

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR



FACULTAD DE INGENIERIA

MAESTRÍA EN REDES DE COMUNICACIONES

TEMA:

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS NO LINEALES EN LA CAPA
FÍSICA DE UNA RED DE NUEVA GENERACIÓN (NGN)**

LUIS GERMÁN OÑATE CADENA

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

MASTER EN REDES DE COMUNICACIÓN

Quito-Agosto 2015



Pontificia Universidad Católica del Ecuador

FACULTAD DE INGENIERÍA

DECLARACIÓN y AUTORIZACIÓN

Yo, LUIS GERMAN OÑATE CADENA C.I. 1712157401 autor del trabajo de graduación intitulado: **“ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS NO LINEALES EN LA CAPA FÍSICA DE UNA RED DE NUEVA GENERACIÓN (NGN)“**, previo a la obtención del grado académico de Magister en Redes de Comunicaciones, en la Facultad de **Ingeniería**:

- 1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
- 2.- Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador a difundir a través de sitio web de la Biblioteca de la PUCE el referido trabajo de graduación, respetando las políticas de propiedad intelectual de Universidad.

Quito, 10 de agosto de 2015

Luis Germán Oñate Cadena

C.I. 1712157401

DEDICATORIA

Dedico a esta Tesis a mi padre Vicente German Oñate Álvarez, un gran compañero en este largo viaje de la vida.

También la dedico a Dios todopoderoso que me ha guiado para aprender cada vez más en el área de Telecomunicaciones.

Agradecimiento

Al ingeniero Germán Arévalo por ayudarme con sus conocimientos.

Índice de Contenidos

Resumen	1
Abstract.....	2
Introducción.....	3
Capítulo 1	5
Introducción	5
1.1. Objetivos.....	5
Objetivos Generales	5
Objetivos Específicos	5
1.2. Justificación.....	6
1.3. Redes de Nueva generación.....	8
1.4. Redes PON	11
1.4.1.....Caracterización del rendimiento de las tecnologías PON	
.....	14
1.5.....Efectos No lineales en la fibra óptica	
.....	23
1.5.1. Efectos No lineales en la fibra óptica por dispersión inelástica	23
1.5.1.2. Dispersión estimulada de Raman.....	24
1.5.2. Efectos No lineales en la fibra óptica por índice de refracción	25
1.5.2.1. Modulación de Fase Cruzada (XPM)	25
1.5.2.2. Mezclado de la cuarta onda (FWM)	25
Capítulo 2	27
2.1 Introducción	27
2.2. Red implementada.....	27
2.2.1. Red TDM PON.....	28
Capítulo 3	36
3.1. Introducción.....	36
3.2. Análisis de Resultados en la red PON sin efectos no lineales.....	36
3.3. Efecto Dispersión estimulada de Raman.....	42
3.3. Efecto de Dispersión estimulada de Brillouin.....	48
3.4. Efecto Modulación de fase cruzada (XPM).....	54

3.4. Efecto mezclado de las cuatro ondas (FWM)	60
3.5. Espectro de la red óptica	67
3.6. Análisis de Resultados	72
3.6.1. Consideraciones para la implementación en el Ecuador	77
4. Conclusiones y Recomendaciones	79
Referencias Bibliográficas	81
GLOSARIO.....	86

Índice de tablas

Tabla 1. Servicios y velocidad de transmisión.....	12
Tabla 2. Numero de red TDM PON y longitud de onda respectiva	29
Tabla 3. Longitudes de onda red WDM PON	31

Índice de Figuras

Figura 1. Red FFTH (Fiber to the Home)	11
Figura 2. Red PON.....	13
Figura 3. Arquitectura de una red WDM PON	17
Figura 4. Arquitectura DWDM-TDM de larga distancia PON	19
Figura 5. TDM/DWDM PON	20
Figura 6. Estrella WDM/TDM PON.....	21
Figura 7. Arquitectura WDM/TDM PON.....	22
Figura 8. Diagrama de bloques de la red implementada	28
Figura 9. Esquemático del transmisor de la TDM PON	29
Figura 10. Red TDM PON.....	30
Figura 11. Etapa transmisión red WDM PON	31
Figura 12. Enlace de fibra óptica	32
Figura 13. Etapa de demultiplexación de la red WDM/TDM PON	32
Figura 14. Demultiplexación red WDM/TDM PON.....	33
Figura 15. Receptor de la red WDM/TDM PON.....	34
Figura 16. Receptor WDM PON	35
Figura 17. Comparación BER vs Distancia para la red WDM/TDM PON sin efectos no lineales a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.	37

Figura 18. Comparación BER vs Distancia para la red WDM/TDM PON sin efectos no lineales a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.	38
Figura 19. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM/TDM PON sin efectos no lineales con un enlace de 20 kilómetros de distancia.	39
Figura 20. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM PON sin efectos no lineales con un enlace de 20 kilómetros de distancia	40
Figura 21. Comparación de la Potencia recibida vs distancia para la red WDM/TDM PON sin efectos no lineales para velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.	41
Figura 22. Comparación de la Potencia recibida vs distancia para la red WDM PON sin efectos no lineales para velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.	42
Figura 23. Comparación BER vs Distancia para la red WDM/TDM PON con el efecto no lineal SRS a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.	43
Figura 24. Comparación BER vs Distancia para la red WDM PON con el efecto no lineal SRS a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.	44
Figura 25. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM/TDM PON con el efecto no lineal SRS con un enlace de 20 kilómetros de distancia.....	45
Figura 26. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM PON con el efecto no lineal SRS con un enlace de 20 kilómetros de distancia.	46
Figura 27. Comparación de la Potencia recibida vs distancia para la red WDM/TDM PON con el efecto no lineal SRS para velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.....	47
Figura 28. Comparación de la Potencia recibida vs distancia para la red WDM PON con el efecto no lineal SRS para velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.....	48
Figura 29. Comparación del BER vs distancia para velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps para la red WDM/TDM PON con la influencia del efecto no lineal SBS con una potencia de entrada de 20 milivatios.	49
Figura 30. Comparación del BER vs distancia para velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps para la red WDM PON con la influencia del efecto no lineal SBS con una potencia de entrada de 20 milivatios.....	50
Figura 31. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM/TDM PON con influencia del efecto no lineal SBS para una potencia de entrada de 20 milivatios y una distancia de 20 km.....	51
Figura 32. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM PON con influencia del efecto no lineal SBS para una potencia de entrada de 20 milivatios y una distancia de 20 km.	52
Figura 33. Potencia recibida vs distancia para la red WDM/TDM PON con influencia del efecto no lineal SBS a 20 km de distancia con velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps y una potencia de entrada 20 milivatios.....	53

Figura 34. Potencia recibida vs distancia para la red WDM PON con influencia del efecto no lineal SBS a 20 km de distancia con velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps con una potencia de entrada 20 milivatios.	54
Figura 35. Comparación del BER vs distancia para velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps para la red WDM/TDM PON con la influencia del efecto no lineal XPM con una potencia de entrada de 10 milivatios y una dispersión de 10 ps/nm/km.	55
Figura 36. Comparación del BER vs distancia para velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps para la red WDM PON con la influencia del efecto no lineal XPM con una potencia de entrada de 10 milivatios y una dispersión de 10 ps/nm/km.	56
Figura 37. Comparación del BER vs velocidades de transmisión para la red WDM/TDM PON con la influencia del efecto no lineal XPM con una potencia de entrada de 10 milivatios y 20 Km de distancia.	57
Figura 38. Comparación del BER vs velocidades de transmisión para la red WDM PON con la influencia del efecto no lineal XPM con una potencia de entrada de 10 milivatios y 20 km de distancia.	58
Figura 39. Potencia recibida vs distancia para la red WDM/TDM PON con influencia del efecto no lineal XPM a 20 km de distancia con velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps con una potencia de entrada 10 milivatios.	59
Figura 40. Potencia recibida vs distancia para la red WDM/TDM PON con influencia del efecto no lineal XPM a 20 km de distancia con velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps y una potencia de entrada 10 milivatios.	60
Figura 41. Circuito óptico simulación FWM.	61
Figura 42. Comparación BER vs distancia para la red WDM/TDM PON a velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps con el efecto no lineal FWM y una potencia de entrada de 1 milivatio.	62
Figura 43. Comparación BER vs distancia para la red WDM PON a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps con el efecto no lineal FWM y una potencia de entrada de 1 milivatio.	63
Figura 44. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM/TDM PON a una distancia de 20 km con el efecto no lineal FWM con una potencia de entrada de 1 milivatio.	64
Figura 45. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM PON a una distancia de 20 km con el efecto no lineal FWM con una potencia de entrada de 1 milivatio.	65
Figura 46. Potencia recibida vs distancia para la red WDM/TDM PON con efecto no lineal FWM a una velocidad de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps a una potencia de entrada de 1 milivatio.	66
Figura 47. Potencia recibida vs distancia para la red WDM PON con efecto no lineal FWM a una velocidad de transmisión de 10 Gbps y una potencia de entrada de 1 milivatio.	67
Figura 48. Grupo de longitudes de onda que ingresan a la fibra óptica.	68

Figura 49. Espectro óptico sin efectos no lineales.....	69
Figura 50. Espectro óptico con efecto no lineal SRS	70
Figura 51. Espectro óptico con efecto no lineal SBS	71
Figura 52. Espectro óptico con efecto no lineal XPM.....	71
Figura 53. Espectro óptico con el efecto no lineal FWM.....	72

Resumen

Las redes PON (redes ópticas pasivas) constituyen una de las soluciones más factibles al incremento de la demanda de ancho de banda de los usuarios. El advenimiento de servicios como voz sobre (VoIP), juegos interactivos, Televisión de alta definición, telefonía celular 4G, telepresencia, telemedicina, necesitan de un gran ancho de banda, el único medio de transmisión que permite tales anchos de banda es la fibra óptica y particularmente las redes ópticas pasivas, que no utilizan elementos activos, son una solución viable para llegar a los usuarios de casas, oficinas, empresas y brindarles todos estos servicios. Sin embargo, existen varios efectos generados por la fibra óptica sobre la señal transmitida, tales como los efectos no lineales, causados en gran medida por la potencia de transmisión. Los efectos no lineales se presentan en cuatro formas: la dispersión estimulada de Raman (SRS), la dispersión estimulada de Brillouin (SBS), la modulación de fase cruzada (XPM) y la modulación de las cuatro ondas (FWM). Todos ellos afectan en cierta medida y en ciertas condiciones a la transmisión de datos en una red WDM/TDM-PON y a una red WDM PON, por lo que es de interés determinar como la señal es afectada por los efectos no lineales. Se analizó dos escenarios el primero con una red PON sin la presencia de los efectos no lineales y el segundo con la presencia de efectos no lineales. Se determinó que el efecto no lineal FWM causa mayores variaciones no lineales de la tasa de bit errado (BER) con respecto a la potencia.

Abstract

The PON (Passive Optical Network) is the solution to the bandwidth demand of users, the advent of services like Voice over (VoIP), interactive games, high definition television (HDTV), 4G cellular telephony, telepresence, telemedicine, require a large bandwidth, the only medium that allows such transmission bandwidth is fiber optics and in optical networks, passive optical networks that do not use active elements, are a solution to reach customers homes , offices, businesses and provide all these services, however there are nonlinear effects caused largely by the transmit power, is analyzed as nonlinear dispersion effects stimulated Raman (SRS) scattering stimulated Brillouin (SBS), the cross-phase modulation (XPM) and modulation of the four waves (FWM), affecting the data transmission in a WDM / TDM-PON and WDM / PON, and determining how the power is affected by nonlinear effects. The first two stages with a WDM / TDM-PON without the presence of the nonlinear effects and the second in the presence of nonlinear effects discussed. It was determined that the non-linear FWM higher nonlinear effects cause variations in the wrong bit rate (BER) with respect to power.

Introducción

El crecimiento experimentado en la primera década del siglo XXI, de las redes de gran ancho de banda, y el acceso al internet y servicios multimediales a grandes cantidades de usuarios en diversas regiones geográficas, permite ofrecer servicios como: Televisión de alta definición (HDTV), Voice Over internet Protocol (VoIP), juegos interactivos mediante el internet, comunicaciones móviles sobre fibra óptica, telepresencia, telemedicina, entre otras. Las redes ópticas permiten alcanzar los anchos de banda y velocidades de transmisión requeridos para la implementación de los servicios previamente mencionados. En general las redes ópticas se pueden clasificar en: redes ópticas activas (AON) y redes ópticas pasivas (PON), las últimas son de gran interés porque no necesitan elementos activos para la transmisión de datos por la fibra óptica, lo que abarata los costos. Dentro de las soluciones de acceso a usuarios existen las redes FTTx (fiber to the x) la x indica hasta donde llega la fibra. En la presente tesis se estudia las redes de acceso, esto es las redes que llegan hasta los usuarios finales en el hogar o en el lugar de trabajo. Particularmente este tipo de redes se denomina Fiber to the Home (FTTH). Para transmitir los datos las redes ópticas pueden utilizar: multiplexación por división de tiempo (TDM) o multiplexación por división de frecuencia (WDM). Con TDM se envía los datos a cada uno de los usuarios utilizando la misma longitud de onda pero intercalando la información de cada usuario en un intervalo de tiempo determinado, lo cual tiene la ventaja de que tiene un mejor costo efectivo sin embargo no puede alcanzar velocidades de transmisión muy altas, WDM tiene la ventaja de alcanzar mayores velocidades de transmisión al asignar una longitud de onda distinta al usuario, pero los costos para su implementación son muy elevados. Una opción para lograr una transición hacia el uso de los servicios multimediales y aplicaciones de Internet de gran ancho de banda es utilizar redes híbridas WDM/TDM PON,

la cuales abaratan costos. El problema de las redes WDM/TDM PON es que al utilizar velocidades de transmisión muy elevadas, las pérdidas de potencia causadas por la atenuación de la fibra óptica, la dispersión, la absorción, a estas velocidades de transmisión agudizan los efectos no lineales causados por la interacción de la luz con los materiales de la fibra óptica. Los efectos no lineales son producidos por la variación del índice de refracción en el tiempo y con la frecuencia y son directamente proporcionales a la potencia transmitida e inversamente proporcionales al área efectiva del núcleo de la fibra óptica. En esta tesis se analiza las pérdidas de potencia causadas por los efectos no lineales en una red WDM/TDM PON y en una red WDM PON de nueva generación, para lo cual se simulará una red WDM/TDM PON y una red WDM PON en el software Optsim sin efectos no lineales y con efectos no lineales para fines comparativos.

