, permitiendo el despliegue de una red óptica. El uso de diferentes longitudes de ondas ópticas para transmitir múltiples señales sobre una única fibra óptica en la tecnología DWDM permite ofrecer una capacidad de servicio muy alta sobre los cables de fibra, obteniendo el máximo rendimiento de la infraestructura existente. La industria que aplica el concepto de los sistemas de enlaces ópticos intenta satisfacer las crecientes necesidades de proveedores de servicio, con insaciables clientes de ancho de banda que demandan conexiones incluso mayores." La red óptica responde a la urgente necesidad de los proveedores de telecomunicaciones para gestionar redes de alta capacidad y proporciona la posibilidad de evolucionar a una plataforma multiservicio que soporte Internet, IP, otros servicios de transporte de datos basados en paquetes y tráfico convencional", dice Peter Wery, Presidente del ITU-T Study Group 15. [2]

---

<sup>1</sup> Point-topic World Broadband Statistics: Short report. Q2 2011

Uno de los beneficios que ofrece la implementación de sistemas de enlaces ópticos es la necesidad de transmitir información de manera robusta a mayores distancia, sin que haya pérdida de información, permitiendo disminuir el número de equipos y espacio ocupado<sup>1</sup> a la vez que se disminuye el consumo energético. El ahorro más significativo de espacio y consumo energético se puede lograr en las redes de acceso y agregación<sup>1</sup>.

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

### **1.1. Red de Acceso, teniendo en cuenta par Cobre**

Las redes de acceso basadas en cobre son tecnologías que ofrecen servicios con requerimientos inferiores a 2 Mbps.

#### **1.1.1. Red de Abonado Digital Asimétrica xDSL**

Las tecnologías xDSL " Asymmetric Digital Subscriber Line" o Línea de Abonado Digital Asimétrica permiten transmitir información digital a alta velocidad sobre las líneas telefónicas ya existentes en los hogares y los negocios. Permiten entregar conexión permanente con velocidades en el canal descendente que van desde los 100 Kbps hasta los 52 Mbps. Es una tecnología en que la tasa de bits depende de la distancia entre la central telefónica local y los dispositivos del usuario, el calibre del cable telefónico y el tipo de tecnología DSL. Las tecnologías xDSL más difundidas son ADSL y VDSL las cuales permiten conexiones Asimétricas [10].

- ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line): tecnología asimétrica donde el ancho de banda de bajada es superior al de subida. Desarrollada para la navegación web y los usos más típicos de Internet, ofreciendo velocidades entre 8-10 Mbps en el canal descendente y hasta 1 Mbps en el canal ascendente. Es adecuada para uso residencial ya que posibilita a los usuarios usar la línea telefónica y simultáneamente navegar por Internet.

- VDSL (Very high bit-rate Digital Subscriber Line) es la modalidad más rápida de las tecnologías xDSL por emplear un tramo de fibra óptica y puede alcanzar tasas de bits entre 13 y 52 Mbps desde la central hasta el abonado y de 1.5 a 2.3 Mbps en sentido contrario, por lo que se trata de un tipo de conexión también asimétrica. La máxima distancia del equipo del proveedor al equipo del usuario no puede superar los 1500 metros<sup>2</sup>.
- ADSL2 y ADSL2+: son actualmente las tecnologías de banda ancha más utilizadas en el mundo que han mejorado las características de velocidad, alcance y consumo energético respecto a la versión ADSL original. ADSL2 puede proporcionar entre 8 y 12 Mbps extendiendo el alcance de ADSL en 300 metros. ADSL2+ ofrece velocidades hasta 16 Mbps a una distancia de 1.5 Km.<sup>3</sup>.

### **1.1.2. Redes Híbridas Fibra Coaxial HFC**

La tecnología HFC (Híbrido de Fibra y Coaxial) consiste en una red híbrida que emplea fibra óptica y cable coaxial y es empleada para el transporte de contenidos como vídeo, datos, y voz.

En HFC el cable instalado de fibra óptica va desde la cabecera (centro de distribución) hasta los nodos próximos a los abonados residenciales. Desde estos nodos se distribuye el contenido mediante cable coaxial a los hogares. Una red de acceso HFC está constituida por: los módems ubicados en las instalaciones del usuario, el CMTS (Cable Modem Termination System) ubicado en las instalaciones del proveedor del servicio, los nodos ópticos donde llega la señal de fibra e inicia la del cable coaxial, los amplificadores de radiofrecuencia y los elementos pasivos para la distribución de las señales de la red [12].

---

<sup>2</sup> ROGELIO MONTAÑANA, Acceso residencial de banda ancha, XDSL, VDSL

<sup>3</sup> DSL. [En línea]

<<http://www.bandaancho.es/Informacion/Tecnologias/TecnologiasCableadas/Paginas/ADSL.aspx>>. [Consulta: 29 Marzo 2012]

Una tasa típica de transmisión en el canal descendente puede ser de 30 Mbps con un retorno variable entre 128 kbps y 10 Mbps. Los canales en HFC son compartidos por varios usuarios<sup>3</sup>.

La estandarización de las redes HFC se ha hecho mediante el estándar DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification), que es un estándar internacional, no comercial, que define los requerimientos de la interfaz de soporte de comunicaciones entre el CMTS y los cable módems, permitiendo la transferencia de datos a un sistema CATV sobre una infraestructura Híbrida-FibraCoaxial (HFC) existente<sup>4</sup>.

En la Tabla 2 se presentan las principales características de las tecnologías HFC y DSL.

Tabla 1 Características redes HFC Y xDSL

TECNOLOGÍA	CAPACIDAD	ALCANCE	VENTAJAS	LIMITACIONES
<b>HFC</b>	40 Mbps/canal	100Km con amplificador	Usa red TV cable	BW compartido
	3Mbps/usuario			
<b>ADSL</b>	12Mbps(0.3Km)	Max. 5.4Km	Usa red telefónica	BW depende la distancia
	1.5 Mbps(5.4Km)			
<b>VDSL</b>	52 Mbps(0.3Km)	Max. 1.4Km desde el nodo		
	13Mbps(1.3Km)			
<b>ADSL 2+</b>	26Mbps(0.3Km)	Max. 2.7Km		
	7.5Mbps(2.7Km)			

Fuente: Amaya, F. Redes de Acceso Ópticas: Desafíos y Perspectivas. La Red de Acceso, Fibra hasta el hogar. Cali: Universidad Javeriana

<sup>4</sup> Redes HFC (Híbrida FibraCoaxial) y sus vulnerabilidades. [ En línea]<<http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo322/1s08/project/JuanCartajena.pdf>>. [Consulta: 30 Marzo 2012]

## 1.2. 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.

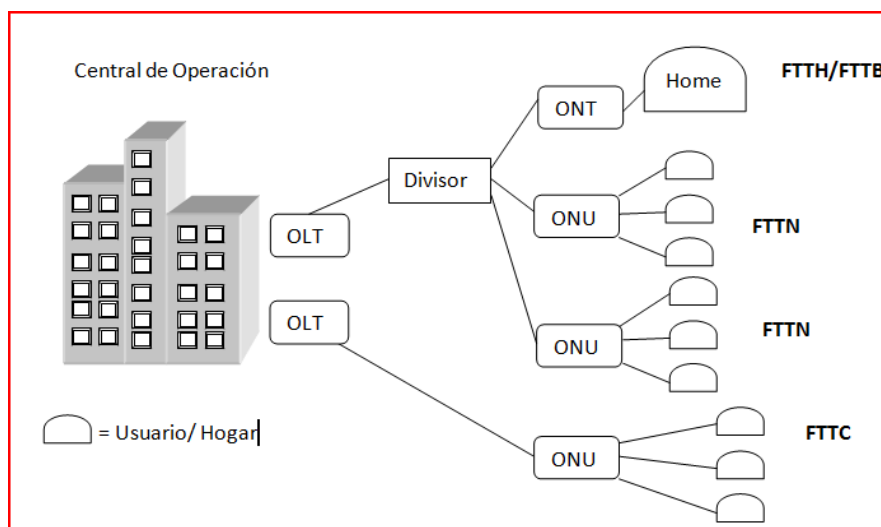
De acuerdo con ITU G.983.1, los componentes de una red de acceso óptica (OAN, optical access network) son:

- 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 1.



Figura 1 Arquitecturas de red FTTx



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 RDSI<sup>5</sup>.

<sup>5</sup>UIT - T G.984.1. Marzo 2003. Serie G: sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales.

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.

## 2. ANALISIS DE SEÑALES Y EVOLUCION DE LAS REDES OPTICAS

Los principales efectos de propagación a través de la fibra óptica que afectan el desempeño son el ruido, la dispersión y las no linealidades.

Las principales fuentes de ruido en una red óptica son: el ruido térmico, el ruido de disparo y el ruido generado por fuentes externas. El ruido de disparo (shot noise) es el resultado de la naturaleza aleatoria de la luz, donde su intensidad es igual a la raíz cuadrada del número de fotones detectados<sup>6</sup>. La instrumentación empleada para el análisis y medición de la red óptica introduce ruido y una fuente común es el ruido térmico que es producido por la vibración de electrones al estar trabajando a una temperatura superior a 0 grados Kelvin<sup>23</sup>.

En general la dispersión produce ensanchamiento del pulso limitando la tasa de bits. En las fibras monomodo el principal efecto dispersivo es la dispersión cromática, se expresa en ps / (nm\*km) y depende del tipo de fibra, la longitud de la fibra y el ancho espectral de la fuente óptica. La dispersión produce ensanchamiento de los pulsos ópticos, que si es excesiva, provoca interferencia inter-simbólica disminuyendo la calidad del servicio en la comunicación.

La dispersión por polarización también produce ensanchamiento del pulso, limitando la capacidad de transmisión a altas velocidades, especialmente en aquellos sistemas con tasas superiores o iguales a los 10 Gbps. Es un parámetro

---

Arquitectura de la red de acceso óptico

<sup>6</sup> Fundamentos de espectroscopía Raman. [En línea].

<<http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6887/03Rpp03de11.pdf?sequence=3>>. [Consulta 30 de Marzo de 2012]

difícil del medir y de compensar dada su naturaleza estadística, ya que depende fuertemente de las condiciones físicas de instalación y fabricación del cable<sup>7</sup>.

Los efectos no lineales son nocivos al incrementar la potencia a través de la fibra óptica. A potencias de transmisión alrededor de 1 mW con pocos canales de transmisión, este efecto es poco nocivo en la comunicación. Debido a las no linealidades, la potencia de transmisión altera las propiedades del medio. En este caso el índice de refracción de la fibra depende de la intensidad de la radiación. En las fibras ópticas lo efectos no lineales pueden ser clasificados en dos. El primero son los efectos originados por la interacción de la radiación luminosa y variaciones del medio (interacción fotón – fonón); se incluyen en este grupo las dispersiones estimuladas de Brillouin y Raman. El segundo grupo de efectos no lineales son producidos por la dependencia del índice de refracción con respecto a la intensidad del campo aplicado y los efectos son: mezcla de cuatro ondas (FWM), la auto modulación de fase (SPM) y la modulación cruzada de fase (XPM).<sup>8</sup>

Debido a los niveles de potencia y tasas de bits que se emplean en PON, la dispersión es el efecto de propagación que principalmente afecta el BER. La dispersión a lo largo de la fibra limita la máxima tasa de bits y también afecta el valor del BER.

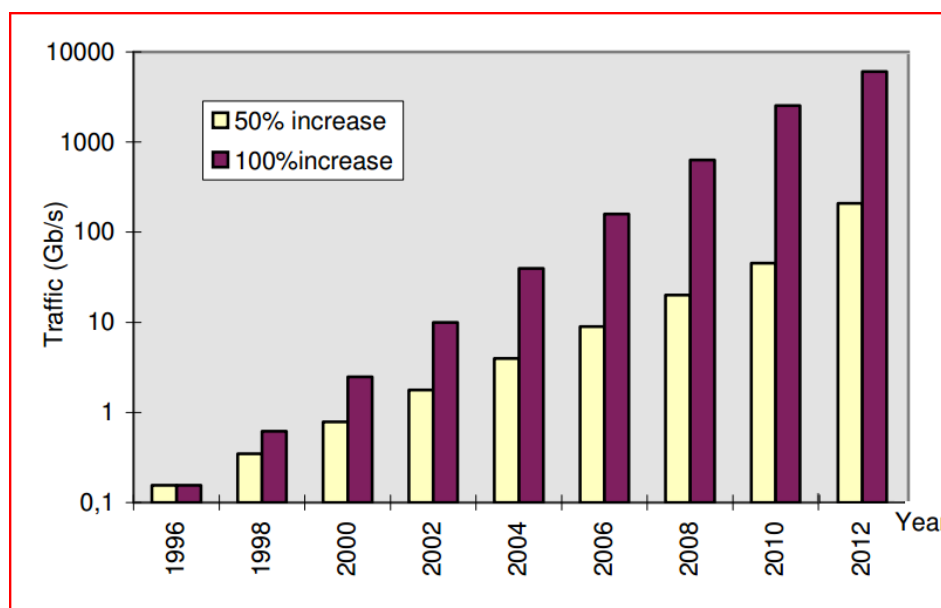
Las redes ópticas se proyectan para ser el medio de comunicación del futuro, por sus altos beneficios cuando de enviar información se trata. Se estima que más de mil millones de personas tienen acceso a Internet pero con insuficiente ancho de banda para soportar las nuevas aplicaciones del siglo XXI. 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

<sup>7</sup> 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](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]

<sup>8</sup> 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](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]

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.

Figura 2. Incremento en capacidad de los enlaces de transmisión previsto para los próximos años.



Fuente: Redes HFC (Híbrido FiberCoaxial) y sus vulnerabilidades. [En

línea] <<http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo322/1s08/project/JuanCartajena.pdf>>. [Consulta: 30 Marzo 2012]

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, 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.

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.

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<sup>9</sup>. De otro lado, para extender el alcance, puede obtenerse amplificación óptica en la ODN usando EDFAs o amplificación Raman distribuida<sup>10</sup>. 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<sup>11</sup>.

Respecto al incremento de la tasa de bits, ITU e IEEE están trabajando en la estandarización de PON a velocidades de 10 Gbps<sup>22</sup> 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 sistema. La Figura 5 presenta la evolución de las tecnologías ópticas en el acceso<sup>7</sup>.

---

<sup>9</sup> R. Lin, "Next Generation PON in Emerging Networks," Optical Fiber Communications Conference OFC/NFOEC 2008, pp. 1-3. February 2008.

<sup>10</sup> 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

<sup>11</sup> Davey, R., Healey, P., Hope, I., Watkinson, P., Payne, D., Marmur, O., Ruhmann, J. and Zuiderveld, Y., "DWDM reach extension of a GPON to 135 km", Journal of Lightwave Technology, v10. 24, no. 1, pp. 29-31, 2006

### 3. DISPOSITIVOS OPTICOS

Es importante conocer los dispositivos de una red óptica, saber cómo es su funcionamiento a través de la red, por tal motivo trataremos de forma muy resumida algunos dispositivos con que se trabajaron en este proyecto.