En el capítulo 1 se recopila información relacionada con el estado del arte de las redes WDM/TDM PON de nueva generación y los efectos no lineales en la fibra óptica y en las redes WDM/TDM PON.

En el capítulo 2 se realizará la descripción las redes WDM/TDM PON simuladas sin efectos no lineales y posteriormente con la influencia de los efectos no lineales con el fin de analizar cómo estos afectan a las pérdidas de potencia de la red.

En el capítulo 3 se procede a analizar los resultados, y determinar cómo influyeron los efectos no lineales en las pérdidas de potencia de la red WDM/TDM PON.

En el capítulo 4 se detallan las conclusiones y recomendaciones recopiladas a partir de la investigación presentada en esta tesis.

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se describe los objetivos, la justificación y la teoría en que se fundamenta la tesis, así como el estado del arte de los efectos no lineales en redes ópticas pasivas (PON) de nueva generación (NGN).

1.1. Objetivos

Objetivo General

Analizar y simular las pérdidas de potencia causada por los efectos no lineales en la capa física de una red PON NGN.

Objetivos Específicos

1. Analizar el estado del arte de los efectos no lineales en la capa física de una red PON NGN.
2. Analizar y simular las pérdidas de potencia en la capa física sin influencia de los efectos no lineales en una red PON NGN.
3. Analizar y simular las pérdidas de potencia en la capa física afectada por los efectos no lineales en la capa física de una red PON NGN.

4. Determinar cómo afecta los efectos no lineales a las pérdidas de potencia de una red PON NGN.
5. Generar un documento donde se encuentre el análisis y las conclusiones obtenidas de la simulación de una red NGN PON con efectos no lineales.

1.2. Justificación

Existen efectos que provocan pérdidas de potencia de transmisión en las redes ópticas PON, como son la atenuación, ruido y distorsión, que afectan los proceso de comunicación en la capa física, pero en la fibra óptica además existen los efectos no lineales, los que provocan pérdidas de potencia adicionales, como son: la dispersión y el efecto Kerr. Es importante analizar estos fenómenos no lineales porque estos fenómenos aparecen a las velocidades de trasmisión que necesita una red NGN-PON para facilitar los servicios n-play que se deben brindar al usuario. 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 aplicado, como son modulación de fase cruzada (XPM) y la mezcla de cuarta onda (FWM); y las que se producen por efectos de dispersión en la fibra, debido a la interacción de las ondas de luz con los fotones (vibraciones moleculares) en el silicio: dispersión estimulado de Raman (SRS) y la dispersión estimulado de Brillouin (SBS) [1].

Se han analizado las pérdidas de potencia en redes PON-NGN solo tomando en cuenta el parámetro de la atenuación [2], sin embargo es importante realizar el análisis de las pérdidas de potencia en redes NGN-PON debido a la influencia de efectos no lineales, de esta manera se puede llegar a conocer si los efectos no lineales causan pérdidas significativas en la potencia de transmisión de una red PON NGN.

Con este material se pretende contribuir mediante el análisis teórico y la simulación de los efectos no lineales en redes NGN-PON, este aporte incluye nuevos elementos basados cada uno de ellos en referencias de artículos científicos y que podrán ser utilizado para que sea de ayuda de la cátedra de comunicaciones de fibra óptica en la Maestría de Redes de Comunicaciones de la Pontificia Universidad Católica, haciendo posible complementar los conocimientos generales con proyectos que se realicen como tesis de postgrado afines a los conocimientos adquiridos, de esta manera los estudiantes de la maestría además de recibir los conceptos teóricos y fundamentales de la cátedras asociadas a la fibra óptica, podrán observar simulaciones del comportamiento de redes que tienen como medio de transmisión la fibra óptica tal es el caso de la redes NGN-PON [3], fortaleciendo con esto su conocimiento teórico y práctico para su posterior aplicación en la empresas de comunicaciones del Ecuador.

1.3. Redes de Nueva generación

Las redes de comunicaciones han utilizado durante muchos años cobre como medios de transmisión. Desde hace pocos años atrás ha iniciado el remplazo del cobre por fibra óptica, alcanzado velocidades de hasta varios gigabits por segundo. Esto provoca un efecto positivo en la economía por las siguientes razones: los usuarios pueden acceder a nuevas aplicaciones como son las basadas en Internet (juegos, P2P, etc.), servicios multimedios como HDTV bajo demanda, el e-learning para enseñar mediante video conferencia en tiempo real y el e-health o telemedicina que permite monitorear y diagnosticar pacientes también en tiempo real; fomenta la productividad mediante el teletrabajo, la cloud computing y las videoconferencias, reduciendo a la vez costos de transporte.

Se deberá invertir en el área de telecomunicaciones, optimizando infraestructura sobre todo en las zonas donde actualmente no tiene acceso la fibra óptica, mejorando así la red de comunicaciones actual, y la consecuente generación de fuentes de trabajo para implementar, mantener y supervisar la nueva infraestructura.

A continuación se presentan algunas definiciones de una red de nueva generación (New Generation Network “NGN”):

Las redes de nueva generación se definen como “redes de acceso cableadas que consisten total o parcialmente en elementos ópticos y son capaces de prestar servicios de acceso de banda ancha con características mejoradas en comparación con los servicios prestados a través de las redes de cobre existentes” [4].

El Grupo de Estudio 13 del Sector de Normalización de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT –T) en la Recomendación Y.2001, define una

NGN como: “Red basada en paquetes que permite prestar servicios de telecomunicación y en la que se pueden utilizar múltiples tecnologías de transporte de banda ancha propiciadas por la QoS (Quality of Service), y en la que las funciones relacionadas con los servicios son independientes de las tecnologías subyacentes relacionadas con el transporte. Permite a los usuarios el acceso sin trabas a redes y a proveedores de servicios y/o servicios de su elección. Se soporta movilidad generalizada que permitirá la prestación coherente y ubicua de servicios a los usuarios”. [5].

En las definiciones indicadas previamente se puede definir como elemento común el que estas redes permiten brindar servicios de voz, video y datos, con un gran ancho de banda, y que puede añadir servicios innovadores tales como: servicios móviles, la HDTV por demanda, etc..., para brindar todos estos servicios se necesita altas velocidades de transmisión, por lo cual el medio de transmisión utilizado es la fibra óptica.

Las NGN según la ITU tienen las siguientes características generales: “transferencia basada en paquetes; separación de las funciones de control en capacidades de portador, llamada/sesión, y aplicación/servicio; separación entre la prestación del servicio y el transporte, y la provisión de interfaces abiertas; soporte de una amplia gama de servicios, aplicaciones y mecanismos basados en bloques de construcción del servicio (incluidos servicios en tiempo real, de flujo continuo en tiempo no real y multimedia); capacidades de banda ancha con QoS extremo a extremo; funcionamiento con redes tradicionales a través de interfaces abiertas; movilidad generalizada que consiste en la capacidad del usuario o de otras entidades móviles de comunicar y acceder a servicios independientemente de los cambios de ubicación o del entorno técnico. El grado de disponibilidad de servicio puede depender de varios factores, incluidas las capacidades de la red de acceso,

los acuerdos de nivel de servicio (si los hubiese) entre la red propia del usuario y la red visitada, etc., el término movilidad incluye la capacidad de telecomunicación con o sin continuidad de servicio; acceso sin restricciones de los usuarios a diferentes proveedores de servicios; variedad de esquemas de identificación; percepción por el usuario de características unificadas para el mismo servicio; convergencia de servicios entre fijo y móvil; independencia de las funciones relativas al servicio con respecto a las tecnologías de transporte subyacentes; soporte de múltiples tecnologías de la última milla; la conformidad con todos los requisitos reglamentarios, por ejemplo en cuanto a comunicaciones de emergencia, seguridad, privacidad, interceptación legal, etc.” [5].

Los servicios y el transporte en las redes NGN se ofrecen por separado y pueden desarrollarse independientemente. Por ende las funciones para servicios y transporte son distintas, las funciones de una red NGN se distribuyen por toda la red y deben permitir la comunicación entre la red NGN y redes previamente establecidas. La red NGN debe soportar terminales externos de diverso tipo como: teléfonos analógicos, teléfonos Ethernet, teléfonos móviles, dispositivos SIP entre otros.

Al utilizar redes NGN para llegar al usuario mediante fibra óptica se puede alcanzar velocidades de transmisión elevadas, dependiendo de la distancia que debe recorrer la fibra hasta el usuario final se tiene cuatro tipos de redes: FTTH (Fiber to the Home), en este caso la fibra llega hasta el usuario, FTTB (fiber to the Building) en este caso la fibra llega hasta el edificio y se utiliza cobre para llegar al usuario, FFTN(fiber to the node), en este caso la fibra óptica llega hasta un nodo y debe utilizarse cobre para llegar al usuario y FTTC (fiber to the cabinet) en este caso la fibra óptica llega hasta el gabinete del usuario y se utiliza cobre para llegar al usuario. [4]

En la presente tesis, el caso de análisis es aquel en que la fibra óptica llega hasta el usuario, es decir una red NGN FTTH. En la figura 1 se puede observar una red FFTH.

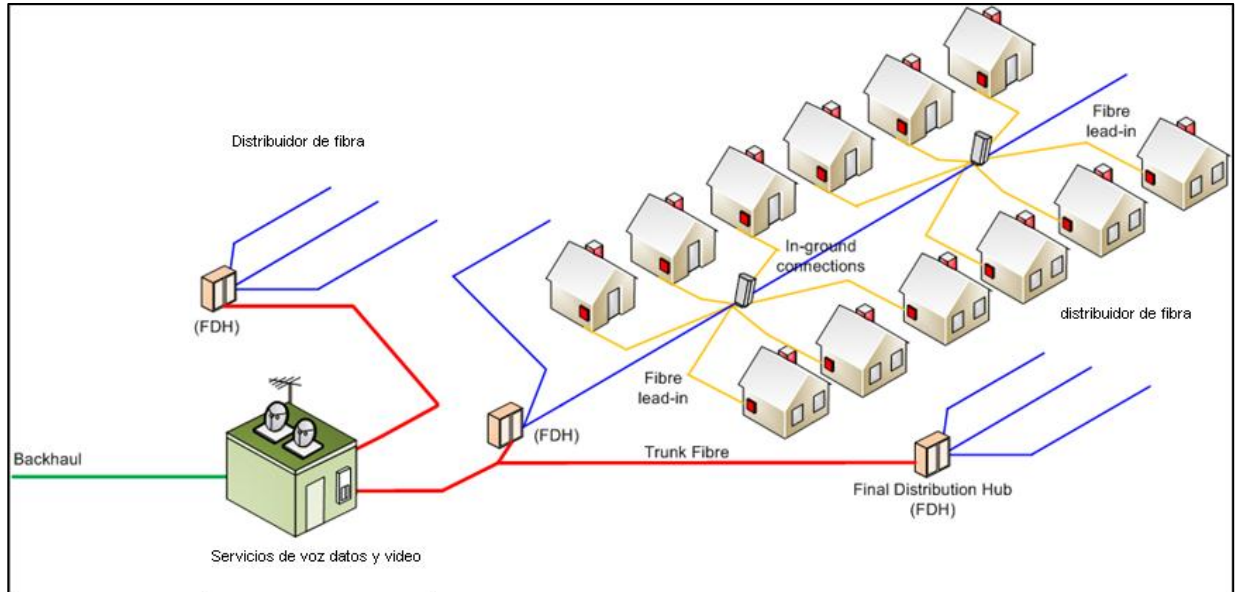


Figura 1. Red FFTH (Fiber to the Home)

Fuente: consultado de: <http://www.opennetworks.com.au/FTTH-Lakeside/FTTH-Fibre-to-Your-Home/FTTH-Your-Land/What-is-FTTH/default.aspx> [6]

1.4. Redes PON

En la actualidad se ha incrementado la necesidad de ancho de banda por parte de los usuarios, debido a que existen servicios ofrecidos por las operadoras como: video sobre demanda, redes privadas virtuales, telefonía IP, televisión de alta definición (HDTV), juegos en línea, entre otras tal como se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1. Servicios y velocidad de transmisión

Aplicación	Tráfico de subida (Mb/s)	Tráfico de bajada (Mb/s)
Navegación web	Menor a 1	1-2
Video conferencia	2-3	2-3
SDTV VOD	2-3	3-4
Descarga de archivos y video	4-5	5
Video en tiempo real	5	5
Juegos multijugador	6	6
Web hosting	6-7	6-7
Descarga archivos grandes	12	12
Video subida/bajada	13	13
HDTV	1-2	15
Next generation 3D TV	1-2	Mayor a 25
Redes de almacenamiento	10	Mayor a 25

Fuente: Jingjing Zhang, Nirwan Ansari, Next-Generation PONs: A Performance Investigation of Candidate Architectures for Next-Generation Access Stage 1 [6]

Las redes cuyo medio de transmisión es el cobre como xDSL (línea de abonado digital) y HFC (híbrido cobre fibra) no soportan el ancho de banda necesario para ofrecer los servicios indicados en la tabla 1, por lo cual la solución es utilizar redes cuyo medio de transmisión sea la fibra óptica. Dentro de las redes de fibra óptica se pueden emplear redes activas o pasivas y enlaces punto a punto o multipunto. “En este escenario se incluyen las siguientes categorías de servicio: servicios de banda asimétricos (por ejemplo, servicios de difusión digital, vídeo por demanda, etc.); servicios de banda ancha simétricos (por ejemplo, difusión de contenidos, correo electrónico, intercambio de archivos, cursos a distancia, telemedicina, juegos en línea, etc.); servicio telefónico público (POTS)”. [7].

Las redes PON están constituidas por el terminal de línea óptico (OLT) ubicada en la oficina central (OC), los elementos pasivos que permiten

separar en varios canales ópticos (como los divisores de potencia o “splitters”), y los terminales de red ópticos conocidos como unidad de red ópticas (ONU) que se encuentran en la casa u oficina del usuario. Se pueden tener en las redes PON tradicionales cantidades grandes de usuarios, empleando divisores de salida de varias potencias, por ejemplo de 32, 64 y hasta 128 salidas. En la figura 2 se puede observar una red PON, la cual está constituida por: una oficina central que es la OLT donde se encuentran los servicios de VoIP, televisión, entre otros; estos servicios son transportados por una fibra primaria feeder (esta etapa de la red se conoce como distribución), luego mediante un splitter con relación 1 : N, se vuelve a dividir el canal de fibra óptica en N canales para que lleguen los servicios a la ONU del usuario.

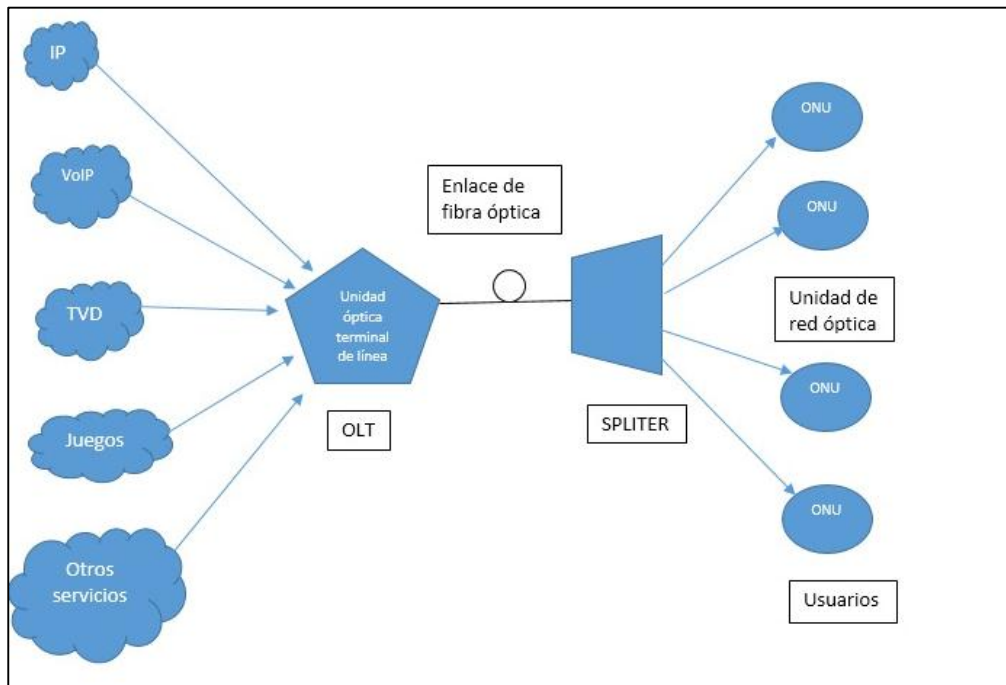


Figura 2. Red PON

Fuente: <http://tecnicoperu8k.blogspot.com/2011/09/caracteristicas-generales-de-una-red.html>. [9]

1.4.1. Caracterización del rendimiento de las tecnologías PON

Dada la creciente demanda de los usuarios residenciales para tener una comunicación de alta velocidad con capacidades multimedia de alta definición, las tecnologías de acceso óptico están creciendo. Estas tecnologías de red de acceso de fibra son adecuadas para atender estas necesidades, una red PON pasiva, es decir, que no requiere ninguna fuente de alimentación, ni elementos activos como repetidores de señal, permite que la red sea relativamente más tolerante a fallos, y disminuye sus costos operativos y de mantenimiento.

Dependiendo del esquema de multiplexación de datos, existen tres tipos de redes PON: TDM PON, WDM PON Y OFDM PON. Las redes TDM PON usan la multiplexación por división de tiempo, en donde todo el tráfico que sube y baja a las múltiples ONU es enviado por una única longitud de onda; las WDM PON utilizan multiplexación por división de frecuencia para llevar el tráfico de subida y bajada a las múltiples ONU mediante varias longitudes de onda; las OFDM-PON utilizan multiplexación ortogonal para llevar el tráfico de subida y bajada a las múltiples ONU.

Los sistemas TDM PON incluyen las redes: ATM PON(APON), Broadband PON (BPON), Ethernet PON (EPON), Gigabit PON(GPON) y Next Generation PON (NG PON).

APON / BPON:

ATM Passive Optical Network (APON) fue creado en 1995 por ITU/FSAN y estandarizada como ITU-T G.983. APON fue la primera tecnología hecha para FTTH (fibra hasta la casa) que se basó en la tecnología ATM. Esta

arquitectura no sólo ofrece servicios basados en ATM, sino también permite distribución de vídeo y acceso a Ethernet, por este motivo esta red fue renombrada como Broadband Passive Optical Network (BPON). [8]

EPON

Proveedores de equipos Ethernet fundaron el grupo Ethernet First Mille Alliance (EFMA), para elaborar una arquitectura para FTTH (fibra hasta la casa), ya que Ethernet es el protocolo dominante en redes de área local. FTTH basada en EPON (Ethernet passive optical network) fue adoptada por el estándar IEEE802.3 en septiembre de 2004. Un único protocolo para la red de área local, red de acceso y la red Backbone permite un fácil despliegue de FTTH. EFMA introdujo el concepto de Ethernet Passive Optical Networks (EPONs), en el que la topología punto a multipunto se implementa con divisores ópticos pasivos. [8]

G-PON

Redes ópticas pasivas como GPON (Gigabyte passive optical network), fueron desarrolladas por FSAN en el año de 2001 para diseño de redes por encima de 1Gbps, la arquitectura GPON ofrece convergencia de datos y voz a velocidades de hasta 2,5 Gbps. La arquitectura GPON está basada en divisores ópticos pasivos en los cuales no existen elementos electrónicos activos. La red de acceso tiene una comunicación más rápida y eficiente entre el operador y el usuario, obteniendo el cliente acceso a su información con una mayor rapidez, como tiene inmunidad al ruido electromagnético la fibra óptica presta mejor calidad de servicio. Una de sus principales características es su rango de alcance cercano a los 20 Km (aunque a velocidad de transmisión inferiores al estándar se puede llegar a 60 Km o más) entre el proveedor y el cliente. [8]

La próxima generación de redes PON que se encuentran en procesos de investigación a largo plazo:

- WDM PON
- Híbrida WDM/TDM PON

Los sistemas WDM PON proveen a cada abonado una longitud de onda y se puede entregar datos a 32 usuarios o 64 usuarios a la vez. Como se puede ver en la figura 3.

La arquitectura WDM PON tiene algunas ventajas sobre el sistema TDM PON, que son las siguientes: el usuario tiene una longitud de onda dedicada y por ende accede a todo el ancho de banda; son redes más seguras y más escalables al recibir cada usuario una única longitud de onda. El control de la capa MAC es más simplificado porque provee conexión P2P entre la ONU y la OLT y no requiere un acceso al medio punto multipunto; al ser un enlace punto a punto cada enlace puede tener diferente velocidad y protocolos lo que le da más flexibilidad. Sin embargo las redes WDM PON son costosas al ofrecer una longitud de onda específica por cada ONU. Así, la OLT de una red WDM PON es de 32 usuarios debe controlar 32 longitudes de onda y cada ONU su propia longitud de onda, con lo cual se necesita 32 láseres para transmitir tanto en el canal de subida como en el canal de bajada, a diferencia de la TDM PON en la que se usa el mismo láser para todas las ONU. [8]

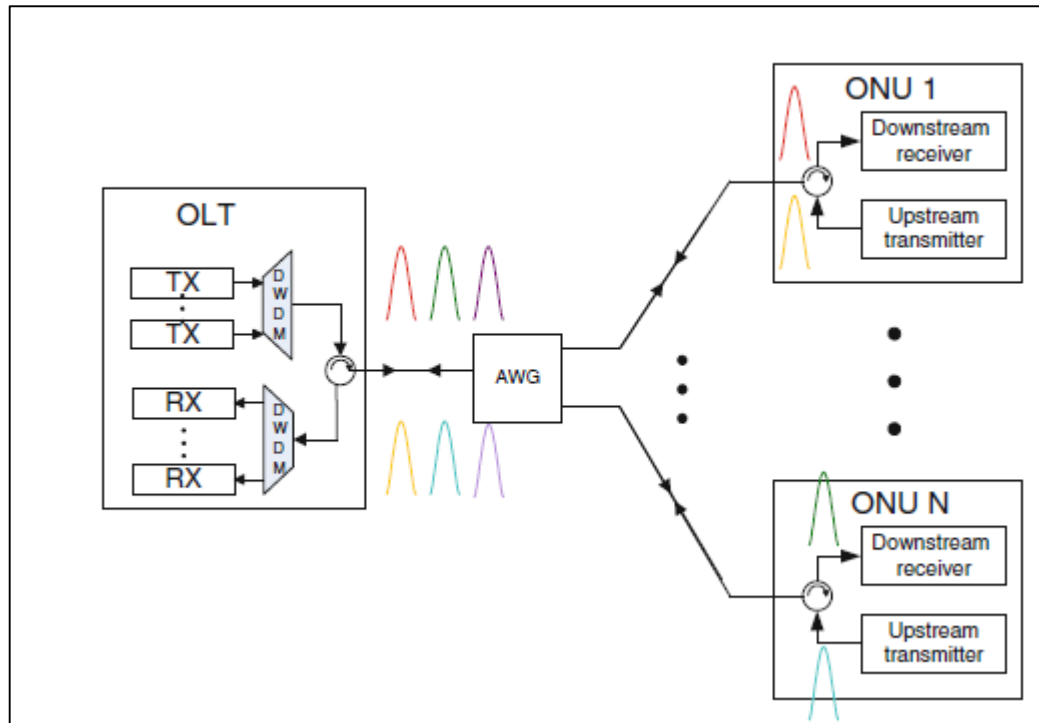


Figura 3. Arquitectura de una red WDM PON

Fuente: [Nirwan Ansari](#), [Jingjing Zhang](#), Media Access Control and Resource Allocation For Next Generation Passive Optical Networks, pagina 19 [10]

Las redes TDM PON son menos costosas y por tanto más fáciles de implementar, sin embargo para cubrir los anchos de banda requeridos por las aplicaciones futuras se necesitara utilizar redes como las WDM PON, para mantener la interoperabilidad entre las dos redes se necesitan las redes híbridas WDM/TDM PON, hasta que se pueda disminuir los costos y realizar una migración hacia las red WDM PON.

A continuación se describe el estado del arte de arquitecturas híbridas WDM/TDM:

Esta red no es tan costosa y puede cubrir a usuarios que se encuentren hasta 100 km entre la red metro y el acceso, esta arquitectura se ha dividido en 4 etapas: 1) la ONU del cliente 2) gabinete de la calle 3) bucle de abonado 4) core. El core representa a un nodo de la red metro, dentro de esta área está el bucle de abonado, que se supone que está totalmente bajo control del proveedor de servicios, el bucle de abonado está formado por el back-haul que es la etapa que interconecta el core con el bucle de abonado y la etapa que interconecta el bucle de abonado con el acceso al abonado. Se ha considerado que la distancia entre el core y el local exchange es de 88 Km, entre el gabinete de la calle y la ONU existe una distancia máxima de 6 Km que se conoce como fibra de distribución, todas las fibras utilizadas son mono modo. La arquitectura tiene splitters de la red TDM PON, el mismo que tiene una longitud de onda específica asignada al enlace de subida entre el usuario y el core, y otra longitud de onda asignada al enlace de bajada entre el core y el cliente. Las diferentes longitudes de onda de varias TDM PON son combinadas en el bucle de abonado usando un multiplexor demultiplexor DWDM. Se utiliza una separación de canal de 100 GHz, la banda C se ha dividido en dos: azul (1529–1541.6 nm) se utiliza para el enlace de bajada y rojo (1547.2–1560.1 nm) para el enlace de subida. Entre bandas existe una guarda de 5 nm, y el uso de filtros azul rojo (RBF) para dividir y combinar las 2 bandas en varios puntos de la red. Se puede usar los 40 canales DWDM para soportar más redes PON, y seis canales en la banda de guarda. La arquitectura propuesta se puede ver en la figura 4. [9] .

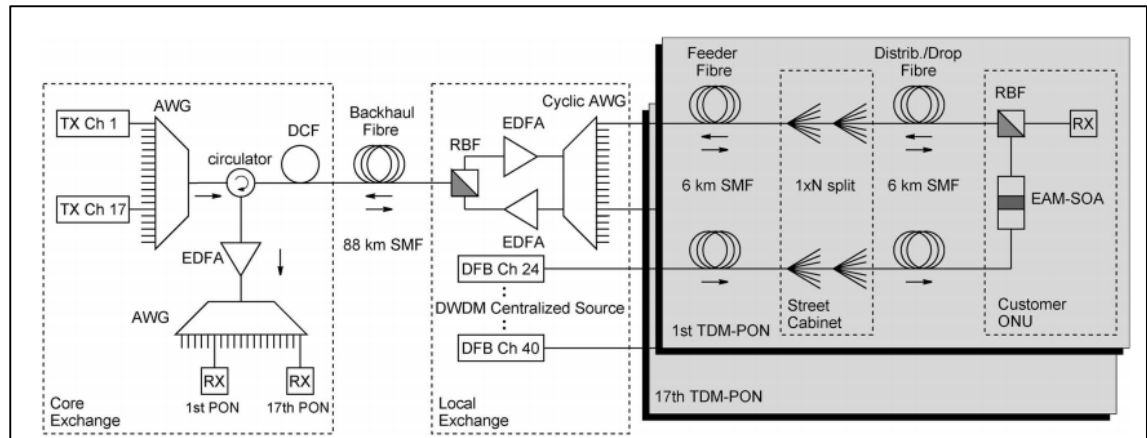


Figura 4. Arquitectura DWDM-TDM de larga distancia PON

Fuente: Giuseppe Talli, Paul D. Townsend Hybrid DWDM–TDM Long-Reach PON for Next-Generation Optical Access página 2828 [12]

La siguiente arquitectura la red DWDM/TDM PON tiene una sola OLT con láseres sintonizables que utiliza un único AWG (Arrayed Wave Guide Gratings), los canales de la AWG 4x4 permiten hasta 16 canales DWDM, para el tráfico de bajada se utiliza una DWDM en el centro del grupo λ_1 de la ITU para llegar a todas las ONU de la TDM PON1 mediante broadcasting; para el tráfico de subida la red DWDM PON utiliza los 16 canales DWDM centrados en el grupo λ_2 de al ITU para llegar a las 16 ONU de la WDM PON. [10], como se observa en la figura 5.