#### 3.1. Fibra Óptica

Para entender de manera rápida este concepto, podemos decir que la fibra óptica es una estrecha hebra de vidrio o silicio fundido que propaga cierta intensidad lumínica. El grosor del filamento es comparable al grosor de un cabello humano, es decir, aproximadamente de 0,1 mm [3]. La importancia de los sistemas de comunicaciones ópticas se debe a:

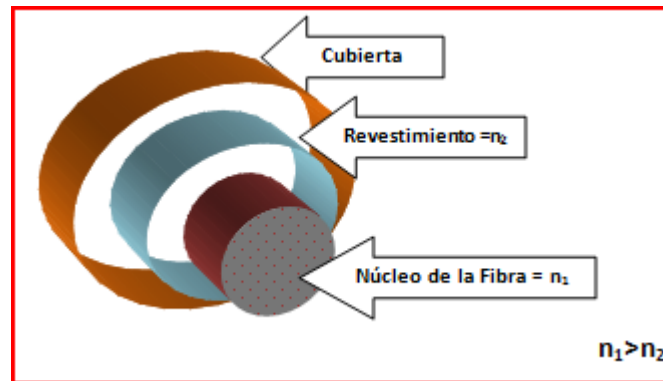
Su baja atenuación, por ejemplo en 3ª ventana (1550nm) la atenuación es de 0.2dB/km. Esto permite emplear enlaces de forma que cada 80 o 100 km coloquemos un amplificador o regenerador (por contra cuando se emplea un cable coaxial se necesita un regenerador o amplificador cada 2km). Su gran capacidad 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 3: Un Núcleo, Un Revestimiento y una cubierta de plástico como se observa en la figura B.

Figura 3. Partes que compone la fibra.



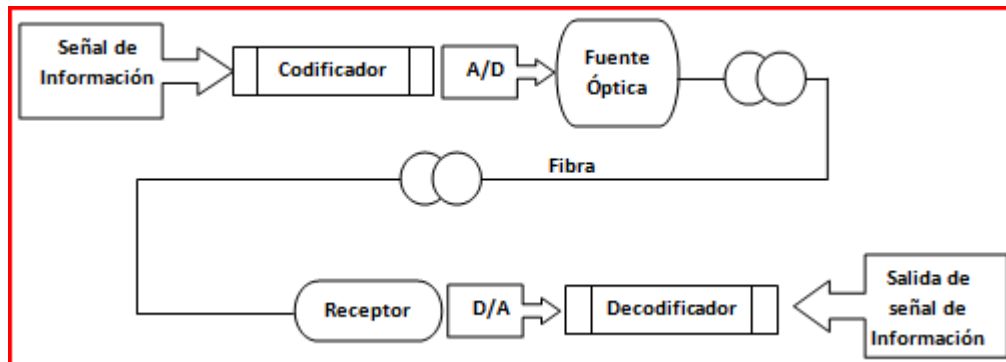
**El núcleo (core)**, es la parte interior de la fibra, que está fabricado por un material dieléctrico, normalmente, vidrio de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) dopado con materiales como  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{GeO}_2$  o  $\text{P}_2\text{O}_5$  para ajustar su índice de refracción, aunque también 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.

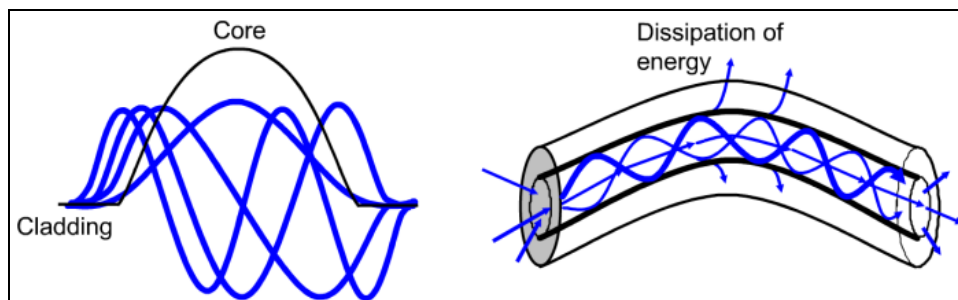
Figura 4. Transmisor y Receptor Óptico.



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 8.

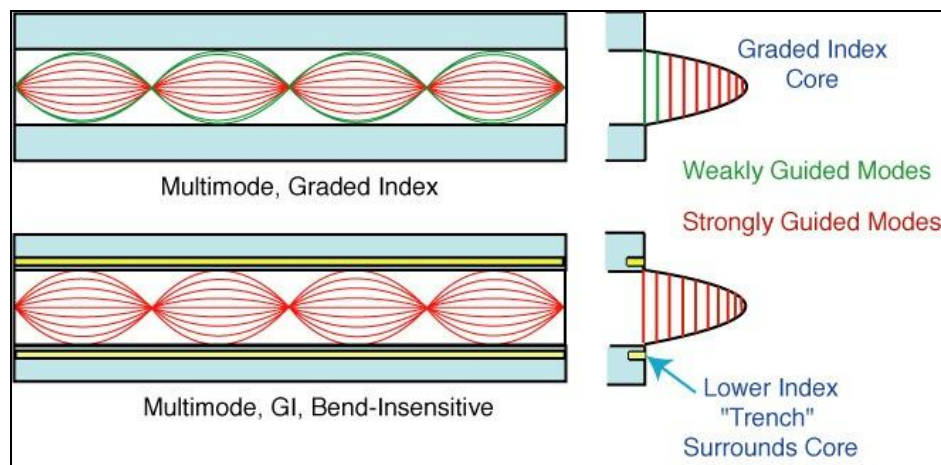
Figura 5 Fenómeno de flexión de las fibras ópticas



**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 6<sup>8</sup>.

Figura 6 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.

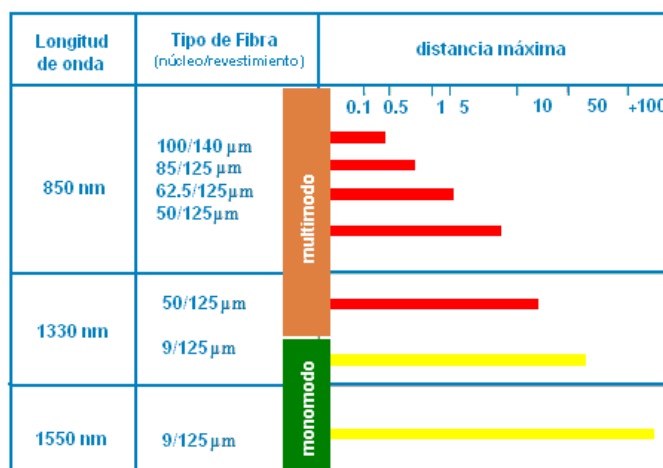
Por último desde el punto de vista de la propagación tenemos, las fibras Monomodo, fibra Multimodo, Fibra Monomodo Estándar, Fibra DSF, Fibra NZDSF, Fibras ópticas de Índice en escalón o de salto de índice y por ultimo Fibras Ópticas de índice gradual.

**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.

**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  $50\mu\text{m}$  ó  $62.5\mu\text{m}$ , por lo que el acoplamiento de la luz es más sencillo que las anteriores.

Figura 7 Distancias máxima de un enlace para distintos tipos de fibra óptica a distintas longitudes de onda [11]



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

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

**Fibra DSF (Dispersion Shifted Fiber).** Las fibras DSF son fabricadas de tal manera que logran tener una 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 fenómeno de mezclado de cuarta onda (FWM) que imposibilitan la utilización de esta fibra óptica en sistemas WDM.

**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.

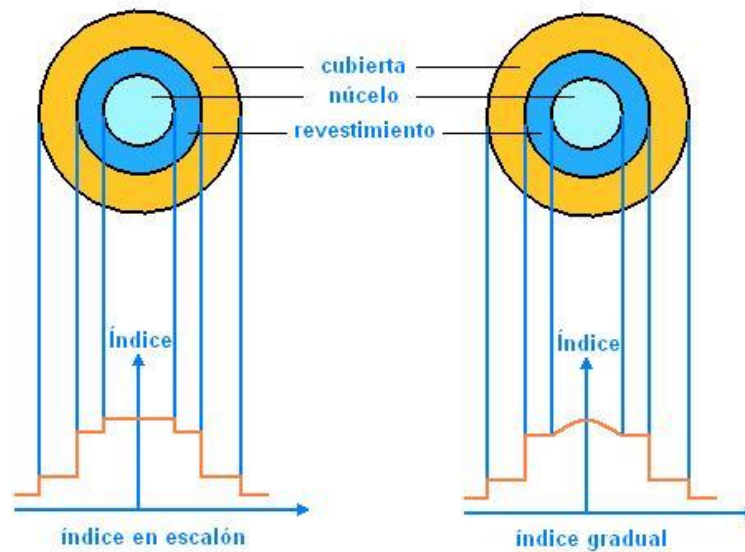
Dentro de las fibras multimodo tenemos dos tipos de fibra según su índice de refracción tenemos:

**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.

**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 8. Perfiles de índice de refracción



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]

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

### 3.2. 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.

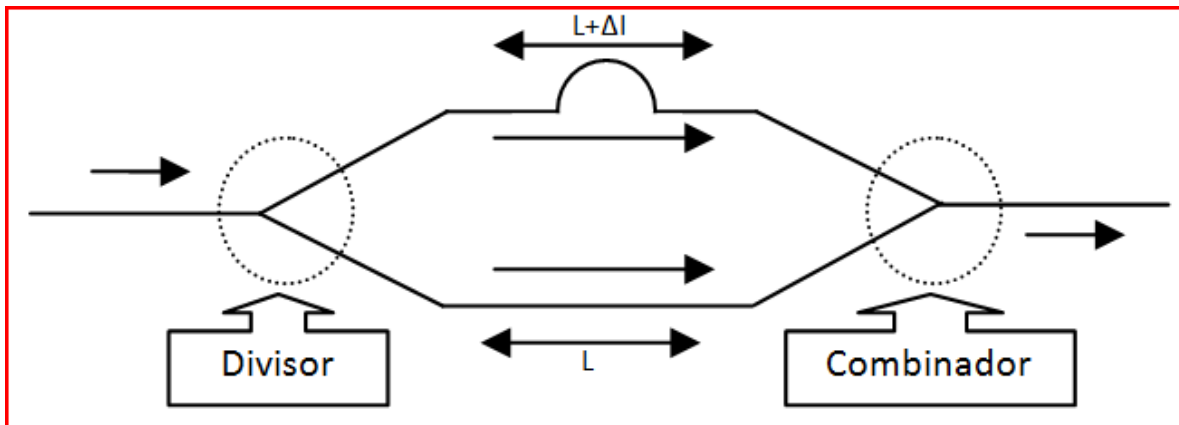
Las configuraciones en que se presentan estos dispositivos son:

- **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).

### 3.3. Interferómetro de Mach-Zender

La estructura básica de un interferómetro de Mach-Zender (MZI, Mach-Zender Interferometre ), 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  $\Delta l$ . 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 9. 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.

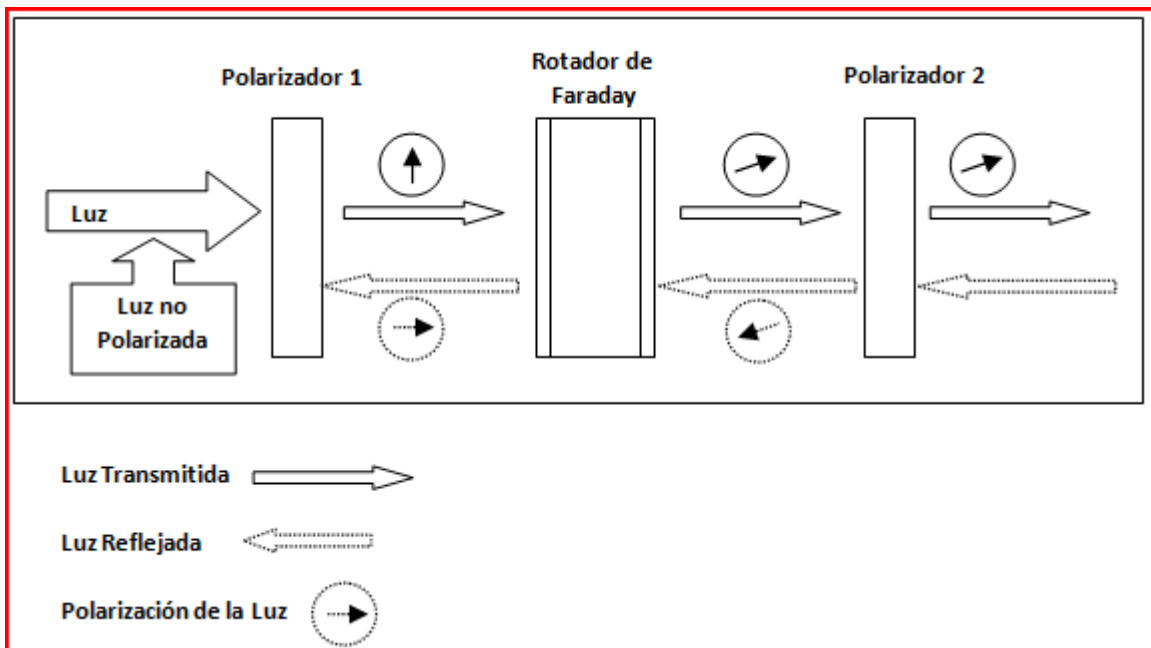
### 3.4. Aislador Óptico

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  $45^\circ$  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  $45^\circ$  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.