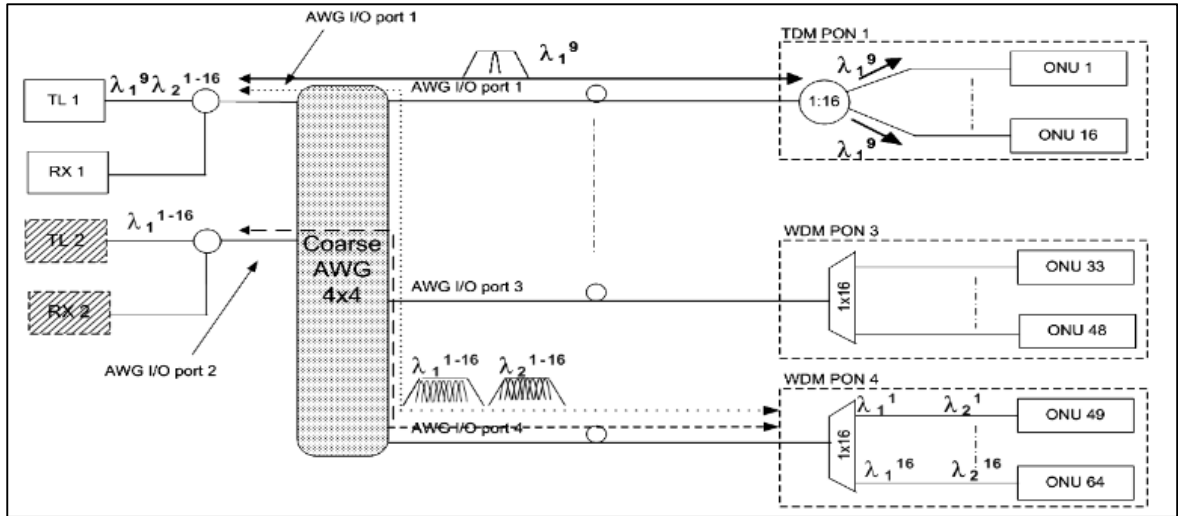


Figura 5. TDM/DWDM PON

Fuente: Y. Shachaf, C. -H. Chang, P. Kourtessis, and J. M. Senior; Multi-PON access network using a coarse AWG for smooth migration from TDM to WDM PON; Optics Express, Vol. 15, Issue 12, pp. 7840-7844 (2007) [2]

En la siguiente arquitectura se utiliza una estrella WDM PON que puede ofrecer servicios a usuarios separados por grandes distancias mediante el uso de filtros BSWDM (Band Splitting WDM) [11]. En la primera etapa el feeder de fibra y el filtro BSWDM multiplexan y demultiplexan el tráfico de subida y bajada en las bandas respectivas (1RN), el cable de fibra de distribución conecta con la segunda etapa (2RN), el cual multiplexa y demultiplexa en los canales respectivos, el segundo cable de distribución de fibra conecta con los abonados, como se observa en la figura 6.

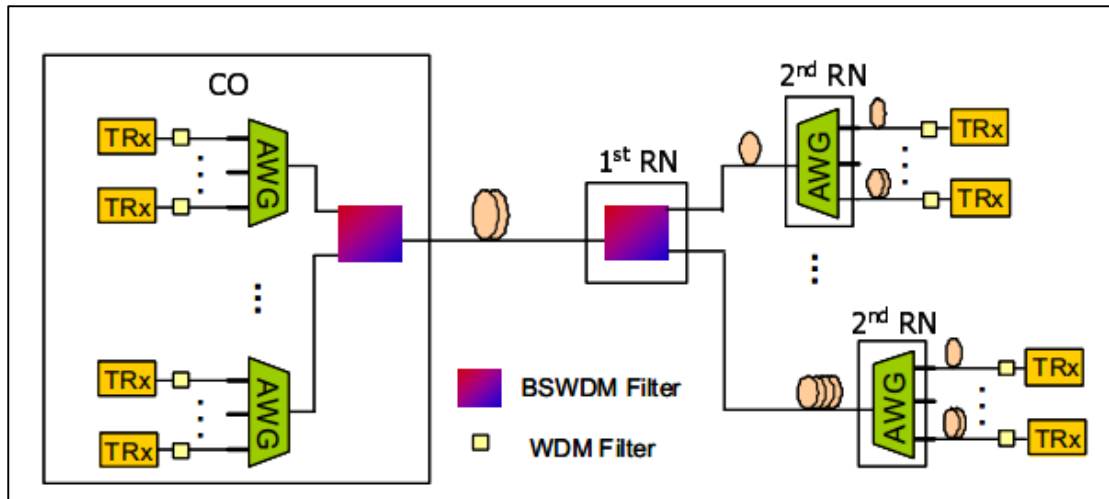


Figura 6. Estrella WDM/TDM PON

Fuente: S. G. Mun, S. M. Lee, K. Okamoto and C. H. Lee, "A multiple star WDM-PON using a band splitting WDM filter," pag 6261 [12]

La arquitectura propuesta puede tener múltiples TDM PON y WDM PON usando un solo OLT. Se utiliza un filtro BSWDM 1X4 en la OLT, el cual multiplexa y demultiplexa las señales de subida y bajada. El filtro BSWDM separa en varios canales, que son asignados a diferentes grupos de suscriptores. Para la arquitectura propuesta se utilizó cuatro canales ITU-T: $\lambda_1 - \lambda_4$ ($\lambda_1 = 1530 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1550 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 1570 \text{ nm}$ y $\lambda_4 = 1590 \text{ nm}$), cada una de las cuales puede proporcionar hasta 16 longitudes de onda para cada una de las ONU de una PON. Para proporcionar los servicios del tráfico de bajada a la TDM PON 1, el Tx en la OLT utiliza el canal ITU λ_1 para todas las ONU conectadas a la TDM PON a manera de broadcasting. Para proveer servicios en las WDM PON, cada transmisor de la DWDM PON emplea una de las 16 longitudes de onda de los canales λ_2 a λ_4 . Para evitar la necesidad de fuentes laser en cada ONU, se usa transceivers colorless con una pérdida de 3dB. Los filtros WDM en cada ONU separa el tráfico de bajada de cada usuario. Las fibras monomodo son usadas como fibras de distribución y feeder, para proveer protección contra fallas en la fibra, un OC 1x2 fue usado en la OLT

1.5. Efectos No lineales en la fibra óptica

La intensidad del campo electromagnético es no lineal cuando interactúa la luz con un dieléctrico, en el caso de las redes WDM/TDM PON utilizan como medio de transmisión la fibra óptica, la cual está confinada por un dieléctrico (el silicio). Se puede tener dos tipos de efectos no lineales en la fibra óptica causados por la dispersión y el índice de refracción.

1.5.1. Efectos No lineales en la fibra óptica por dispersión inelástica

Existen dos tipos de dispersión inelástica: dispersión estimulada de Raman (SRS) y dispersión estimulada de Brillouin (SBS). La principal diferencia entre la dispersión de Raman y de Brillouin es que en la dispersión de Raman actúan fonones ópticos y en la dispersión de Brillouin actúan fonones acústicos. Ambos procesos afectan en las pérdidas de potencia, sin embargo si la potencia de transmisión es baja estos efectos son despreciables. El efecto no lineal al ser producido por fenómenos ópticos en SRS y fonones acústicos en SBS causa las siguientes reacciones: SBS genera un haz en dirección contraria a la fuente, SRS genera un haz en ambas direcciones; el desplazamiento de frecuencia es de 10 GHz en SBS y de 13 THz en SRS; el espectro de SBS es menor a 100MHz y el espectro de SRS está entre 20 y 30 THz. [14].

1.5.1.1. Dispersión estimulada de Brillouin

A una frecuencia Ω_p un campo eléctrico oscilante, genera ondas acústicas con frecuencia Ω_s . EL proceso de dispersión conserva la energía y el momento. La potencia de umbral para la dispersión estimulada de Brillouin es P_{th} , la ecuación de la potencia de umbral es $P_{th} = I P A_{eff}$, donde el área efectiva debe satisfacer la condición [14].

$$g_B P_{th} L_{eff} / A_{eff} = 21$$

Donde g_B es la ganancia del efecto Brillouin, que para fibras ópticas de silicio es casi 5×10^{-11} m/W, la $L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha L}}{\alpha}$; para los sistemas de comunicaciones de fibra óptica $L_{eff} = 1/\alpha$, donde α es la atenuación de la fibra óptica, si la potencia del efecto SBS supera 1 milivatios se produce el efecto no lineal de Brillouin. [14]

Para determinar la potencia umbral del efecto SBS sobre una fibra óptica, se analiza para una señal continua y una señal ASK. [14]

$$P_{th}^{CW} = \frac{21A_e}{L_{eff}g_B} \left(\frac{\Delta\theta_B + \Delta\theta_S}{\Delta\theta_B} \right),$$

$$P_{th}^{ASK} = \frac{P_{th}^{CW}}{1 - \frac{B}{2\Delta\theta_B} \left(1 - e^{-\frac{\Delta\theta_B}{B}} \right)},$$

Donde A_e es el área efectiva, $\Delta\theta_B$ es FWHM (full-width-at-half-maximum) Brillouin, $\Delta\theta_S$ es la FWHM del láser, L_{eff} es la longitud efectiva, g es un coeficiente de varios parámetros, y B es la velocidad de transmisión de ASK [15].

1.5.1.2. Dispersión estimulada de Raman

La dispersión estimulada de Raman (SRS) ocurre cuando las ondas de luz incidente se dispersan sobre las moléculas de silicio. Algunos fonones dan su energía para crear otros fonones de baja energía, el silicio al absorber esa energía provoca un estado vibracional, este proceso ocurre en ambas direcciones, de manera similar que SBS existe un umbral de potencia sobre el cual ocurre el SRS, la potencia umbral (P_{th}) para SRS es [14]:

$$P_{th} = \frac{16\alpha\pi\omega^2}{gR}$$

Si $\pi\omega^2 = 50 \text{ um}^2$ y $\alpha = 0.2 \text{ dm/Km}$ la P_{th} tiene un valor cercano a 570 nW en una longitud de onda de 1.55 um. [14]

1.5.2. Efectos No lineales en la fibra óptica por índice de refracción

Con altos valores de intensidad todos los materiales presentan un comportamiento no lineal y el índice de refracción lo incrementa, esto se debe debido a una respuesta inarmónica de los electrones en los campos ópticos resultando una susceptibilidad no lineal [16]. En los sistemas de comunicaciones ópticos WDM se debe considerar el mezclado de las cuatro ondas (FWM) y la modulación de fase cruzada.

1.5.2.1. Modulación de Fase Cruzada (XPM)

Este fenómeno ocurre cuando dos o más canales son transmitidos por la misma fibra óptica como en el caso de los sistemas de comunicaciones WDM. En este caso la potencia de transmisión depende del canal por donde se transmite la información y de la variación del bit patrón de los canales adyacentes. [14]

1.5.2.2. Mezclado de la cuarta onda (FWM)

La potencia depende del índice de refracción, es originada por una susceptibilidad de tercer orden χ , el cual origina el fenómeno del mezclado de la cuarta onda, si se tiene tres rayos de luz con frecuencias f_1 , f_2 , f_3 . Este

proceso afecta la calidad de un sistema de comunicaciones ópticas que transmiten varias longitudes ondas a la vez. La longitud de onda de la frecuencia de la mezcla de las cuatro ondas (f_{FWM}) más crítica para un sistema óptico es igual [14] : $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k$

Donde f_i, f_j, f_k son las frecuencias de longitudes de onda enviados por el enlace óptico. La potencia producida es igual a [14]:

$$P_{FWM}(f_i, f_j, f_k) = \frac{1024\pi^6}{n^4 l^2 c^2} d^2 x^2 \frac{P_i P_j P_k}{A_{eff}^2} e^{-\alpha L} \frac{(1 - e^{-\alpha L})^2}{\alpha^2} n$$

Donde P_i, P_j y P_k son las potencias de entrada de las frecuencias f_i, f_j, f_k respectivamente, la potencia P_{FWM} es la potencia generada por la frecuencia f_{FWM} , n es el índice de refracción de la fibra óptica, l la longitud de onda, A_{eff} el área efectiva de la fibra, α es el coeficiente de pérdidas de la fibra, L es la longitud de la fibra, d es el factor de degeneración ($d=3$ si $i=j$, $d= 6$ si $i \neq j$) y χ es la susceptibilidad de tercer orden. La potencia causada por el fenómeno de la mezcla de las cuatro ondas para un sistema WDM [17] es:

$$P_{tot}(f_m) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_m} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P_{FWM}(f_i, f_j, f_k)$$

Capítulo 2

2.1 Introducción

En este capítulo se describe la red híbrida WDM/TDM PON que se va a simular en un primer escenario sin efectos no lineales y en un segundo escenario con la influencia de los efectos no lineales: dispersión estimulada de Raman (SRS), dispersión estimulada de Brillouin (SBS), modulación cruzada de fase (XPM) y mezcla de cuatro ondas (FWM).

2.2. Red implementada

La red que se implementó en el software de simulación empleado en el presente proyecto, está basada en el modelo de redes híbridas WDM/TDM PON [13]. La red híbrida está formada por una red WDM/TDM PON que permite llevar los datos de hasta 64 usuarios, mediante 8 redes TDM PON y 8 canales WDM, y una red WDM PON que permite llevar los datos de hasta 16 usuarios, se utiliza dos canales centrales de la ITU-T $\lambda_1 = 1530 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1550 \text{ nm}$, para la red WDM/TDM PON y la red WDM PON respectivamente; ambas redes utilizan un multiplexor para enviar los datos por un único enlace de fibra óptica. Luego mediante un demultiplexor se separan los datos de la red WDM/TDM PON y la red WDM PON y posteriormente se separan los datos que llegan a la ONU de cada usuario mediante un segundo demultiplexor. En la figura 8 puede observar el diagrama de bloques de la red WDM/TDM PON.

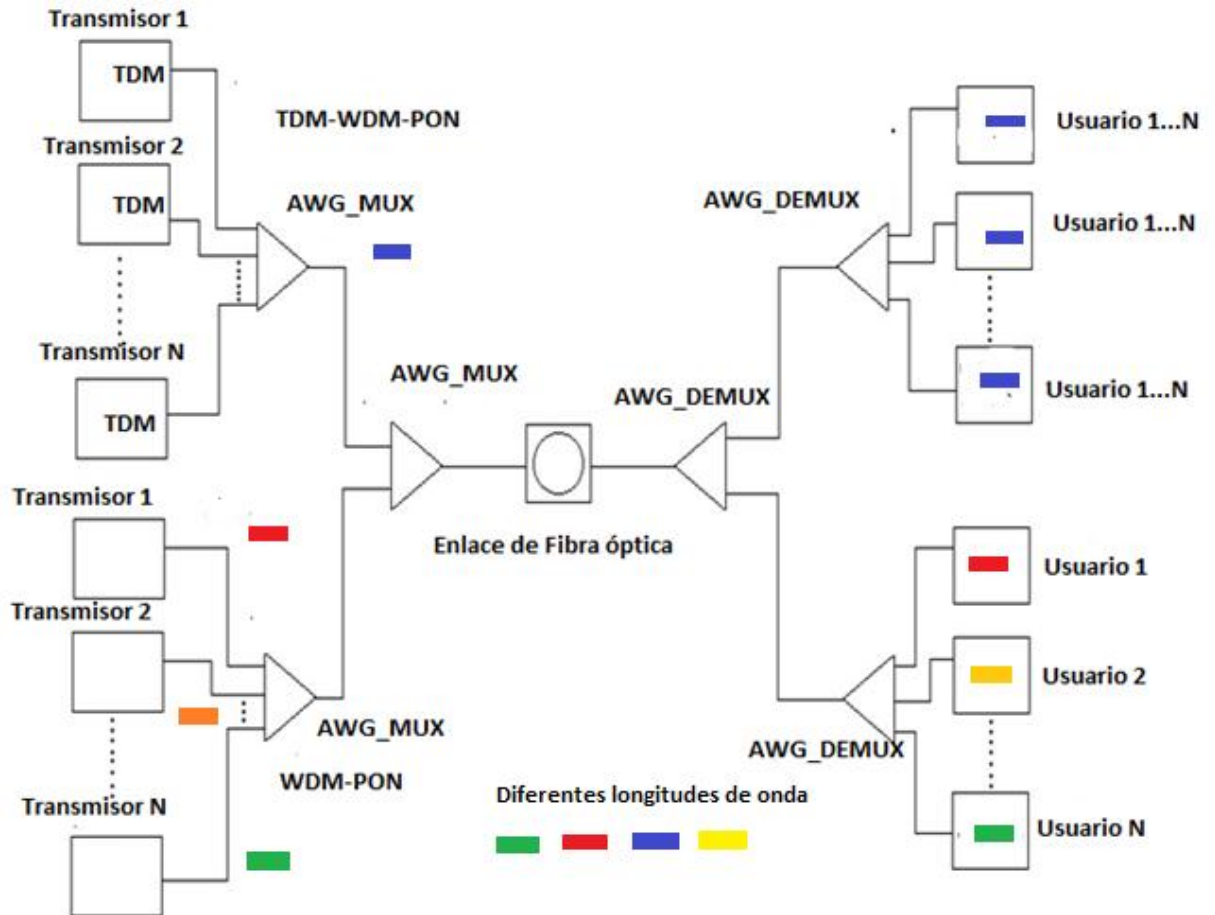


Figura 8. Diagrama de bloques de la red implementada.

Fuente: creada por el autor

2.2.1. Red TDM PON

La topología planteada está formada por 8 redes TDM PON cada una de las cuales utiliza la misma longitud de onda (utiliza el canal ITU-T $\lambda_1 = 1530 \text{ nm}$); las redes son multiplexadas mediante un AWG que envía los datos de cada red TDM PON por un solo canal de fibra óptica. En la tabla 2 se puede observar el número de la red TDM PON y la longitud de onda correspondiente.

Tabla 2. Numero de red TDM PON y longitud de onda respectiva

No de red TDM PON	λ (nm)
1	192.7
2	192.8
3	192.9
4	193.0
5	193.1
6	193.2
7	193.3
8	193.4

Fuente: creada por el autor

Cada uno de los transmisores de la red TDM PON está constituido por un generador pseudoaleatorio de señales lógicas, un codificador NRZ(no retorno a cero), un diodo laser a la longitud de onda que se va a modular la señal, un modulador de amplitud mach-zehnder, las 8 señales se multiplexan mediante un AWG-8 que introduce 3 dB de perdida en un única salida como se puede observar en la figura 9, para mayor facilidad en el uso del simulador se creó un bloque formado por los componentes previamente indicados.

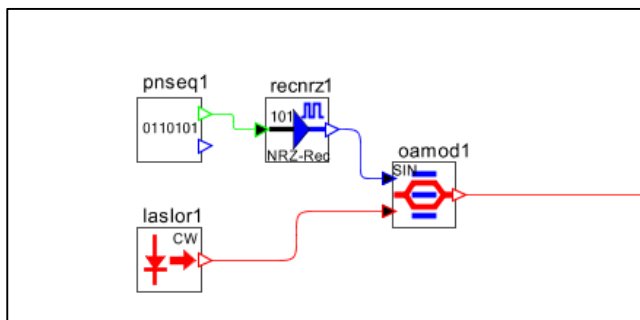


Figura 9. Esquemático del transmisor de la TDM PON

Fuente: creada por el autor

La red TDM PON es multiplexada por un AWG 1-8 el cual incluye 3 dB de pérdida, para transmitir simultáneamente por un solo canal de fibra, las 8 redes TDM PON están constituidas cada una por 8 OLT como se puede observar en la figura 10.

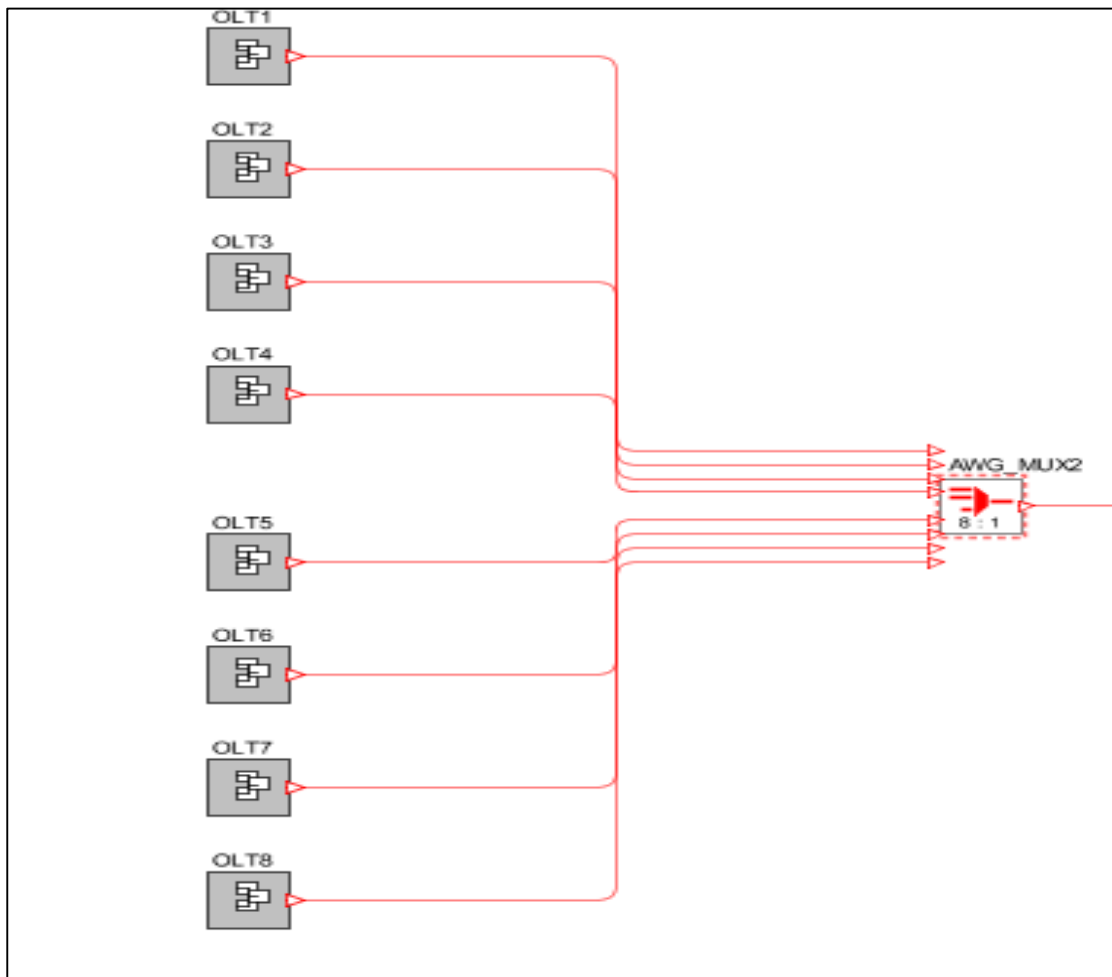


Figura 10. Red TDM PON

Fuente: creada por el autor

El transmisor de la red WDM PON está constituido por un generador de pseudocódigo, un codificador NRZ, un diodo laser, un modulador de amplitud mach-zehnder; la red WDM PON tiene 16 transmisores las cuales se multiplexan por

un AWG para ser transmitidos en un solo canal. En la figura 11 se observa la etapa de transmisión de la red WDM PON

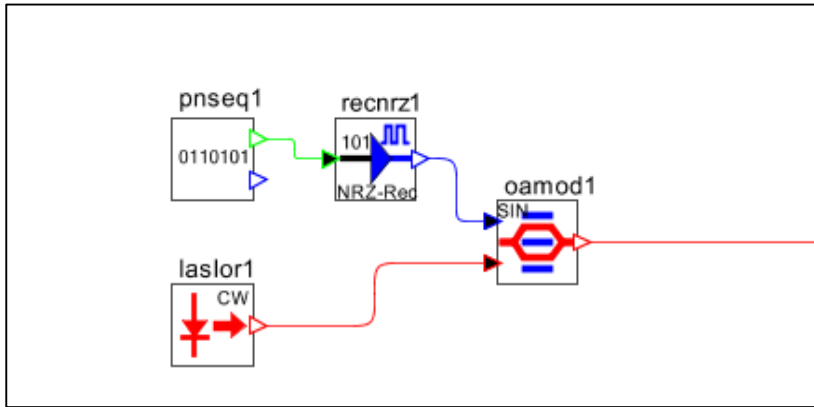


Figura 11. Etapa transmisión red WDM PON

Fuente: creada por el autor

En la tabla 3 se puede observar las longitudes de onda de cada OLT

Tabla 3. Longitudes de onda red WDM PON

Numero OLT	Longitud de onda λ (nm)
1	187.0
2	187.1
3	187.2
4	187.3
5	187.4
6	187.5
7	187.6
8	187.7
9	187.8
10	187.9
11	188.0
12	188.1
13	188.2
14	188.3
15	188.4
16	188.5

Fuente: creada por el autor

La salida de los AWG_MUX de la red WDM/TDM PON y WDM PON se multiplexan por medio de un AWG de 2 entradas, para luego las señales de ambas redes ingresen al enlace de fibra óptica el cual está formado por un amplificador de ganancia de 10 dB, una fibra óptica cuya distancia es 20 km (sin embargo para las pruebas se varió la distancia) y un fibra Grating, con una compensación de -20 ps/nm, como se puede observar en la figura 12.

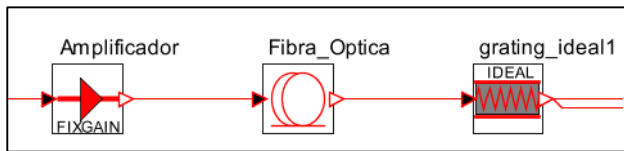


Figura 12. Enlace de fibra óptica

Fuente: creada por el autor

Las señales que salen del enlace de fibra óptica y se demultiplexan, por medio de un AWG 1:8 para la red WDM/TDM PON que introduce 3 dB de pérdida y el otro AWG-16 para la red WDM PON que introduce también 3 dB de pérdida, como se puede ver en la figura 13.

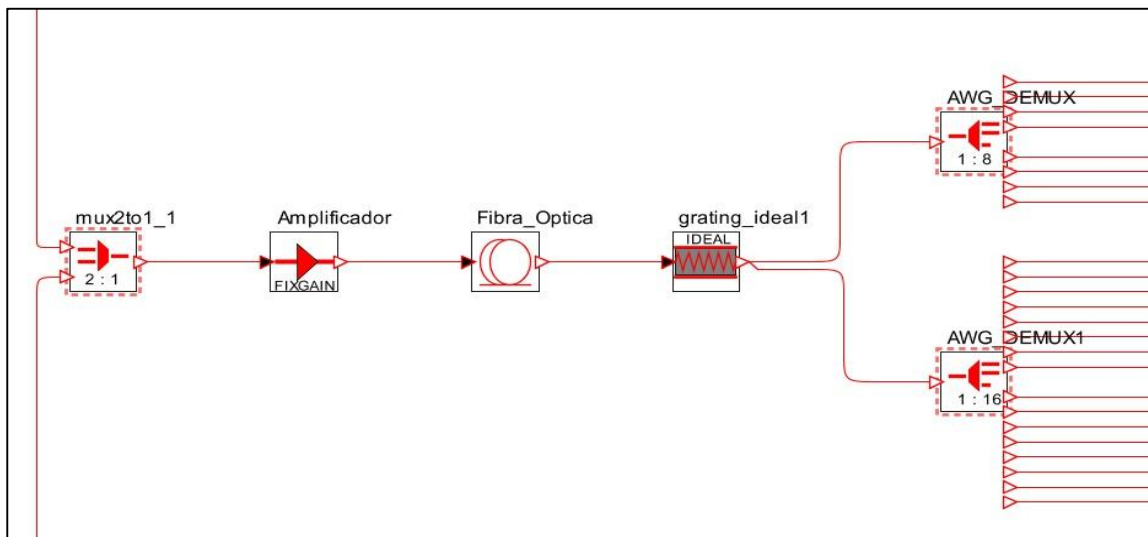


Figura 13. Etapa de demultiplexación de la red WDM/TDM PON

Fuente: creada por el autor

El receptor WDM/TDM PON está formado por un AWG 1 a 8 que introduce 3 dB de pérdidas, el cual divide la red WDM/TDM PON en 8 redes TDM, para evitar la interferencia de otras longitudes de onda se utiliza un filtro óptico para que solo pase la longitud de onda de la red TDM PON en la figura se observa además los 8 bloques de la red TDM, como se puede ver en la figura 14.