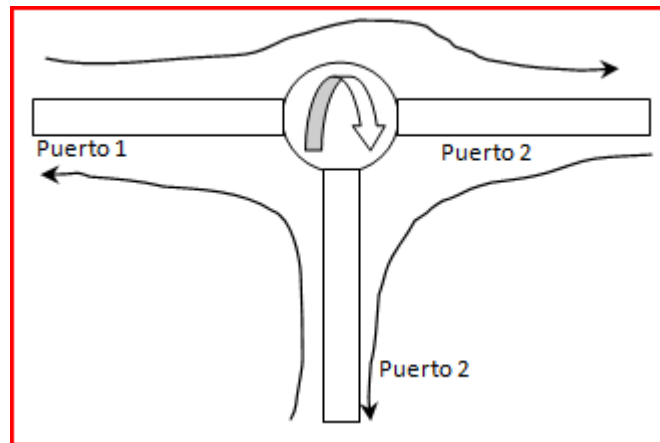
Figura 10. Aislador óptico



### 3.5. Circulador Óptico

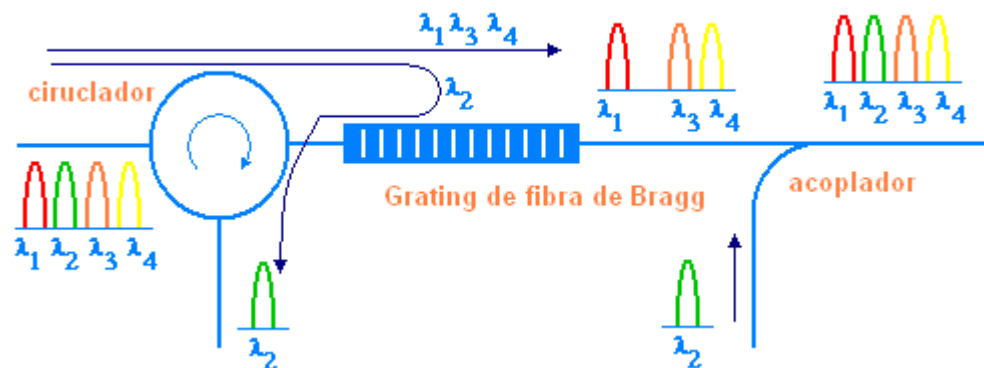
El circulador es un tipo de aislador óptico con varios puertos cuya funcionalidad es permitir el paso de toda la luz que entra por uno de sus puertos hacia el siguiente puerto. Como se muestra en el siguiente esquema la luz que entra por el puerto 1 se dirige al puerto 2, la entra por el puerto 2 se dirige al 3 y así sucesivamente.

Figura 11. Circulador Óptico



En la siguiente figura se muestra el esquema de un circulador de cuatro puertos, 3 de ellos de entrada/salida y el cuarto sólo de salida. El funcionamiento de este esquema se basa en el visto para el aislador óptico independiente de la polarización de la señal de entrada. Éste está formado por rotadores de Faraday, láminas en  $\lambda/2$  y SWP Spatial Walk-off Polarizator. Como puede observarse la señal que entra por el puerto 1 se dirige únicamente al puerto 2, la señal que entra por el puerto 2 se dirige al 3 y así sucesivamente. Los circuladores son muy útiles para construir dispositivos ópticos Add/Drop junto con grating sde Bragg de fibra. Estos dispositivos permiten extraer añadir una longitud de onda. En la siguiente figura se muestra un ejemplo.

Figura 12. Dispositivo Add-Drop teniendo en cuenta un circulador Óptico [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]

A la entrada del circulador llega una señal WDM que es transmitida hacia el puerto 2 del circulador, donde hay un grating de bragg de fibra tal que refleja la señal en  $\lambda_2$  de forma que al volver al puerto 2 del circulador es dirigida al puerto 3 de éste, de forma que se ha extraído un canal concreto de la señal WDM de entrada. Para añadir a la señal WDM una nueva señal en  $\lambda_2$  se emplea un acoplador.

### 3.6. 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.

### **3.7. 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 la potencia óptica. Un amplificador front-end , que amplifica la señal eléctrica decisiva, 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.

### **3.8. 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 [Agr93] [Cap98].

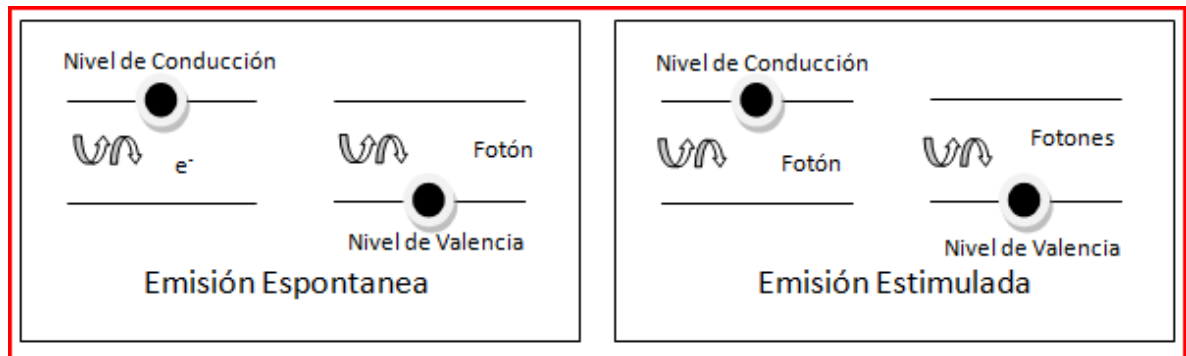
Para entender los fundamentos de la radiación láser antes es necesario conocer varios conceptos, como son: los procesos de absorción y emisión de radiación y la inversión de la población.

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].



Figura 13. Generación del haz lumínico (Fuente óptica)



### 3.9. 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 toda la distancia del enlace.

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.

#### **4. ANALISIS DE LOS FENOMENOS DE NO LINEALIDAD Y (SPM) 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).

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]:

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

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]:

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

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  $\text{SiO}_2$ .

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

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

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 ~~paraparar~~ 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].

#### 4.1. Modulación de Auto-Fase (SPM)

El efecto SPM surge debido 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 (eficiencia del Pulso óptico), que a su vez modificará los efectos de la dispersión sobre el pulso.

Para comprender los efectos de la SPM, se puede considerar un sistema de un único canal donde el campo eléctrico es de la forma [38]:

$$E(z,t) = E * \cos(\omega_0 t - \beta_0 z), \quad (4)$$

En presencia de no linealidades en la fibra, para determinar cómo evoluciona dicho campo a lo largo de la fibra se necesita hallar la constante de propagación  $\beta_0$ . Al resolver la ecuación de ondas que incluye los efectos de las no linealidades, se puede encontrar que la ecuación simplificada para la constante de propagación  $\beta_0$  es la siguiente [39]:

$$\beta_0 = \frac{\omega_0}{c} \left( n + \frac{3}{8 * n} X^{(3)} E^2 \right), \quad (5)$$

De esta forma el campo eléctrico  $E(z,t)$  es una senoide cuya fase cambia con  $E^2 z$ .

Puesto que la relación entre  $\beta$  y el índice de refracción  $n$  en el régimen lineal es  $\beta_2 = \omega n/c$ , la ecuación anterior se puede interpretar como una dependencia del índice de refracción con la intensidad.

$$\hat{n}(E) = n + \frac{3}{8 * n} X^{(3)} E^2 = n + \bar{n} * E^2, \quad (6)$$

Donde  $\bar{n}$  es el coeficiente de índice no lineal.

Debido a la SPM, la fase del campo eléctrico contiene un término  $E^2$  que es proporcional a la intensidad del campo. Por lo tanto, cada parte del pulso sufrirá un desplazamiento de fase diferente dependiendo de la amplitud de cada una de estas partes [40].

El signo del desplazamiento de fase debido a la SPM es negativo, por lo tanto el pico del pulso sufre el máximo desplazamiento de fase en valor absoluto (téngase en cuenta que sin valor absoluto, el desplazamiento de fase sería negativo y por lo tanto hablaríamos de mínimos), y los bordes sufren unos desplazamientos de fase cada vez menores. Ya que la frecuencia es la derivada de la fase, el borde de atrás del pulso sufre un desplazamiento de frecuencia negativo y el de delante uno positivo. Por último, como el chirp es proporcional a la derivada de la frecuencia, esto implica que el factor de chirp  $k$  es positivo. Así se llega a la conclusión de que la SPM induce un chirp positivo en los pulsos.

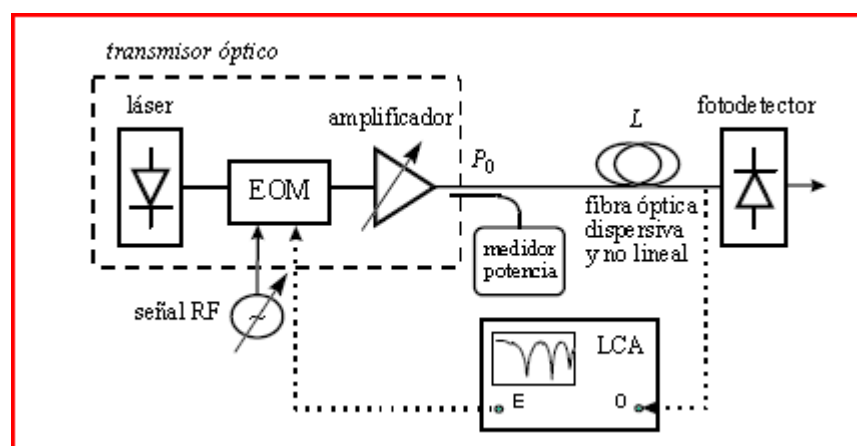
El efecto de este chirp positivo depende del signo del parámetro  $\beta_2$ . Si  $\beta_2 > 0$  los pulsos experimentan una dispersión normal, y si  $\beta_2 < 0$  los pulsos experimentan una dispersión denominada anormal. Por lo tanto, en el régimen de dispersión normal  $\beta_2 > 0$ , y el producto  $k\beta_2 > 0$ , por lo que la SPM aumenta el efecto de

ensanchamiento provocado por la dispersión. Sin embargo, en el régimen de dispersión anómalo  $\beta_2 < 0$ , si los efectos de la dispersión son cercanos pero superiores a los de la SPM, el efecto no lineal reduce el ensanchamiento que se sufre debido a la dispersión [40].

#### 4.1.1 Aplicación del fenómeno no lineal SPM, generado por la fibra Óptica.

Es importante saber cómo mermar los fenómenos de dispersión cromática en los sistemas de radio sobre fibra operando a frecuencias microondas. En la **figura 14** se muestra una técnica de SPM en donde la potencia óptica que se induce a la entrada de la fibra teniendo en cuenta la longitud de esta, aunque generalmente a potencias supremamente altas se generan mejores prestaciones. Ahora el SPM generado por la fibra, cuando inyectan altos niveles de potencia óptica se genera un chirp de frecuencia. Este chirp inducido por el SPM depende de la potencia y de la longitud de la fibra [43], en lugar de lo que ocurre con el chirp del transmisor óptico que depende de las amplitudes de señal o del voltaje de polarización del modulador.

Figura 14. Técnica de implementación de SPM en fibra óptica



La función de transferencia de una fibra dispersiva alimentada por un transmisor óptico con chirp puede expresarse como [43]:

$$F_{tr\text{anf}}_{w_0} = \cos\left(\frac{\beta_2 w_0^2 L}{2}\right) + \alpha_c \text{sen}\left(\frac{\beta_2 w_0^2 L}{2}\right), \quad (7)$$

Donde L es la longitud de la fibra, y los parámetros de chirp  $\alpha_c$  negativos, desplazan los nulos hacia frecuencias mayores.

Sin embargo resulta interesante comparar el chirp inducido por SPM con aquel generado por los transmisores ópticos, de tal forma que se puede calcularse un parámetro de chirp efectivo,  $\alpha_{SPM}$  A partir de la ecuación (G) y considerando la función de transferencia de la fibra con no linealidades,  $F_{tr\text{anfSPM}}(w_e)$

$$F_{tr\text{anfSPM}}(w_e) = \frac{F_{tr\text{anf}}_{SPM}(w_e) - \cos\left(\frac{\beta_2 w_0^2 L}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\beta_2 w_0^2 L}{2}\right)}, \quad (8)$$

En los enlaces de RoF o radio sobre fibra, los cuales trabajan a 1550nm se benefician de las pocas pérdidas de la fibra y del uso de los amplificadores ópticos como los EDFA, con el objetivo de propagar de manera más pura las señales. Sin embargo las fibras presentan fenómenos de dispersión cromática considerables a longitudes de 1550 nm, además de diversos efectos no lineales. Los desvanecimientos que se presentan por los fenómenos de no linealidad se producen de forma periódica con la variación de la frecuencia de modulación o la longitud de fibra óptica conociéndose como efecto de supresión de la portadora. Su explicación se debe al diferente desfase que introduce la dispersión cromática sobre cada una de las bandas de modulación óptica, lo cual conduce a una cancelación de ambas al realizar la fotodetección para ciertas frecuencias o longitudes de fibra. Sin embargo, una técnica muy simple consiste en utilizar un transmisor óptico de gran potencia para inducir efectos no lineales, tales como SPM, en el enlace de fibra [48]. El fenómeno de chirp que es provocado por el

SPM de la fibra genera un aumento en el ancho de banda por longitud de la fibra; su efecto es similar al generado por los transmisores ópticos con chirp de polaridad negativa [47], de tal forma que se produce un alejamiento de los nulos de transmisión de la función de transferencia del sistema al aumentar la potencia óptica inyectada a la entrada de la fibra.

#### 4.2. Modulación de Fase Cruzada (XPM)

La CPM surge debido a que el índice de refracción efectivo para una onda depende no sólo de la intensidad de esa onda sino también de la intensidad de cualquier otra onda que se propague junto a ella. Por este motivo, en sistemas WDM, el desplazamiento de fase dependiente de la intensidad del campo y el consecuente chirp inducido por el efecto de la SPM se agrava a causa de las intensidades de las señales de los otros canales.

Para comprender los efectos de la CPM es suficiente con considerar un sistema WDM con dos canales [39]:

$$E(z,t) = E_1 \cos(\omega_1 t - \beta_1 z) + E_2 \cos(\omega_2 t - \beta_2 z), \quad (9)$$

Resolviendo la ecuación de ondas que incluye los efectos de las no linealidades, se puede encontrar que el campo eléctrico resultante tiene una componente sinusoidal en  $\omega_1$  que a medida que se propaga a través de la fibra adquiere una fase no lineal dependiente de la intensidad dada por [39]:

$$\varphi_{NL} = \frac{\omega_1 \bar{n}}{c} [ |E_1|^2 + 2|E_2|^2 ] * z, \quad (10)$$

El primer término se debe a la SPM, mientras que el efecto del segundo término es lo que se denomina modulación de fase cruzada o CPM. Observe que si  $E_1 = E_2$ , para que los dos campos tengan la misma intensidad, el efecto de la CPM



sería dos veces peor que el de la SPM. Además, como el efecto de la CPM es cualitativamente similar al de la SPM, es lógico esperar que la CPM aumente el chirp agravando los consecuentes efectos del ensanchamiento del pulso en sistemas WDM.

En la práctica, el efecto de la CPM en sistemas WDM que operan sobre fibras monomodo se puede reducir de forma significativa aumentando el espaciado entre los canales. Así, debido a la dispersión, las constantes de propagación  $\beta_i$  llegan a ser lo suficientemente diferentes como para que los pulsos de cada canal viajen de forma independiente. Esto es, la interacción arriba descrita disminuye porque "no les da tiempo a modificarse de fase". Otra forma de reducir el efecto de la CPM es tener canales situados en frecuencias suficientemente distanciadas, ya que al propagarse se separan más [43].

### 4.3. Mezcla de Cuarta Onda (FWM)

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]:

$$E(z, t) = \sum_{i=1}^3 E_i \cos(w_i t - \beta_i z), \quad (11)$$

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

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 despreciarse. Teniendo en cuenta las pérdidas en la fibra, la potencia de estas nuevas ondas generadas debido al efecto FWM [42][45][46], será de:

$$P_{ijk} = \left( \frac{w_{ijk} \bar{n} d_{ijk}}{3 * c * A_e} \right)^2 * P_i * P_j * P_k * Z_e^{-2} e^{-\alpha z}, \quad (12)$$

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

#### 4.4. Scattering Estimulado

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  $\Omega$  de la red o las moléculas del material respectivamente.

La frecuencia de la onda esparcida se modifica:

$$\omega_S = \omega - \Omega \text{ Componente Stokes}$$

$$\omega_A = \omega + \Omega \text{ Componente Anti-Stokes}$$

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.

#### 4.5. Scattering Estimulado de Efecto Raman (FWM)

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 produce 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.

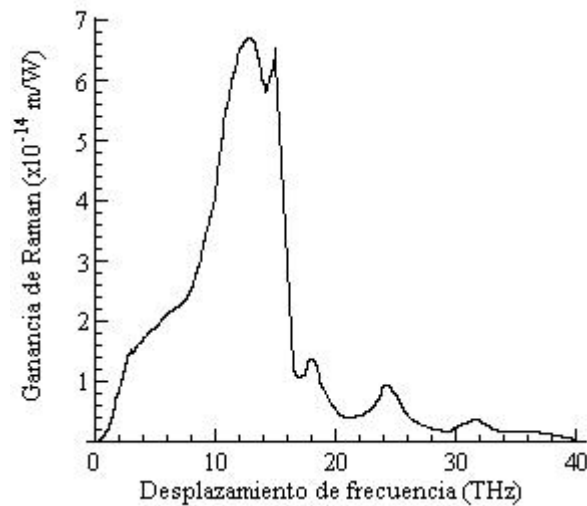
La interacción entre la onda incidente y la onda Stokes (onda a la que se le transfiere la potencia) está gobernada por la siguiente pareja de ecuaciones [49]

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s - \alpha_s I_s, \quad (13)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{w_p}{w_s} g_R I_p I_s - \alpha_p I_p, \quad (14)$$

Donde  $I_p$  es la intensidad de la onda incidente,  $I_s$  es la intensidad de la onda Stokes, los términos  $\alpha_p$  y  $\alpha_s$  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  $I_p=1550$  nm.

Figura 15 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  $6.67 \times 10^{-14}$  m/W para un desplazamiento de frecuencia de aproximado de 13.2 THz..

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 [35] y [49], una buena aproximación para esta potencia umbral es

$$P_{Umbral} = 16 * b \frac{A_e}{L_e g_R}, (15)$$

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  $\lambda_p=1550$  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.

#### **4.6. Scattering Estimulado de Efecto Brillouin**

El origen del SBS es similar al del SRS, 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. Sin embargo existen algunas diferencias. En el SBS la onda Stokes se propaga en el sentido opuesto al de la onda incidente, mientras que en el SRS podía propagarse en los dos sentidos, y el umbral de potencia depende de la anchura espectral de la onda incidente. Estas diferencias se deben a que en el SBS se ven involucrados fonones acústicos en lugar de ópticos como era el caso del SRS.

Además en el SBS, la ganancia es conocida como ganancia de Brillouin, su espectro tiene una anchura de aproximadamente 20 MHz, y también depende de la composición del núcleo de la fibra. Por otra parte, el coeficiente de ganancia  $g_B$ , es casi independiente de la longitud de onda incidente y su valor máximo para fibras de silicio es de aproximadamente de  $4 \cdot 10^{-11}$  m/W y lo alcanza para un desplazamiento de frecuencia de aproximadamente e 11.1 GHz.

Sin embargo, cuando la anchura espectral de la onda incidente es superior a la anchura del espectro de la ganancia, ésta se ve reducida según la siguiente expresión [37]:

$$\bar{g}_B = \frac{\Delta f_B}{\Delta f_B + \Delta f_{in}} g_B, (16)$$

Donde  $\Delta f_B$  equivale a la anchura espectral de la ganancia y  $\Delta f_{in}$  equivale a la anchura espectral de la onda incidente. Por lo tanto, para el caso de pulsos con una anchura  $T_0$  lo suficientemente pequeña, el valor del coeficiente  $g_B$  puede caer por debajo del coeficiente  $g_R$ .

La interacción entre la onda incidente y la onda Stokes está gobernada por una pareja de ecuaciones similar a las del SRS [38] [49]

$$\frac{dI_S}{dz} = -g_B I_p I_S - \alpha I_S, (17)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -g_B I_p I_S - \alpha I_p, (18)$$

Pero en este caso cambia el signo de la derivada  $\frac{dI_S}{dz}$ , para tener en cuenta el sentido opuesto de la propagación de la onda de Stokes. Además como la onda incidente y la onda Stokes tienen frecuencias muy próximas el cociente de frecuencias se puede considerar igual a 1 y el coeficiente de absorción único e igual a  $\alpha$ . Con respecto a la potencia umbral en el SBS, una buena aproximación según [37] [38][49] es:

$$P_{Umbral} = 21 * b \frac{A_s}{L_s * g_B}, (19)$$

Teniendo en cuenta que  $b=1$ , es un valor típico de la potencia umbral para fibras de silicio es de 1.3 mW. Pero si  $Df_{in} > Df_B$ , la potencia umbral aumenta y la aproximación pasa a ser:

$$P_{Umbral} = 21 * b \frac{A_s}{L_s * g_B} \left( 1 + \frac{\Delta f_{in}}{\Delta f_B} \right), \quad (20)$$

Por último cabe decir que para reducir los efectos de la SBS se puede optar por aumentar la anchura espectral de la onda incidente para así disminuir la ganancia de Brillouin o también procurar no superar la potencia umbral.

Es importante analizar que la utilización de técnicas de multiplexación para la transmisión de video sobre enlaces ópticos ha tenido mucho auge en la última década, permitiendo mejorar su robustez en la propagación de la señal de manera eficiente. Aunque algunos sistemas operan en la región de los 1300 nm, es necesario trabajar en la tercera ventana con la finalidad de eliminar y disminuir las pérdidas de la fibra y así utilizar amplificadores ópticos EDFA en la región de los 1550 nm. La implementación de fibras monomodo estándar genera una dispersión cromática considerable, generando de tal manera una distorsión no lineal. Si a la transmisión se aplican técnicas de modulación directa, el efecto de distorsión se agrava, ya que el chirp generado por el diodo laser se combina con la dispersión de la fibra dando lugar a niveles de distorsión intolerables. Ahora para mejorar estos problemas se ven forzados a trabajar con moduladores externos, ya que representa una solución al chirp. Sin embargo, el efecto Kerr de las fibras ópticas cuando se someten a niveles de potencia óptica elevados se convierte entonces en la principal fuente de degradación. Ahora el fenómeno de Self-Phase Modulation (SPM) debido a la no linealidad de la fibra, interacciona con la dispersión cromática limitando la distancia de transmisión en los sistemas WDM con modulación externa.

La fibra óptica se puede considerar como un dispositivo óptico lineal cuando los niveles de potencia a la entrada de la misma son reducidos y su longitud no es excesivamente elevada como para potenciar efectos lineales; ahora cuando los niveles de potencia óptica dejan de ser reducidos, el índice de refracción de la fibra muestra una dependencia con la intensidad de campo eléctrico en un fenómeno conocido como efecto Kerr [56]. Por lo tanto su representación está dado por:

$$n = n_0(w) + n_2 |E|^2, \quad (21)$$

Donde,  $n_0(w) = c\beta(w)/w$  incluye los efectos dispersivos y  $n_2$  es el índice de refracción no lineal que se calcula como [59] :

$$n_2 = \frac{N_2}{A_{eff}}, \quad (22)$$

Teniendo en cuenta que el índice no lineal  $N_2 = 3.2 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{w}$ , y el área efectiva del núcleo de la fibra  $A_{eff}$ . Este último, depende de los parámetros y condiciones de la fibra tales como el radio del núcleo o la diferencia de índices entre el núcleo y la cubierta. Estos valores típicos para una longitud de onda de 1550 nm. En esta situación la ecuación (3) [49], se ve modificada para incluir los efectos de las no linealidades, dando lugar a la que se conoce como ecuación de Schrodinger no lineal con pérdidas [49]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = 0, \quad (23)$$

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = -jkn_2 |A|^2 A, \quad (4)$$

Donde  $k = 2\pi/\lambda$ . Esta ecuación, para  $\alpha=0$ , ha sido extensamente estudiada en el contexto de la teoría de solitones [Agrawal].



Normalmente, la dispersión de segundo orden suele despreciarse es decir  $\beta_3=0$ , y al mismo tiempo se realiza el cambio de variable  $T=t- \beta_{1z}$  para expresar (4) de una forma más compacta [49]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - \frac{j}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2}A = -jkn_2|A|^2 A, \quad (24)$$

De (5) puede deducirse que las no linealidades de la fibra producen un chirp de frecuencia inducido por la propia señal que se propaga, cuyo fenómeno es conocido como Self-Phase Modulation (SPM). El desplazamiento de fase no lineal provocado por el chirp se puede estimar como [39]:

$$\theta_{nl} = kn_2 P_0 L_{eff}, \quad (25)$$

Donde  $P_0$  es la potencia óptica a la entrada de la fibra y  $L_{eff}$  es la longitud efectiva que está dada por:

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}, \quad (26)$$

La combinación del SPM con la distorsión cromática de la fibra generara apariciones de distorsiones no lineales a la salida del fotodetector [34].

## 5. ANALISIS Y RESULTADOS

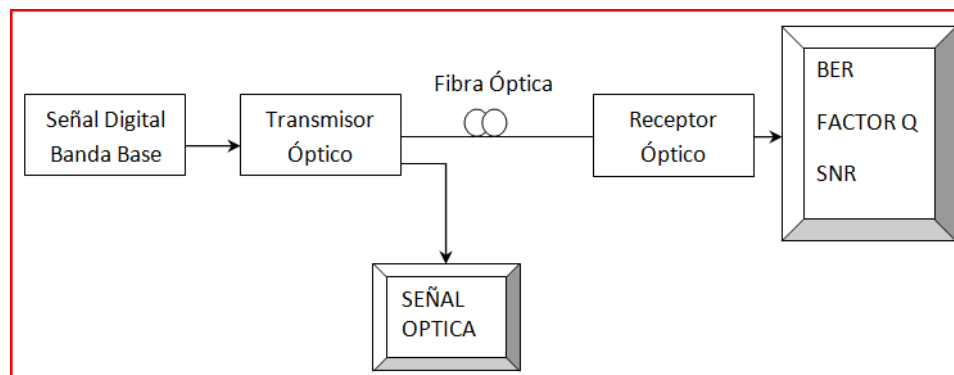
Con el fin de dar una respuesta al comportamiento de las redes ópticas en un medio real y mostrando datos que están actualmente estandarizados y a la vez son imprentados en muchos pases del mundo como Italia y España, en este capítulo se pretenden desarrollar una serie de simulaciones donde se evaluará el comportamiento de la señal transmitida, partiendo de una breve explicación acerca de la topología de esta tecnología. Este capítulo presentara de igual forma la descripción del escenario de simulación tanto para una señal de video con longitud de onda de 1550 nm de 20 a 200 km con efectos no lineales SPM, analizando 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 número de repetidores, splitters, amplificadores, filtros, etc. Teniendo en cuenta estos análisis, se puede determinar que tan eficaz es el enlace.

### 5.1. Modelo Físico de la Simulación

El diagrama de conexión del enlace óptico se presenta en la Figura 10, donde se incluyen los componentes empleados para la realización de las simulaciones presentadas en esta sección.

Figura 16 Enlace de red Óptica



En el enlace se empleó una longitud de onda, 1550 nm para el video. Los principales efectos en propagación que afectan al sistema son los fenómenos de no linealidad y la dispersión, los cuales dependen 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 SPM, 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 2 se presentan las pérdidas por división para diferentes valores de división óptica N.

Tabla 2 Pérdidas por usuario en una red Óptica

<b>División óptica</b>	<b>PERDIDAS (dB)</b>
<b>2</b>	3
<b>4</b>	6
<b>8</b>	9
<b>16</b>	12
<b>32</b>	15
<b>64</b>	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:

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

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:

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

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 más óptima para nuestro enlace óptico.

## 5.2. Análisis de los componentes utilizados en las simulaciones

Los componentes de R-Soft (Optsim), empleados para el desarrollo de las simulaciones se describen a continuación.

### 5.2.1. Elementos del transmisor óptico

En el transmisor pueden emplearse los siguientes componentes:

- **Generador lógico de datos:** Este elemento genera una secuencia de bits pseudo-aleatoria. Tiene como parámetro la tasa de bits.
- **Representación del Pulso:** Elemento que convierte la señal lógica en eléctrica, usando diferentes formas de pulso como lo son NRZ (no retorno a cero), RZ (retorno a cero), coseno levantado, entre otras. Para todas las simulaciones presentadas en esta sección se empleó forma de pulso NRZ.
- **Láser óptico:** Como fuente óptica se emplea un láser de onda continua con distribución espectral de tipo Lorentziano. La señal de salida del láser tiene una polarización alineada con el eje geométrico x, esto permite que sea

compatible con los componentes sensibles a la polarización. Este componente permite variar: la longitud de onda central, la potencia de salida y el FWHM (Full-Width Half-Maximum). A partir del FWHM en metros puede calcularse el FWHM en Hz empleando la siguiente ecuación:

$$\Delta f = \frac{3 * 10^8}{\lambda} \Delta \lambda$$

- **Modulador óptico:** se empleó un modulador óptico Mach Zehnder que emplea solo uno de sus brazos. Los parámetros empleados para este dispositivo son mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3 Valores de principales del MZ empleado

COMPONENTE	VALOR	UNIDADES
Excess Loss	3	dB
V <sub>pi</sub>	5	V
Extinción Ratio	20	dB

### 5.2.2. Elementos de la red de distribución Óptica

En la red de distribución óptica, se pueden emplearse los siguientes componentes:

- **Combinador óptico:** Permite combinar la señal óptica proveniente de varias fibras para que se propague a través de una sola. En la simulación desarrollada los valores tenidos en cuenta para la configuración de este elemento son los que asigna por defecto el programa.
- **Divisores ópticos o Splitter:** Este componente realiza una división de la señal óptica de entrada, obteniendo en todas las salidas el mismo valor de atenuación. Si la atenuación se establece en de 0 dB, este elemento se

comporta como un divisor ideal sin ninguna pérdida por inserción. Este componente se empleó para variar el número de usuarios en la red.