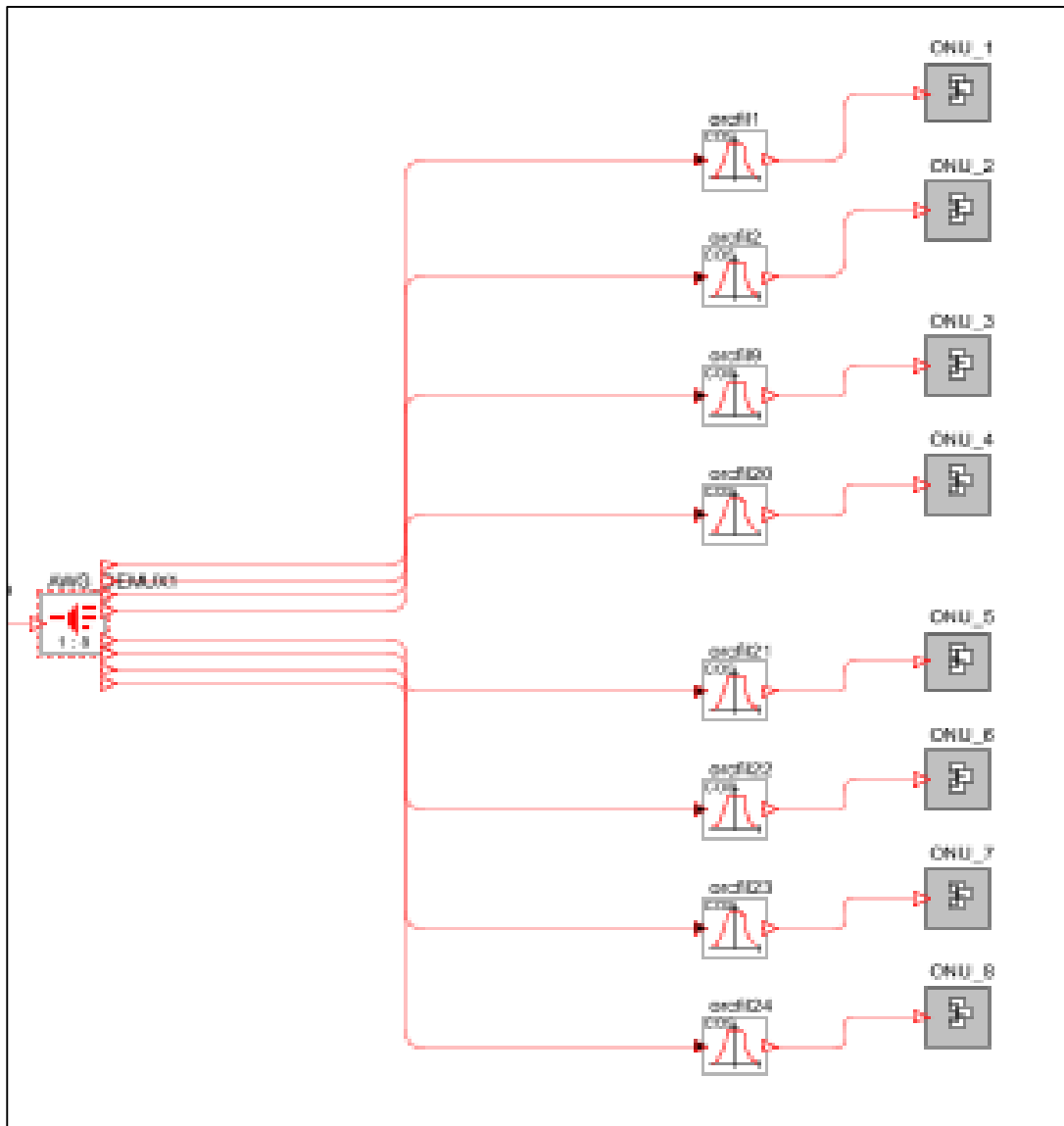


Figura 14. Demultiplexación red WDM/TDM PON

Fuente: creada por el autor

Cada bloque receptor WDM/TDM PON está conformado por un fotodiodo receptor, un filtro pasabajos de señal eléctrica, además de un generador NRZ que permite recuperar los datos de cada usuario de la red TDM PON, los datos entran a un multiplicador y se amplifican para llegar al usuario, como se puede ver en la figura 15.

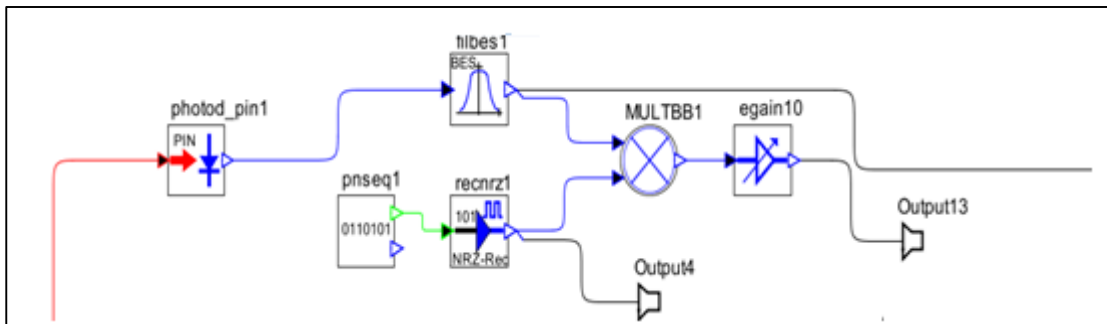


Figura 15. Receptor de la red WDM/TDM PON

Fuente: creada por el autor

En la figura 16 se puede observar el receptor de la red WDM PON conformado por un filtro óptico, el fotodiodo receptor y en caso fuese necesario un amplificador de señal eléctrica.

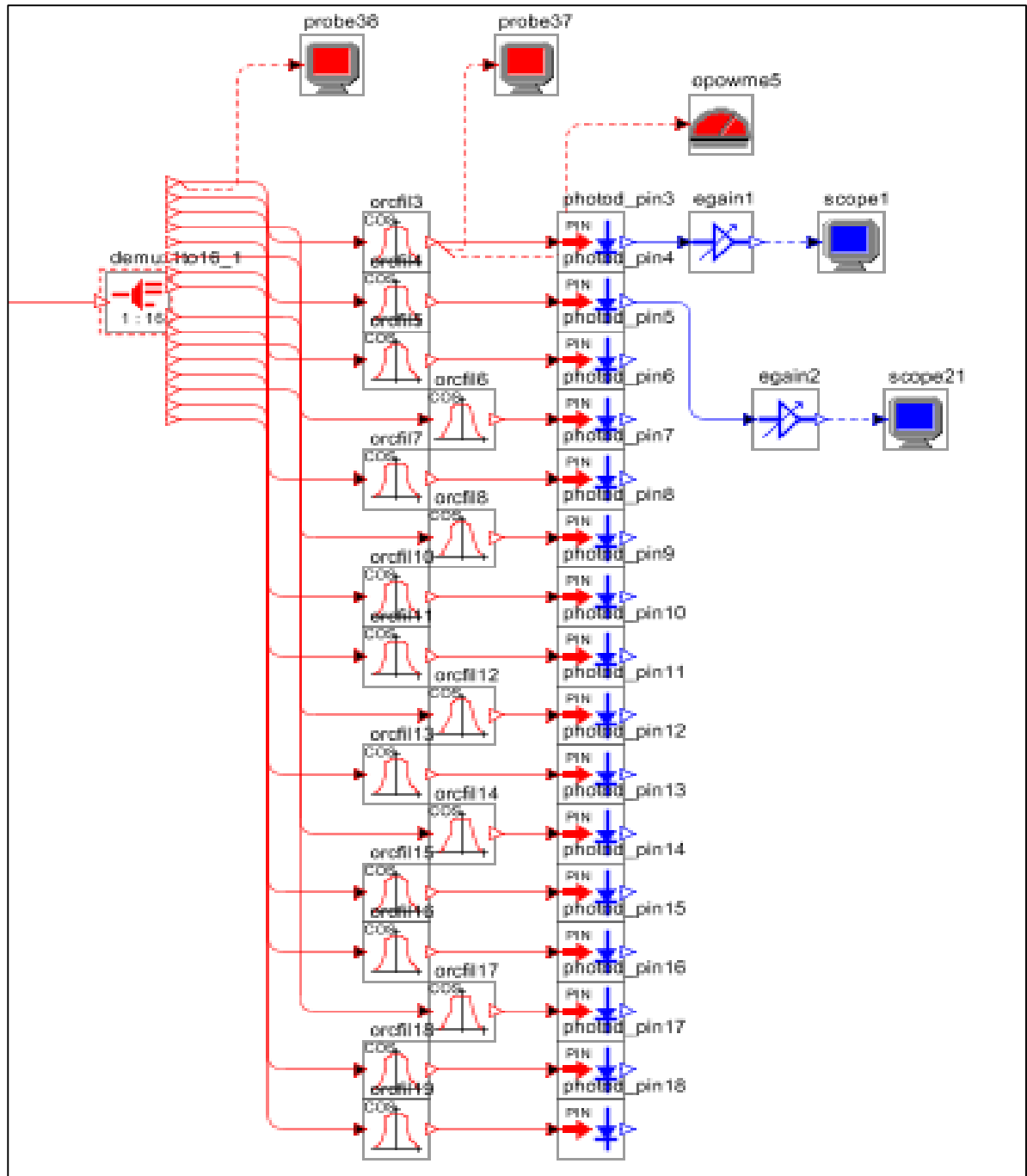


Figura 16. Receptor WDM PON

Fuente: creada por el autor

Capítulo 3

3.1. Introducción

En este capítulo se analiza los resultados de: la potencia recibida, tasa de error binario (BER) y como son afectados por la distancia y la velocidad de transmisión en la red propuesta en el capítulo 2 con y sin la presencia de los efectos no lineales.

3.2. Análisis de Resultados en la red PON sin efectos no lineales

En la figura 17 se puede observar la gráfica BER vs distancia para una velocidad de transmisión de 10 Gbps y de 20 Gbps para la red WDM/TDM PON, la simulación se realizó sin efectos no lineales; a partir de los 50 Km de distancia la red WDM/TDM PON tiene un BER no aceptable para un sistema de comunicación óptica.

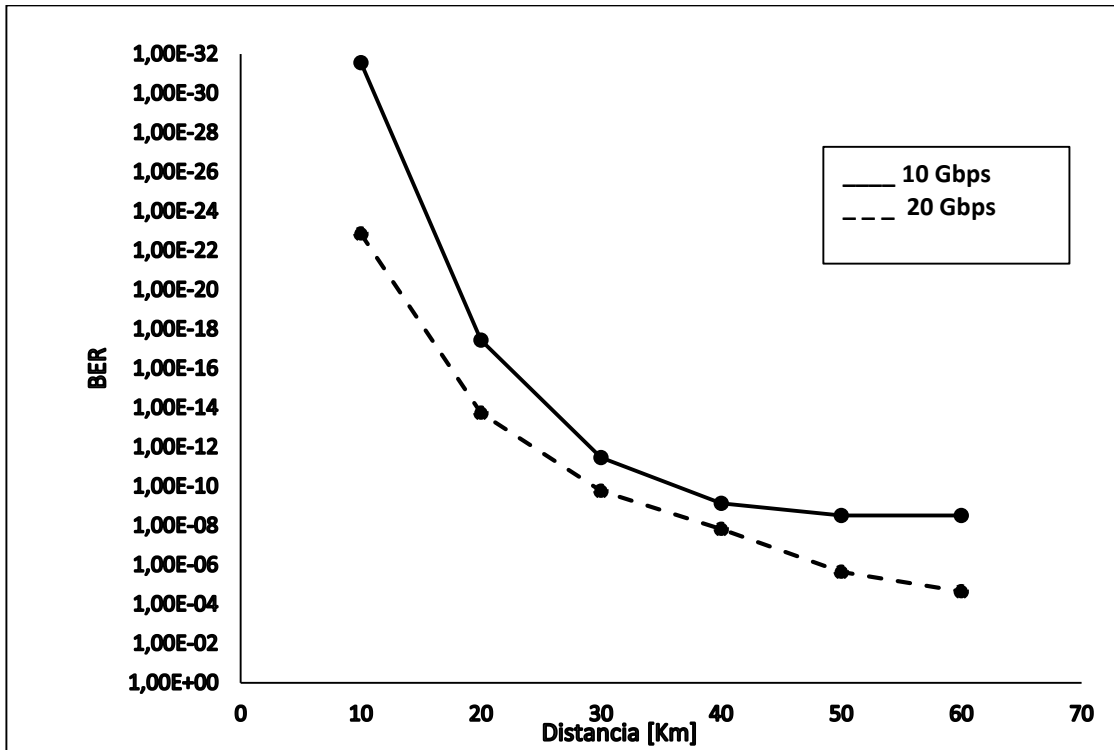


Figura 17. Comparación BER vs Distancia para la red WDM/TDM PON sin efectos no lineales a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.

Fuente: creada por el autor

En la figura 18 se observa la gráfica BER vs distancia para las velocidades de transmisión de 10 Gbps y a 20 Gbps para la red WDM PON. En ambos casos la red óptica transmite datos sin ningún problema.