- **Fibra óptica:** El componente de fibra óptica considera los efectos lineales y no lineales, el efecto de polarización como el PMD (Polarization mode dispersión) y la birrefringencia. Se usó fibra tipo estándar G.652, debido a que es el tipo de fibra que más se ha instalado en el mundo. Los parámetros usados en cada segmento de fibra óptica son los valores que se muestran en la Tabla 4

Tabla 4 Valores de simulación fibra óptica

COMPONENTE	VALOR	UNIDADES
Loss	0.22	dB/km
Dispersion at the reference frequency	16	ps/nm/Km
Fiber non linearity coefficient	1.266	1/W/km

### 5.2.3. Elementos del receptor óptico

En el receptor óptico pueden emplearse los siguientes componentes:

- **Filtro óptico:** El filtro óptico se emplea para seleccionar una longitud de onda y la forma del filtro puede ser coseno levantado, Gausiana, Lorenztsiana o de Bessel entre otras. Se empleó la forma de coseno levantado. Los parámetros que pueden ajustarse son: frecuencia central, ancho de banda y parámetro de roll-off. En la Tabla 5 se muestran los valores usados en la simulación para el filtro óptico.

Tabla 5 Valores de simulación filtro óptico

ELEMENTO	VALOR	UNIDADES
Roll off	0,5	
- 3dB Two-sided Bandwidth	100	GHz
Notch Filtes	Bandpass	
Center Wavelenght	1550	nm

- Fotodetectores:** Este componente permite cambiar la seña óptica recibida en una señal eléctrica, esta señal puede ser analizada por un elemento de medida eléctrico. Este componente considera el ruido cuántico generado por la foto-detección y considera la corriente de oscuridad. La corriente de salida generada por el proceso de fotodeteccion depende de la potencia óptica de entrada y de la corriente de oscuridad. Se realizaron pruebas con el fotodetector PIN. Los parámetros de operación del fotodetector tipo PIN empleadas en las simulaciones son descritos en la Tabla 6.

Tabla 6 Valores de simulación fotodetector PIN

COMPONENTE	VALOR	UNIDADES
Quantum Efficiency	0.7	
Current	0.1	nA

#### 5.2.4. Instrumentos de medida

Pueden emplearse los siguientes instrumentos de medida:

- **Elementos de medida:** Estos elementos permiten analizar los resultados obtenidos de los procesos de simulación:
  - **Detector óptico:** este componente permite detectar las señales ópticas y a la vez tomar valores que se generan después de la simulación como amplitud y potencia de la señal óptica, fase de la señal óptica, frecuencia instantánea de la señal óptica, parámetros de Stokes de la señal óptica y espectro de potencia de la señal óptica. Estos datos pueden ser visualizados en diagramas y en datos numéricos.
  - **Scope eléctrico:** este componente cumple la función de un osciloscopio de señales eléctricas, el cual permite ver el comportamiento de las señales al final de la simulación en diagramas y datos numéricos como: amplitud eléctrica, diagrama de ojo, histograma en el instante del muestreo y espectro de potencia de la señal eléctrica.

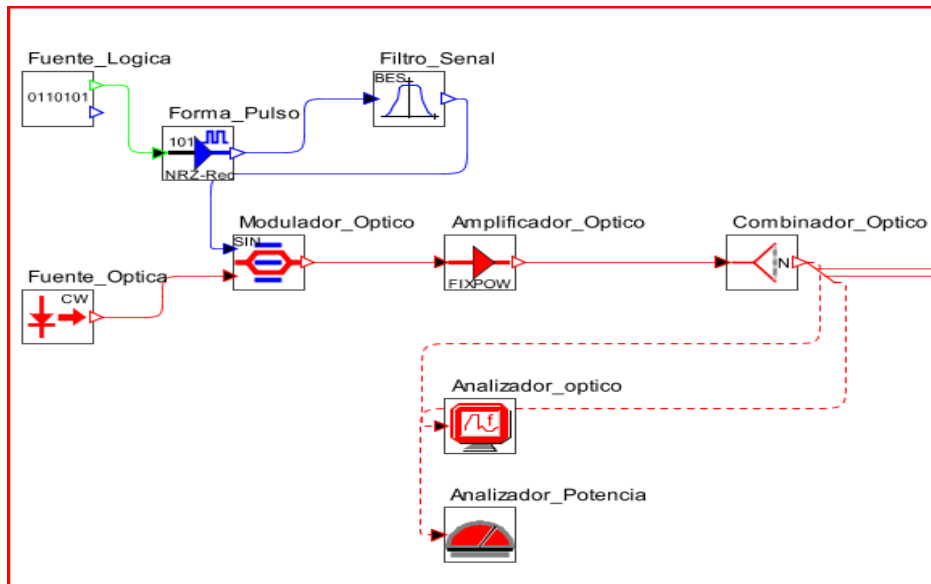
El simulador tiene disponibilidad de otros instrumentos de medida tanto ópticos como eléctricos. Entre los elementos ópticos se tiene: medidor de potencia, analizador de espectro y detector óptico. Para señales eléctricas se tiene: medidor de potencia, estimador de BER y scope eléctrico.



### 5.3. Simulación del Transmisor

El detalle de los componentes para el enlace óptico, se presenta en la Figura 17.

Figura 17 Componentes del OLT empleados en el enlace óptico.



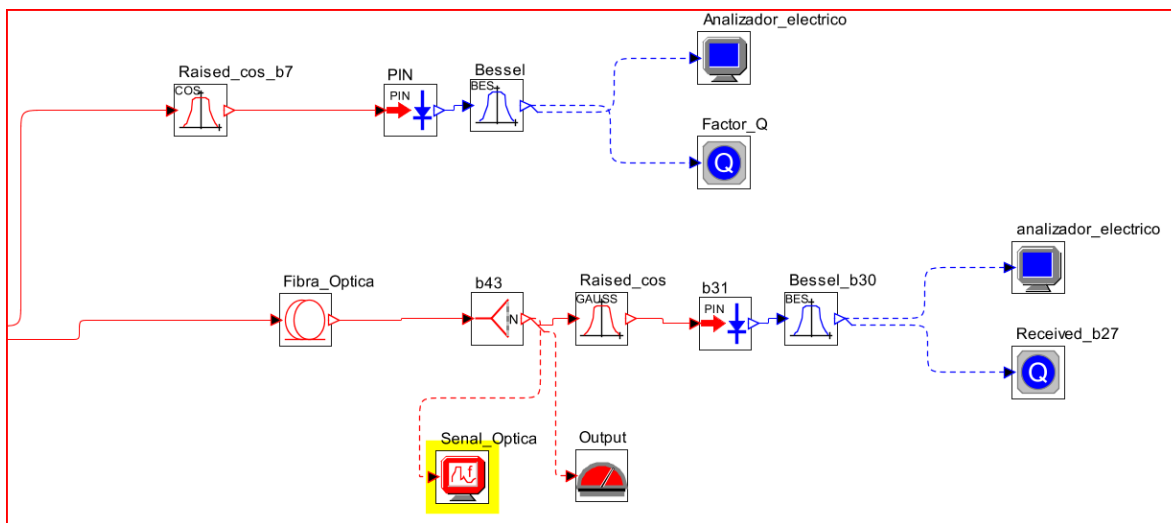
El transmisor del canal emplea un láser de onda continua con distribución espectral Lorentziana a 1550 nm, para la transmisión de video digital. Se realizaron simulaciones para datos a tasas de bits de 2.5 y 10 Gbps, que se ajustaron en el generador de secuencia pseudo-aleatorio. El video se ajustó cada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

Los parámetros empleados en los componentes del transmisor en las simulaciones se presentan en la Tabla 7. 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 7 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 18 Componentes para el transmisor del enlace



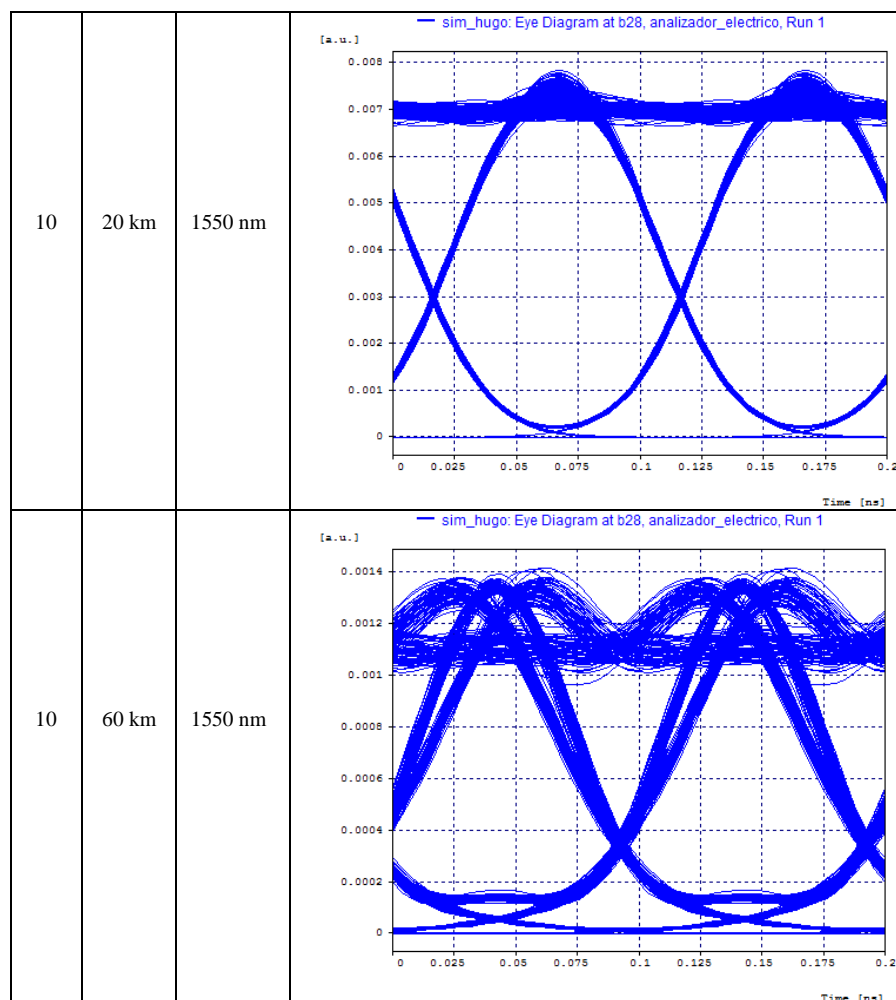
Para red Óptica implementada se emplea una longitud total de 200 km de fibra óptica, la cual está distribuida de la siguiente forma. Un segmento de fibra conectado al transmisor de 50 km. Luego hay un divisor óptico de 1:2, seguido de un segmento de fibra de 50 km y posteriormente se encuentra un divisor óptico de 1: N, para llegar al ONU con un segmento de fibra de 100 km. El divisor óptico de 1:2 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.

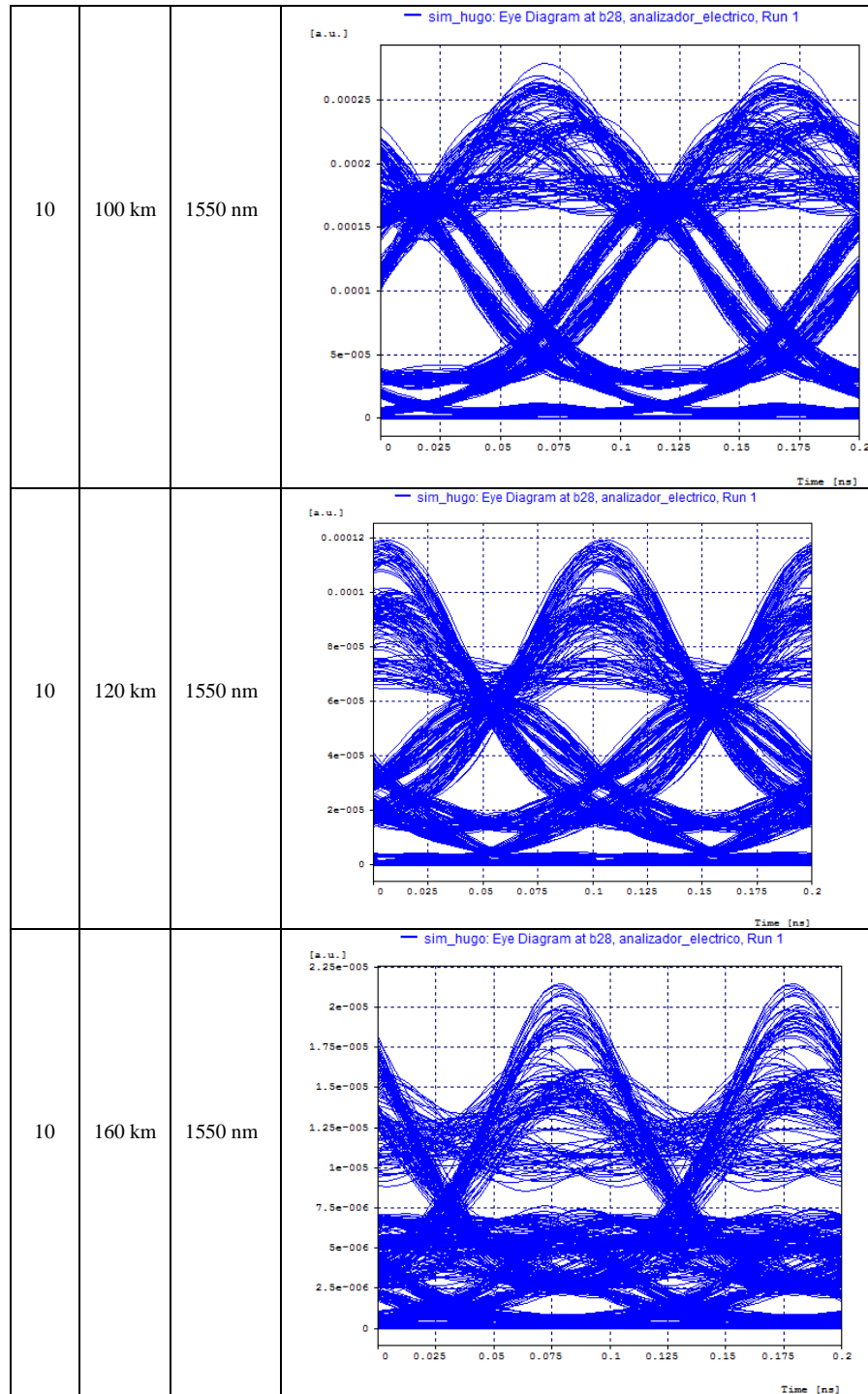
#### 5.4. Resultados de simulación para una tasa de transmisión de 10 Gbps con fibra de 20 km hasta 200 km

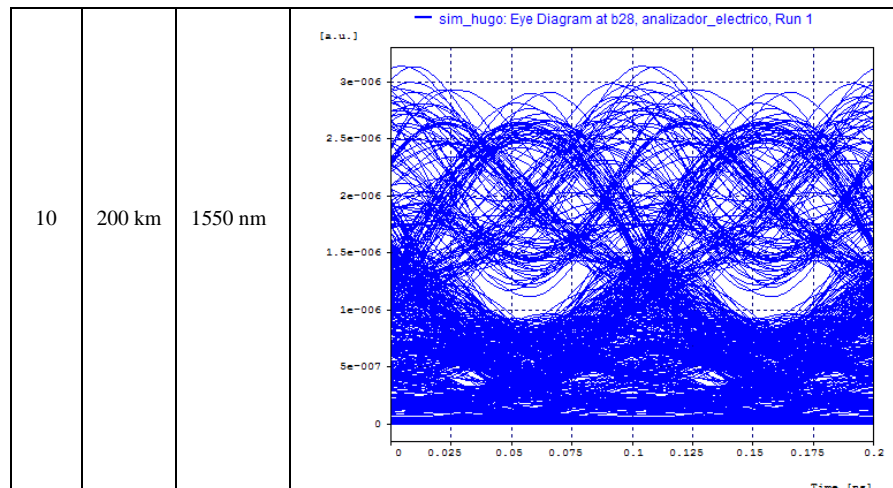
En esta sección se presentan los resultados de simulación del enlace óptico teniendo en cuenta los parámetros de desempeño y empleando la herramienta RSoft de Optsim.

El diagrama de ojo 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 19..

Figura 19 Graficas resultado de simulación para 10 Gbps







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 SPM 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. Asumir que los sistemas de comunicaciones ópticas se comportan linealmente, es una aproximación adecuada cuando se opera a unos niveles de potencia moderados y a velocidades de transmisión que no superen los 2.5 Gbps. Sin embargo, a velocidades 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.

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 en la longitud de onda de 1550 nm. Esto se atribuye al

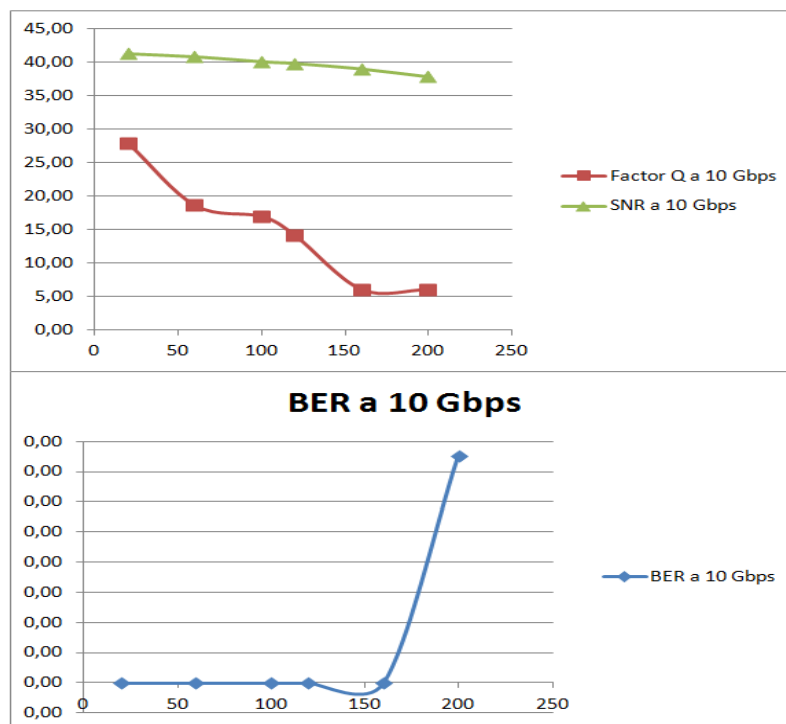
efecto Raman, debido a que hay un intercambio de potencia entre las longitudes de onda de 1490 y 1550 nm y la teoría predice que el efecto es más notable al disminuir la tasa de bits.

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

Tabla 8 Resultados de la señal eléctrica

Tasa de Tx	Valores del enlace			
	Distancia	BER	Factor Q	SNR
10 Gbps	20 km	1.0e-20	27.85	40.80
10 Gbps	60 km	4.71e-17	18.580	40.54
10 Gbps	100 km	3,66E-12	16.958	39.51
10 Gbps	120 km	1,75E-11	14.1224	35.89
10 Gbps	160 km	5,25E-08	6.0206	34.97
10 Gbps	200 km	7,53E-05	6.0206	34.53

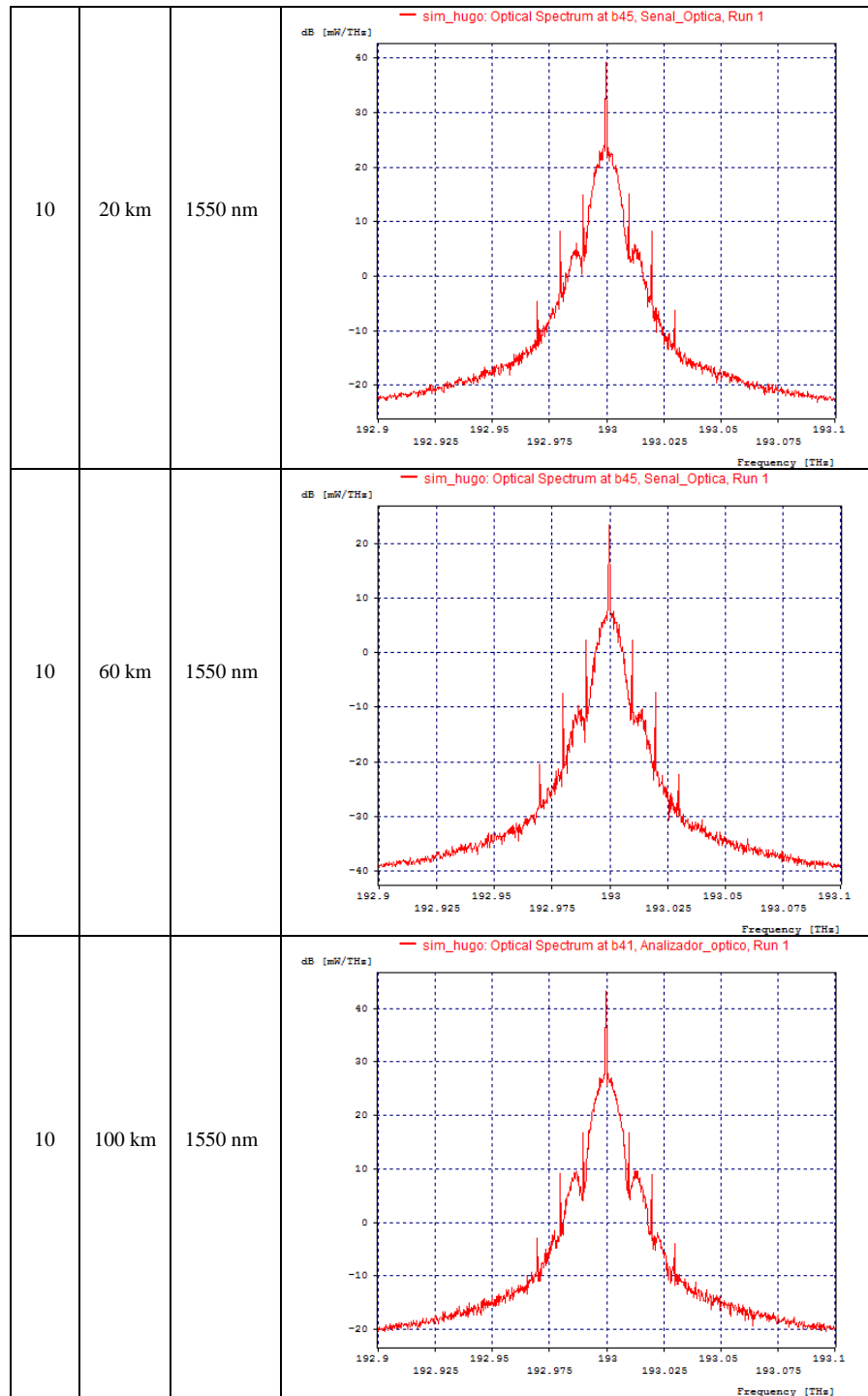
Figura 20 Curvas Factor Q, SNR, VER Vs Distancia para 10 Gbps



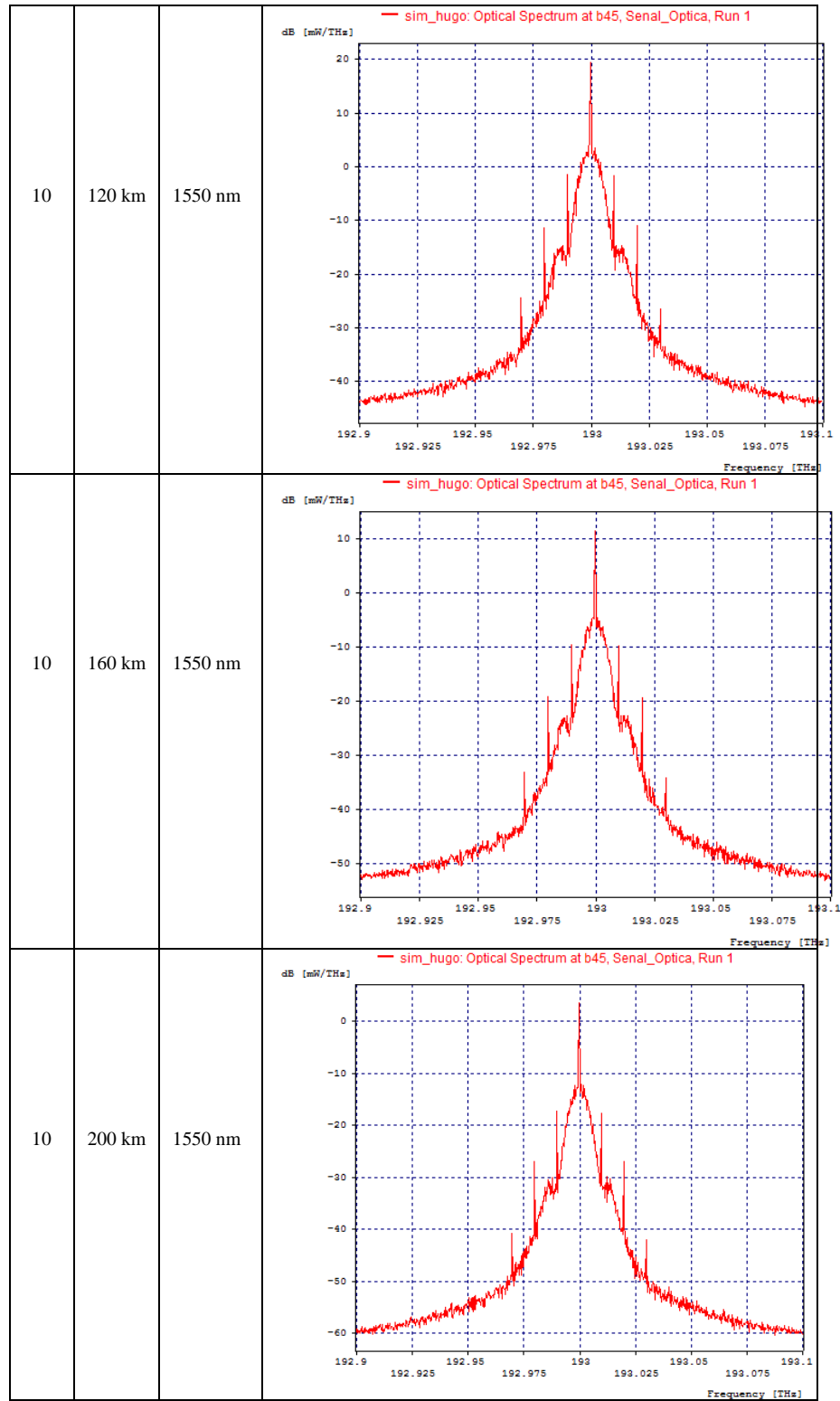
La relación señal a ruido (SNR) debe permanecer a un determinado nivel para mantener la señal de datos separada de la señal de ruido, Al amplificar la señal, también se amplifica el ruido, por lo que la elección de la distancia entre los amplificadores es una decisión importante, por lo tanto a mayor 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  $1.0e-20$  estando en un margen efectivo según estándares analizados en artículos y simulaciones [50], ahora el límite efectivo de BER para una distancia de 100 Km es de  $1.489 \cdot 10^{-12}$ , presentando un valor efectivo para sistemas de comunicaciones, pero se ve afectado por los fenómenos no lineales de SPM recordemos que el efecto SPM surge debido 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.

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 20.

Figura 20 Graficas resultado de simulación Óptica para 10 Gbps







Se puede observar que a medida aumenta la distancia en la propagación de la señal, el pulso óptico para cada instante cambia no de manera significativa, eso se debe a que el chirp de la señal no se ve deteriorado de manera significativa por el efecto SPM, como suele pasar en FWM. Su 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  $OSNR = 10 \log \frac{PS + PR}{PR}$  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:

$$PR = \frac{P_{\omega_R - \Delta\lambda} + P_{\omega_R + \Delta\lambda}}{2}, \text{ Donde el valor de } \Delta\lambda \text{ se define como la mitad de la}$$

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 9 Resultados Señal Óptica

Tasa de Tx	Valores del enlace Óptico	
	Distancia	OSNR
10 Gbps	20 km	28.032
10 Gbps	60 km	23.321
10 Gbps	100 km	15.45
10 Gbps	120 km	5.362
10 Gbps	160 km	-5.021
10 Gbps	200 km	-12.032

Ahora la tabla 9 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. Es importante notar que el resultado de la tabla 9 se visualiza en la figura 23 el cual muestra la comparación de las dos señales ópticas a 2.5 Gbps y a 10 Gbps. Para el caso de 20 km se presenta un pulso efectivo en un orden de 23.321dB aproximadamente, en 60 km se presenta un fenómeno importante, ya que se ve una disminución del OSNR a 15.42 dB, esto se debe a fenómenos de no linealidad para ese tramo de fibra al igual que en 100 km. Podemos observar que para 160 km y 200 km trabajan por debajo del umbral positivo, es decir -5.021 y -12.032 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 SPM. 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 adicione a la simulación para mejorar los fenómenos no lineales.