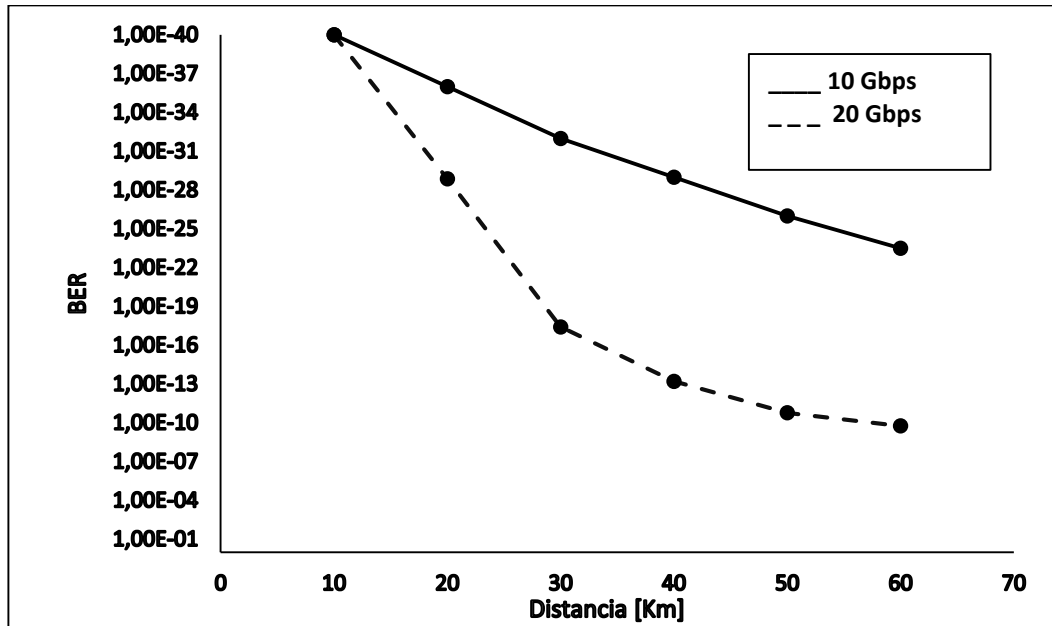


Figura 18. Comparación BER vs Distancia para la red WDM/TDM PON sin efectos no lineales a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.

Fuente: creada por el autor

En la figura 19 en la gráfica BER vs velocidad de transmisión a una distancia de 20 Km para la red WDM/TDM PON, se puede observar que a partir de los 25 Gbps el BER es superior a 10^{-9} .

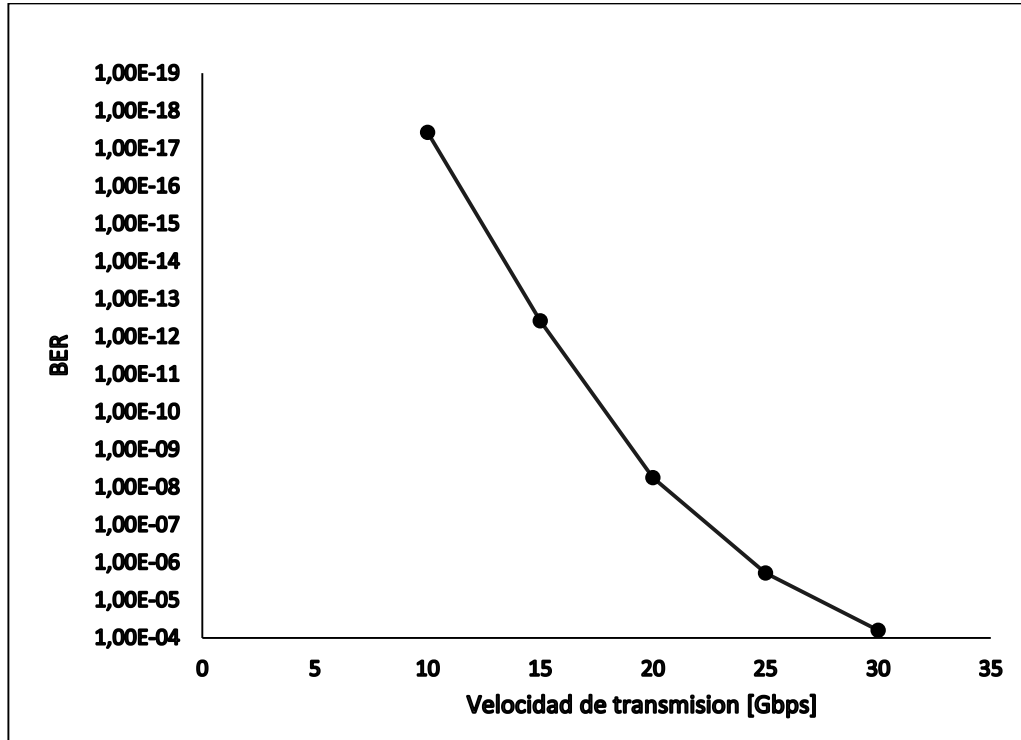


Figura 19. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM/TDM PON sin efectos no lineales con un enlace de 20 kilómetros de distancia.

Fuente creada por el autor

En la figura 20 se observa la gráfica BER vs velocidad de transmisión a una distancia de 20 Km en la red WDM PON, esta red hasta la velocidad de transmisión de 30 Gbps tiene un BER aceptable.

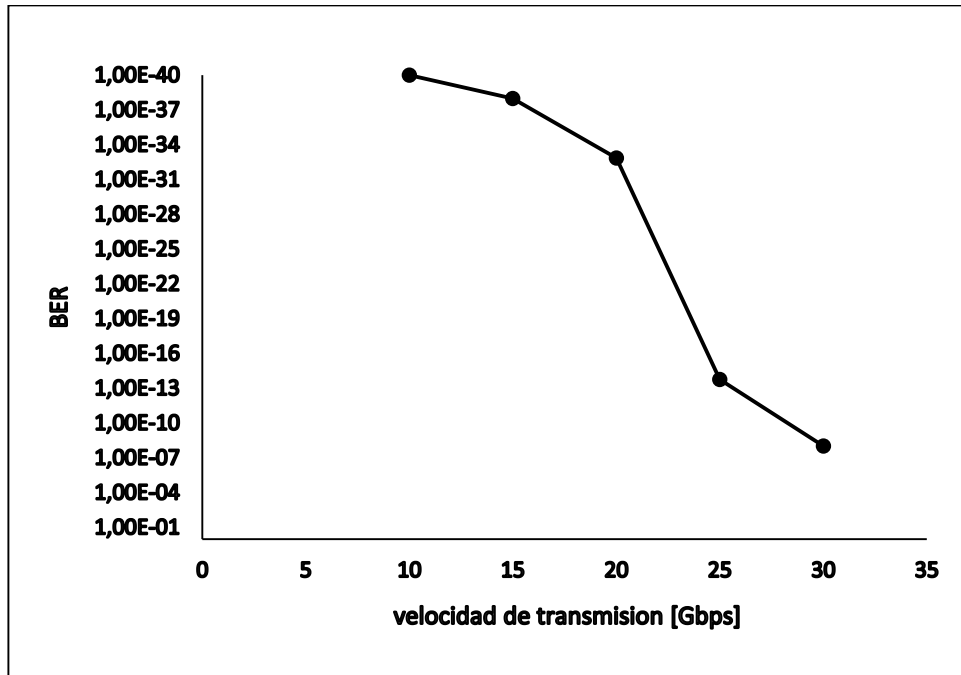


Figura 20. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM PON sin efectos no lineales con un enlace de 20 kilómetros de distancia

Fuente: Creada por el autor

En la figura 21 se observa la gráfica de la potencia recibida vs la distancia para velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps para la red WDM/TDM PON, en ambos caso el decrecimiento de la potencia recibida es exponencial.

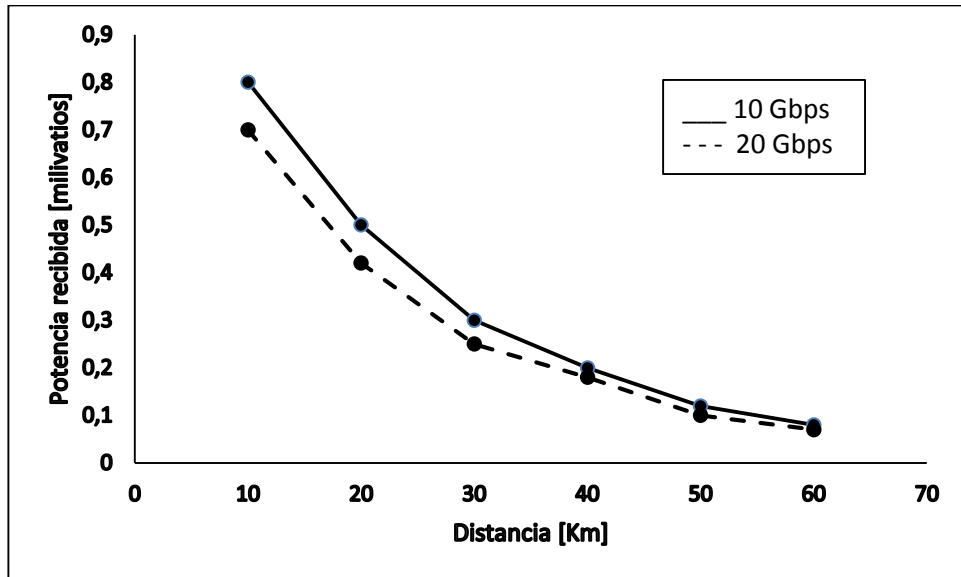


Figura 21. Comparación de la Potencia recibida vs distancia para la red WDM/TDM PON sin efectos no lineales para velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.

Fuente: creada por el autor

En la figura 22 se tiene la potencia recibida vs la distancia en la red WDM/TDM para velocidades de 10 Gbps y 20 Gbps, en este caso existe un decrecimiento exponencial de la potencia recibida que es menor a la potencia recibida respecto a la red TDM/WDM PON.

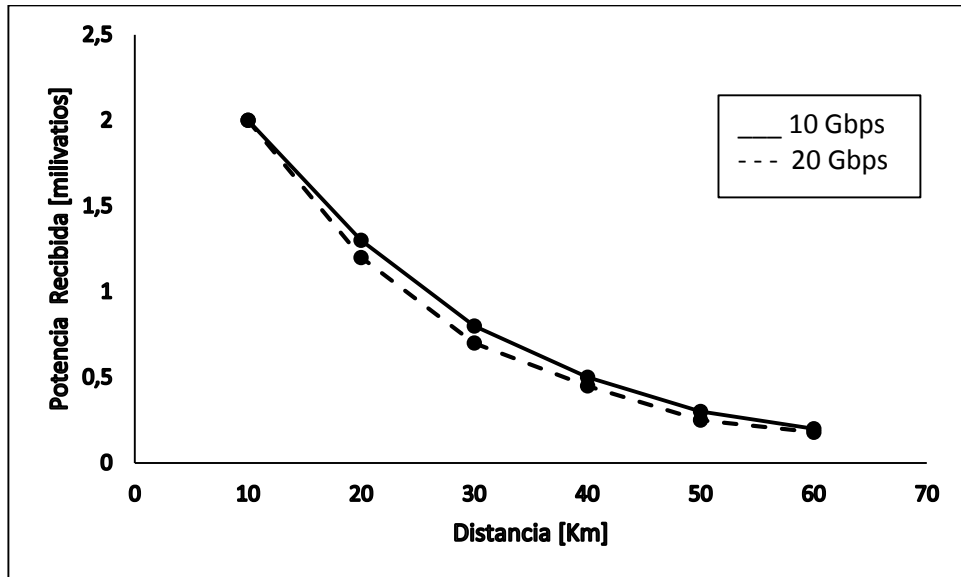


Figura 22. Comparación de la Potencia recibida vs distancia para la red WDM PON sin efectos no lineales para velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.

Fuente creada por el autor

3.3. Efecto Dispersión estimulada de Raman

A continuación se analiza el efecto Raman en la red WDM/TDM-PON y en la red WDM-PON.

En la figura 23 se observa el BER vs distancia para la red WDM/TDM PON comparando las curvas obtenidas a 10 Gbps y 20 Gbps, la potencia de entrada es de 30 milivatios con el efecto SRS.

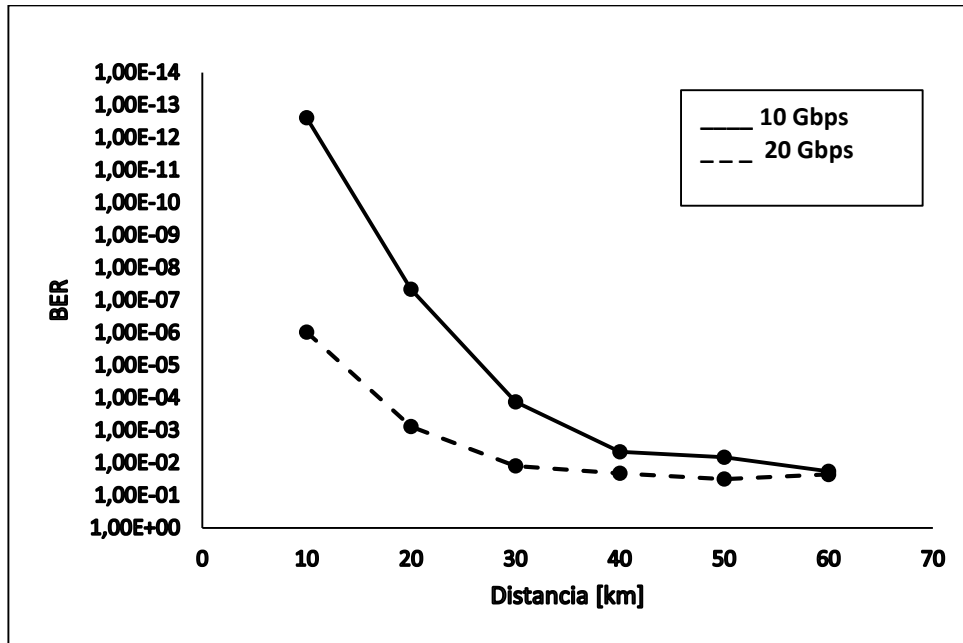


Figura 23. Comparación BER vs Distancia para la red WDM/TDM PON con el efecto no lineal SRS a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.

Fuente: creada por el autor

En la figura 24 se puede observar el BER vs distancia para velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps para la red WDM PON con efecto SRS y con una potencia de entrada de 30 milivatios.