Como en análisis anterior, se percibe que a medida aumenta la distancia en la propagación de la señal, el pulso óptico para cada instante cambia no de manera significativa, eso se debe a que el chirp de la señal no se ve deteriorado de manera drástica por el efecto SPM, para este caso la propagación del pulso óptico es más eficiente que el anterior caso eso se debe a los fenómenos descrito anteriormente, la intensidad de la relación señal a ruido óptica OSNR es eficiente como es de esperarse debido a que el efecto de no linealidad SPM no es afectado

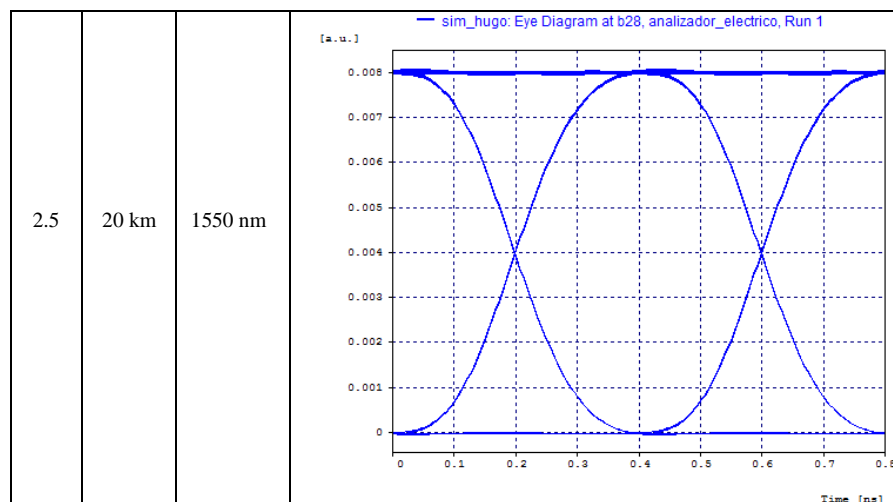
de manera drástica por su tasa de transmisión. De igual forma su valor se calcula de la siguiente manera  $OSNR = 10 \text{Log} \frac{PS + PR}{PR}$  donde  $PS$  es la potencia de la señal,  $PR$  es la potencia de ruido en el sistema. Ahora el cálculo de la potencia de ruido se mide promediando el nivel de ruido a la izquierda y a la derecha del pico de la señal de la siguiente manera:

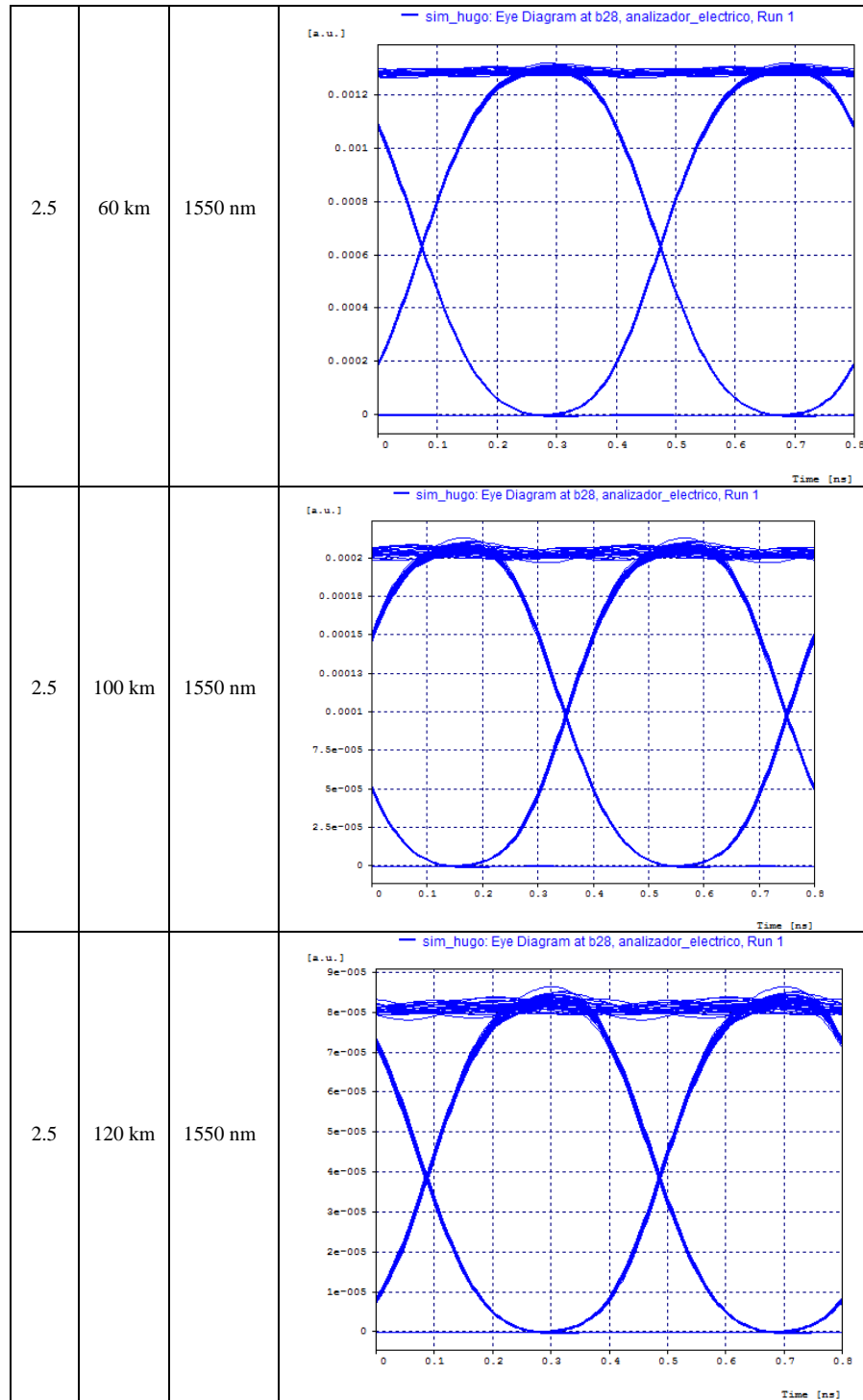
$PR = \frac{P_{R-\Delta\lambda} + P_{R+\Delta\lambda}}{2}$ , Donde el valor de  $\Delta\lambda$  se define como la mitad de la separación entre canales.

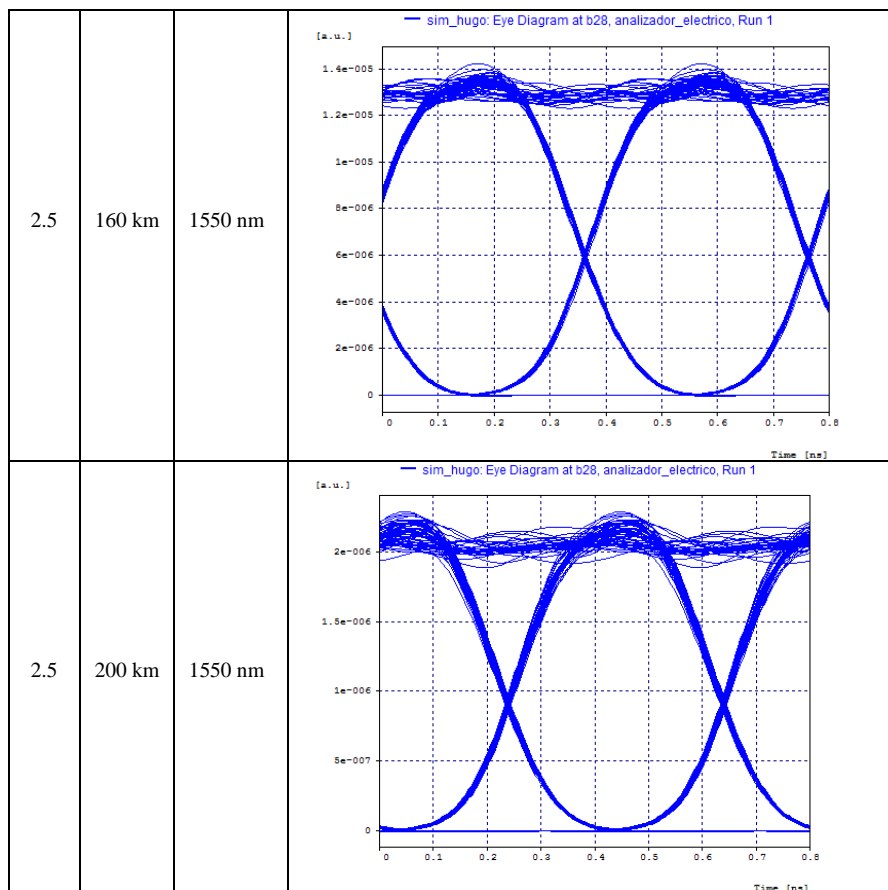
### 5.5. Resultados de simulación para una tasa de transmisión de 2.5 Gbps con fibra de 20 km hasta 200 km

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 21.

Figura 21 Resultados de la señal eléctrica







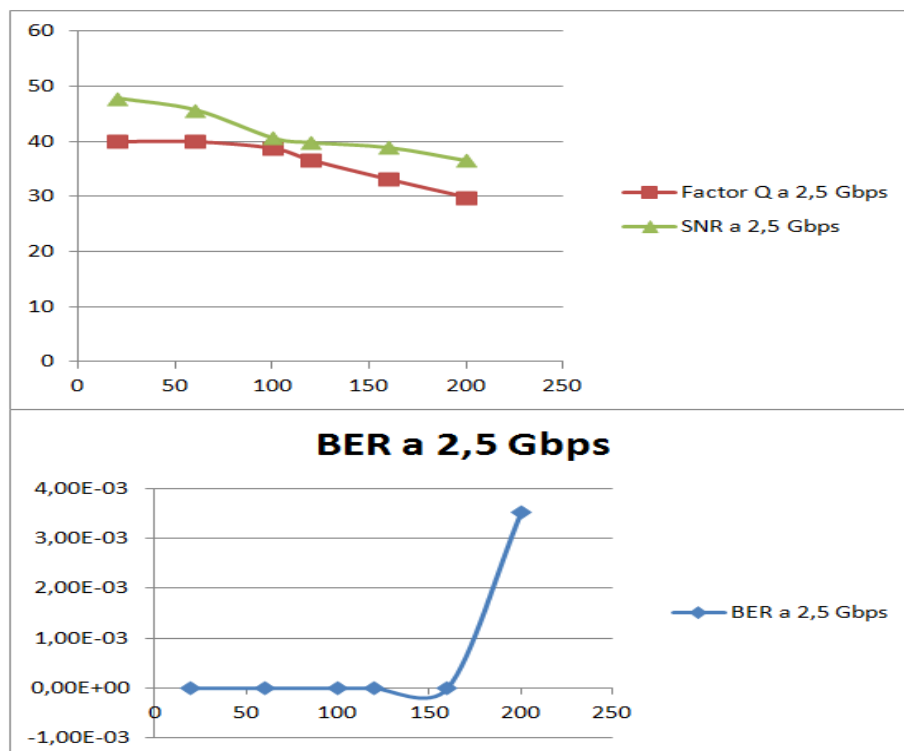
Teniendo en cuenta los resultados de la tabla 10, figura 21 y 22 podemos observar que a medida que la tasa de transmisión del enlace disminuye su propagación a través de la red óptica es muy efectiva. Los diagramas de ojo presentan menos distorsiones y dispersiones en sus cuadrículas generando menos 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 tara entre las distancias de 20 km y 60 km es casi ideal  $1.0e-40$  y un factor Q de 40, para un medio de comunicación óptico, al igual que para 100 km y 160 km el BER  $1.0e-30$ , es muy efectivo. Ya para transmisiones de mayor distancia alrededor de los 200 km obtuvimos una tasa de  $3.53e-21$  con un factor Q de 29.8049, que significa una eficiente propagación de señal. La relación SNR podemos observar que es muy efectiva para distancias superiores a 120 km, (39.768 dB – 38.87 dB – 36.53 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 10 Resultados de la señal eléctrica

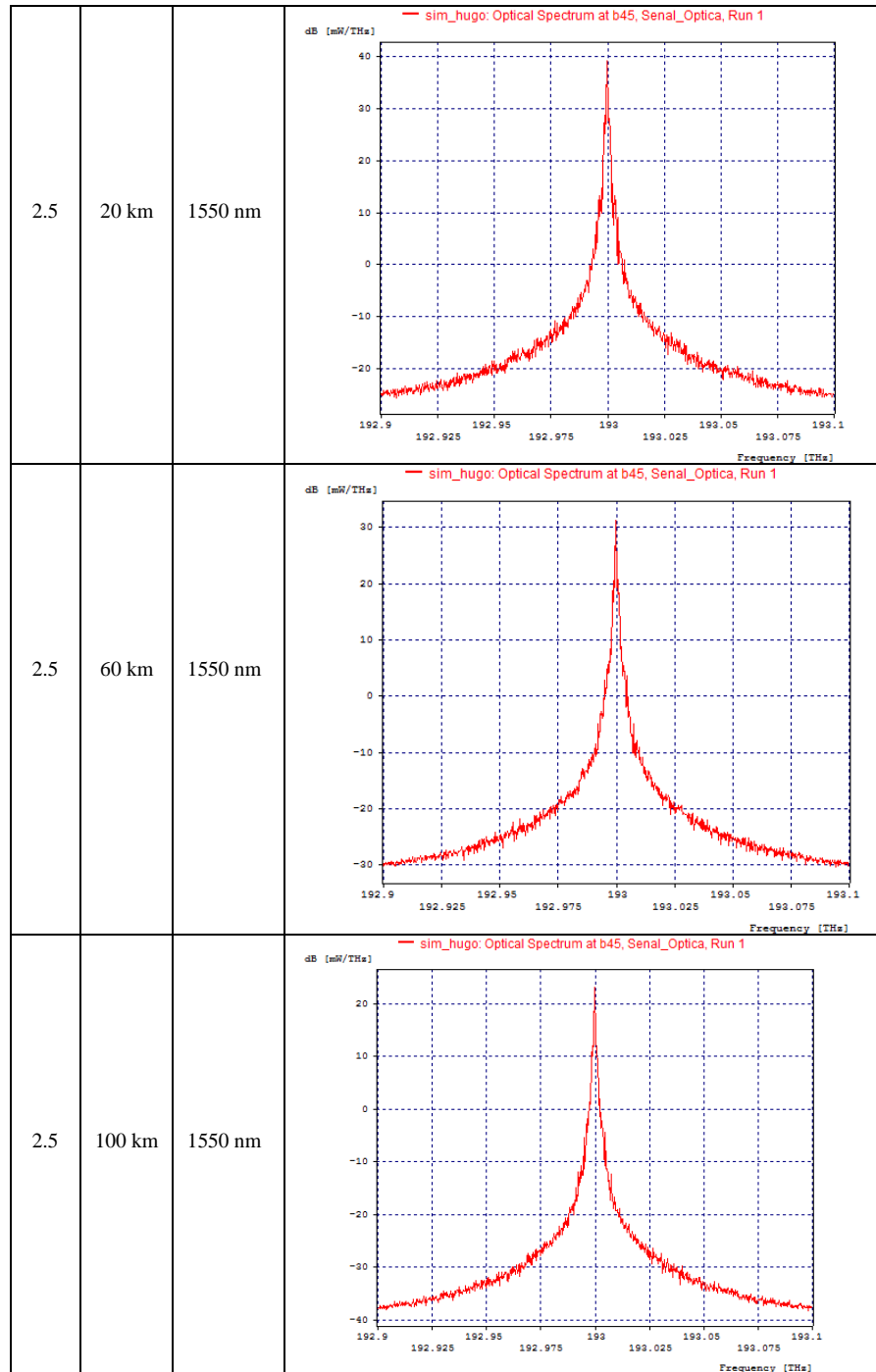
Tasa de Tx	Valores del enlace			
	Distancia	BER	Factor Q	SNR
2.5 Gbps	20 km	1,00E-31	40.0	47.750
2.5 Gbps	60 km	1,52E-30	40.0	45.654
2.5 Gbps	100 km	5,66E-20	38.790	40.61
2.5 Gbps	120 km	8,75E-18	36.6022	39.768
2.5 Gbps	160 km	1,25E-13	33.075	38.87
2.5 Gbps	200 km	3,53E-10	29.8049	36.53

Figura 22 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 22.

Figura 23 Graficas resultado de simulación Óptica para 2.5 Gbps





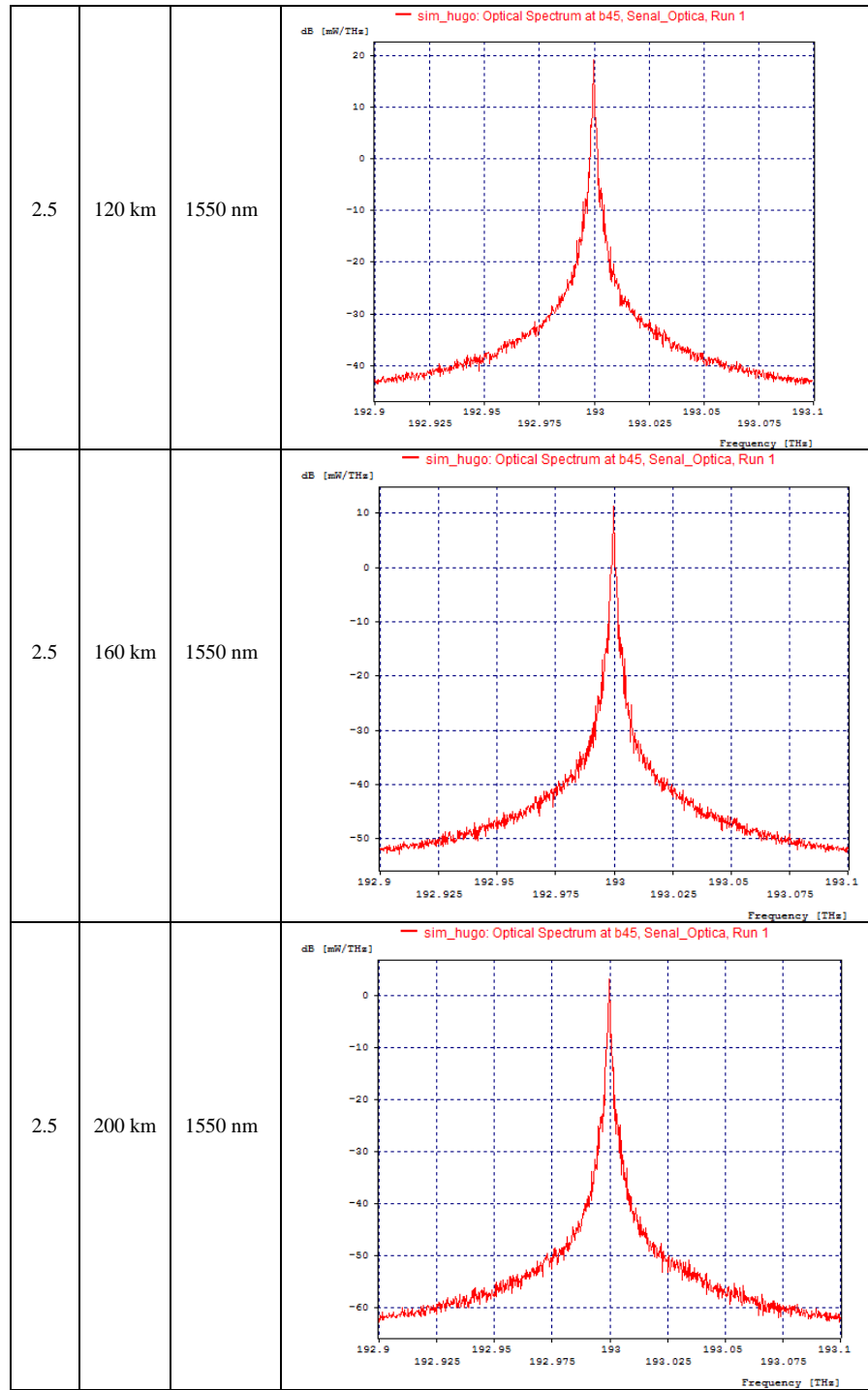
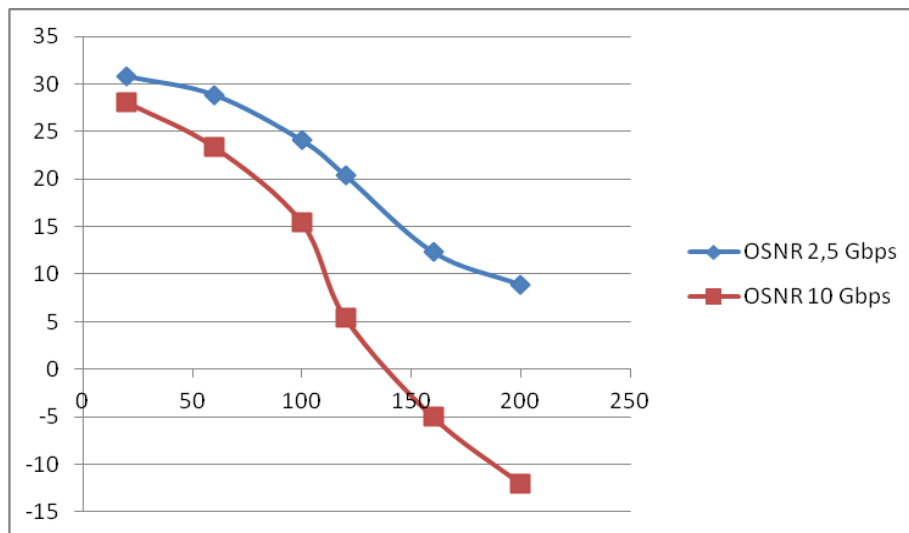


Tabla 11 Resultados Señal Óptica

Tasa de Tx	Valores del enlace Óptico	
	Distancia	OSNR
2.5 Gbps	20 km	30.78
2.5 Gbps	60 km	28.84
2.5 Gbps	100 km	24.065
2.5 Gbps	120 km	20.36
2.5 Gbps	160 km	12.321
2.5 Gbps	200 km	8.856

Figura 23 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 11.

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 varia 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 30.78 db aproximadamente, de 60 a 120 su diferencia es de 8 db aproximadamente disminuyendo su potencia óptica a un 7 db para 120 km, y para los casos de 200 km la potencia óptica se presenta por debajo del umbral de 10 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.

## **6. 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 SPM, que dependen principalmente de la tasa de bits, la longitud de la fibra óptica y el parámetro FWHM de la fuente óptica. 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 usuarios en la red. Las simulaciones se realizaron con datos en una longitud de onda a diferentes tasas de bits y video en otra longitud de onda con tasa de bits fija. Se realizaron pruebas con diferentes valores de FWHM, amplificación óptica y con receptores tipo PIN.

En las pruebas se observa que al incrementar 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.

Puede observarse en las simulaciones, que los efectos de SPM tiene 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 60 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.

Puede observarse para los tipos de enlaces ópticos, que 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.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

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.

SANTONE, Francisco. ATM vs Frame Relay. [En línea] <<http://neutron.ing.ucv.ve/revista-e/No4/ATM%20vs%20FR.html>>. [Consulta: Noviembre 2011].

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

Movistar. Calidad de Servicio. [En línea] <[http://www.movil.movistar.es/compromiso\\_calidad/calidadservicio02.html](http://www.movil.movistar.es/compromiso_calidad/calidadservicio02.html) Movistar>. [Consulta: Noviembre 2011].

WIKIPEDIA, la enciclopedia libre. Conmutación. [En línea]. <[http://es.wikipedia.org/wiki/Conmutación\\_\(redes\\_de\\_comunicación\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Conmutaci3n_(redes_de_comunicaci3n)) >. [Consulta: Noviembre 2011].

WIKIPEDIA, la enciclopedia libre. Divisor óptico. [En línea]. <[http://wikitel.info/wiki/Divisor\\_%C3%B3ptico](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](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.

COOPER, William y LOVELACE, Graham (2006): IPTV Guide, Delivering audio and video over broadband, pp 7).

Teoría de comunicaciones Ópticas. Tipos de Amplificadores 2006. <http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/index.htm>. [Consulta: 14 May 2010]

Alegsa. ITU. [En línea]. <<http://www.alegsa.com.ar/Dic/itu.php>>. [Consulta: Noviembre 2011].

Masadelante. LAN. [En línea] <<http://www.masadelante.com/faqs/lan>>. [Consulta: Noviembre 2011].

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].

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

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

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

RAMONMILLAN. FTTB y VDSL2. [En línea] < <http://www.ramonmillan.com/tutoriales/fttbvdsl2.php>>. [Consulta: Noviembre 2011].  
WIKITEL. Redes PON. [En línea] < [http://wikitel.info/wiki/UA-Redes\\_PON\\_Equipos](http://wikitel.info/wiki/UA-Redes_PON_Equipos) >. [Consulta: Noviembre 2011]

UNIVERSIDAD POLITECNICA SALECIANA. Tecnologías y arquitecturas de redes ópticas PON. [En línea] <<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/31/8/Capitulo2.pdf>>. [Consulta: Noviembre 2011].

OPTRAL. Tipos de fibra óptica. [En línea] < <http://platea.pntic.mec.es/~lmarti2/optral/cap2/fibra-5.htm> >. [Consulta: Noviembre 2011].

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].

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].

THE FIBER OPTIC ASSOCIATION - TECH TOPICS. Fibra óptica de plástico POF. [En línea] < <http://www.thefoa.org/tech/pof.htm> >. [Consulta: Noviembre 2011].

JASP. Fuentes ópticas. [En línea] < <http://jasp.net/optics/fuentes.xhtml>>. [Consulta: Noviembre 2011].

PUCHE William. 2011. Seminario de Telecomunicaciones I – Comunicaciones ópticas. Diodo LED. Universidad Pontificia Bolivariana Medellín. [Consulta: Noviembre 2011].

TEXTOS CIENTÍFICOS. Emisores y receptores ópticos. [En línea] < <http://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/emisores-receptores>>. [Consulta: Noviembre 2011].

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].

OPTSIM. Diseño de sistemas ópticos. [En línea] < <http://www.allopticdesign.com/productos/simulacion/optsim/OptSim.pdf>>. [Consulta: Noviembre 2011].

BANDAANCHA.EU. El FTTH y sus diferentes arquitecturas. [En línea] < <http://bandaancha.eu/articulo/5513/ftth-diferentes-arquitecturas> >. [Consulta: Noviembre 2011].



FIBER OPTICS FOR SALE CO. Plastic Optical Fiber Overview. [En línea] < <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/plastic-optical-fiber-overview/>>. [Consulta: Noviembre 2011].

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 2011].

CIENCIA 15. Pla. Iluminación LED. [En línea] < <http://ciencia15.blogalia.com/historias/43675>>. [Consulta: Noviembre 2011].

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/vcse/VCSELS.pdf>>. [Consulta: Noviembre 2011].

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]

Redes HFC (Híbrido FiberCoaxial) y sus vulnerabilidades. [En línea] <<http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo322/1s08/project/JuanCartajena.pdf>>. [Consulta: 30 Marzo 2012]

Point-topic World Broadband Statistics: Short report. Q2 2011

UIT - T G.984.1. Marzo 2003. Serie G: sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales.

Arquitectura de la red de acceso óptico

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

Davey, R., Healey, P., Hope, I., Watkinson, P., Payne, D., Marmur, O., Ruhmann, J. and Zuiderveld, Y.

DWDM reach extension of a GPON to 135 km", Journal of Lightwave Technology, v. 24, no. 1, pp. 29-31, 2006

Dong Y and Martin K. Gigabit Communications over Plastic Optical Fiber. IEEE SOLID-STATE CIRCUITS MAGAZINE. (60- 69)

Características técnicas de la fibra óptica plástica, [En línea]. <[http://www.luceat.it/spagnolo/come\\_funziona.html](http://www.luceat.it/spagnolo/come_funziona.html)>. [Consulta 20 de Marzo de 2012 ]

Bend-Insensitive Fiber.2011. [En línea]. <<http://www.thefoa.org/tech/ref/fiber/BIfiber.html>>. [Consulta 30 de Marzo de 2012]

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.

Hofmann W, Moser P, Wolf P, Mutig A, Kroh M, and Bimberg D. 44 Gb/s VCSEL for optical interconnects. OSA/OFC/NFOEC 2011

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/ursi2000/trabajos/df0096.pdf](http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos_modernos/articulos_zaragoza_2000/ursi2000/trabajos/df0096.pdf)>. [Consulta 30 de Marzo]

Fundamentos de espectroscopía Raman. [En línea].  
 <<http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6887/03Rpp03de11.pdf?sequence=3>>. [Consulta 30 de Marzo de 2012]

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](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]

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](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]

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.

Ataur Rahman Sarkar, Mohammed Nazrul Islam, Mohammad Golam Mostaza. Performance of an optical wideband WDM system considering stimulated Raman scattering, fiber attenuation and chromatic dispersión. Optical and Quantum Electronics, 39(8): 659-675, Sep. 2007.

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

Md. G. Mostafa<sup>1</sup>, 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.

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.

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.

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.

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.

Jake Bromage. Raman Amplification for Fiber Communications Systems. Journal of Lightwave Technology, 22(1): 79-93, Jan. 2004.

T. Saitoh and T. Mukai, in Coherence, Amplification, and Quantum Effects in Semiconductor Lasers, Y. Yamamoto, Ed., Wiley, New York, 1991, Chap. 7.

G.-H. Duan, in Semiconductor Lasers: Past, Present, and Future, G. P. Agrawal, Ed., AIP Press, Woodbury, NY, 1995, Chap. 10.