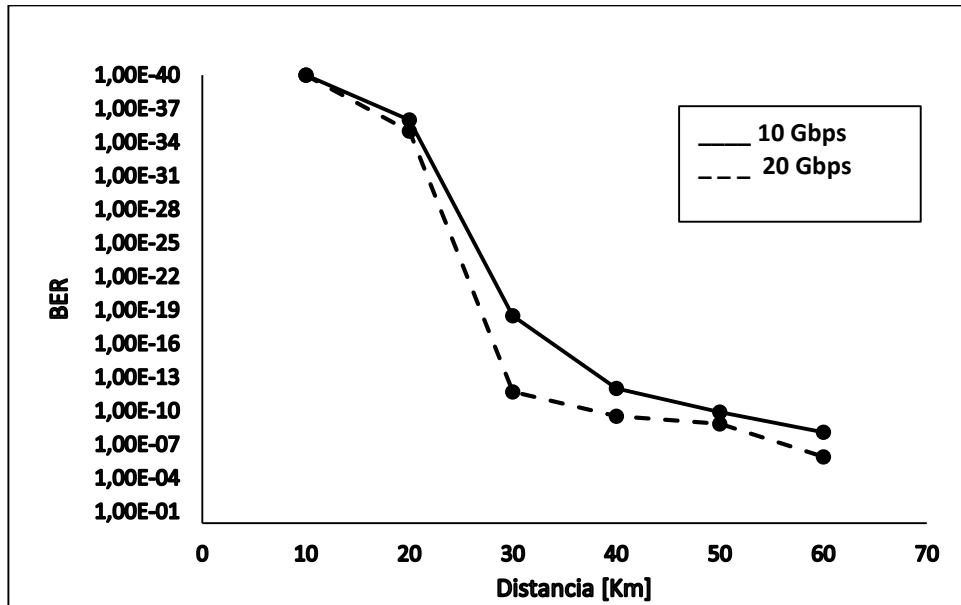


Figura 24. Comparación BER vs Distancia para la red WDM PON con el efecto no lineal SRS a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.

Fuente: creada por el autor

En la figura 25 se puede observar el BER vs velocidad de transmisión a una distancia de 20 km para la red WDM/TDM PON y con una potencia de transmisión de 30 milivatios; el efecto es muy destructivo por cuanto la tasa de error de bit tiene valores superiores al mínimo permitido en un enlace de fibra óptica que es 10^{-9} .

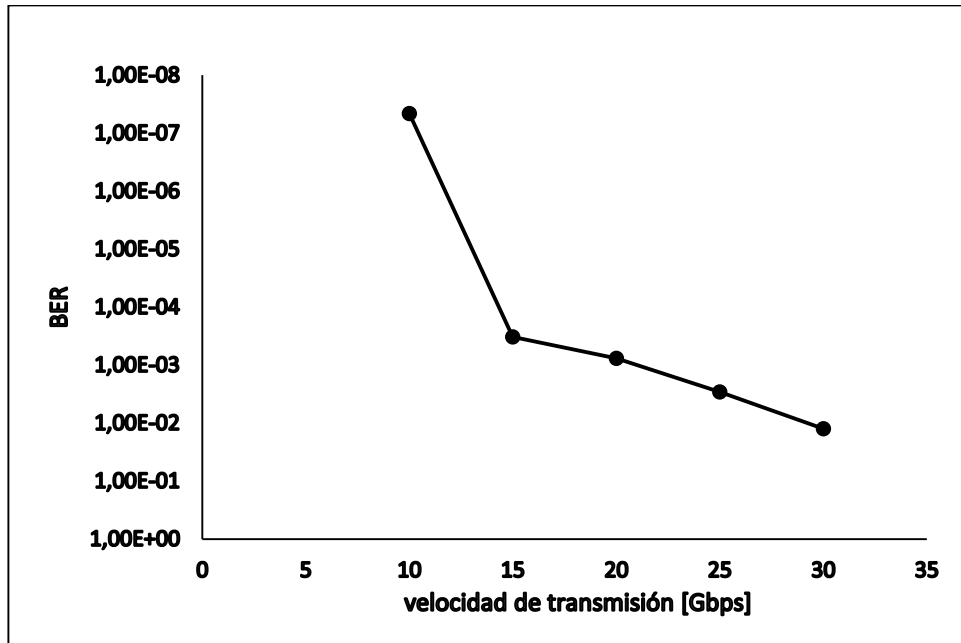


Figura 25. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM/TDM PON con el efecto no lineal SRS con un enlace de 20 kilómetros de distancia.

Fuente: creada por el autor

En la figura 26 se puede observar el BER vs velocidad de transmisión para la red WDM PON con una potencia de entrada de 30 milivatios a 20 kilómetros de distancia. Se nota que el efecto SRS a partir de una velocidad de transmisión de 25 Gbps produce valores muy altos de BER.

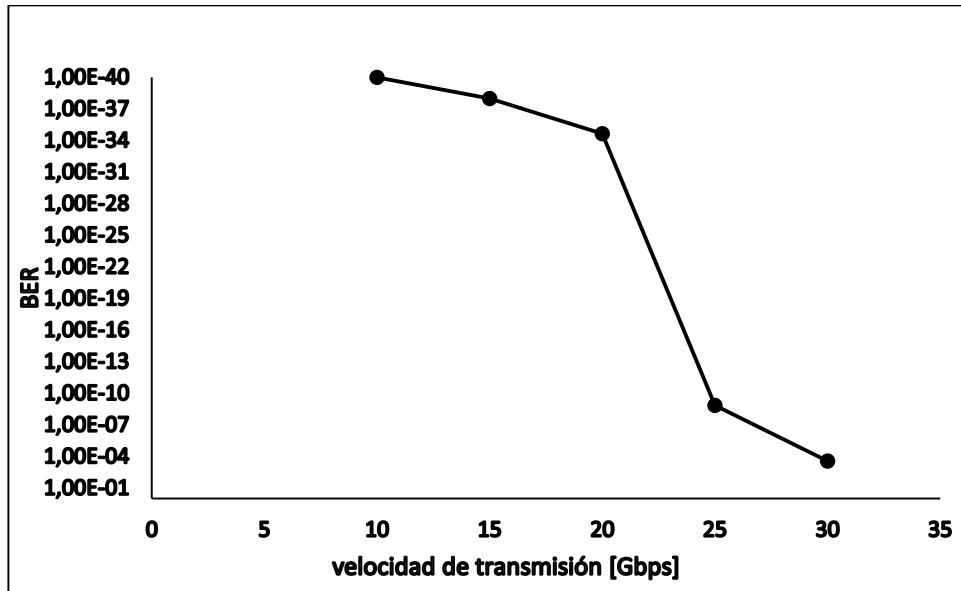


Figura 26. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM PON con el efecto no lineal SRS con un enlace de 20 kilómetros de distancia.

Fuente: creada por el autor

En la figura 27 se compara las curvas de potencia recibida y distancia de la red WDM/TDM PON para velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps, la potencia de entrada es de 30 milivatios a una distancia de 20 km. A una distancia de 50 km la potencia recibida es casi la mitad de la potencia transmitida.

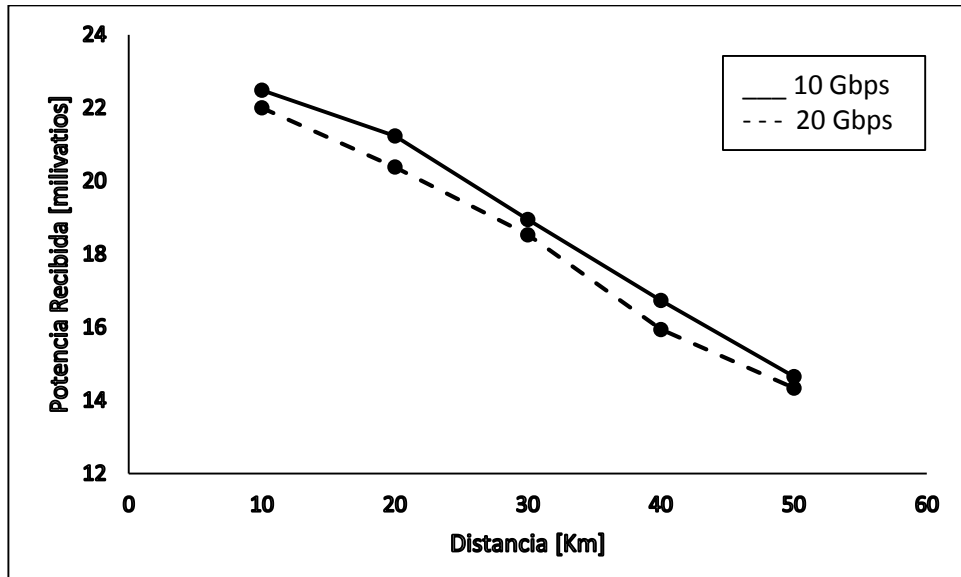


Figura 27. Comparación de la Potencia recibida vs distancia para la red WDM/TDM PON con el efecto no lineal SRS para velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.

Fuente: creada por el autor

En la figura 28 se observa la gráfica potencia recibida vs distancia para la red WDM PON con una potencia en el transmisor de 30 milivatios a una distancia de 20 km. A una distancia de 50 km la potencia recibida es un 40% menor que la potencia transmitida.

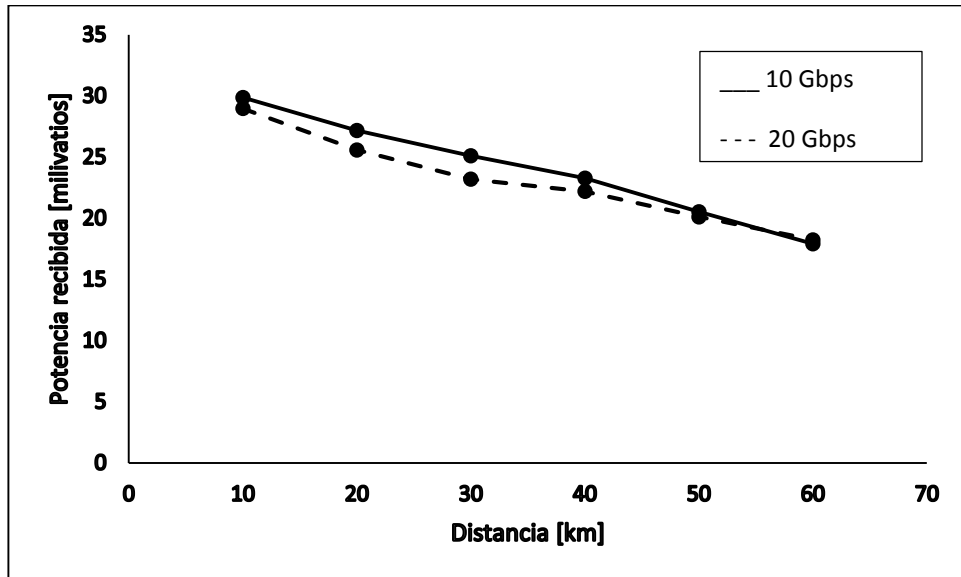


Figura 28. Comparación de la Potencia recibida vs distancia para la red WDM PON con el efecto no lineal SRS para velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps.

Fuente: creada por el autor

3.3. Efecto de Dispersión estimulada de Brillouin

A continuación se analiza el efecto Brillouin en la red WDM/TDM PON y en la red WDM PON.

En la figura 29 se puede observar el BER vs la distancia con el efecto SBS para la red WDM/TDM PON con velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps con una potencia de entrada de 20 milivatios. A una distancia de 20 Km y a una velocidad de 20 Gbps el efecto SBS degrada el BER a valores mayores de 10^{-9} .

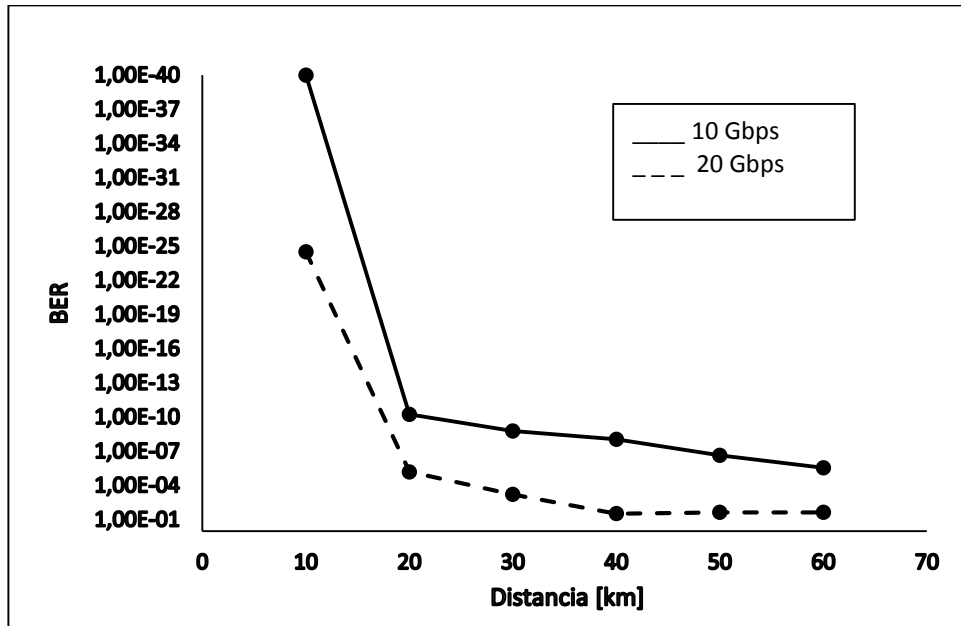


Figura 29. Comparación del BER vs distancia para velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps para la red WDM/TDM PON con la influencia del efecto no lineal SBS con una potencia de entrada de 20 milivatios.

Fuente: creada por el autor

En la figura 30 se puede observar la gráfica BER vs distancia con el efecto SBS, comparando como afecta la red WDM/PON a una velocidad de transmisión de 10 y 20 Gbps con una potencia de entrada de 20 milivatios; en este caso el efecto SBS incrementa el BER al valor permitido para un enlace óptico a partir de los 60 Km.

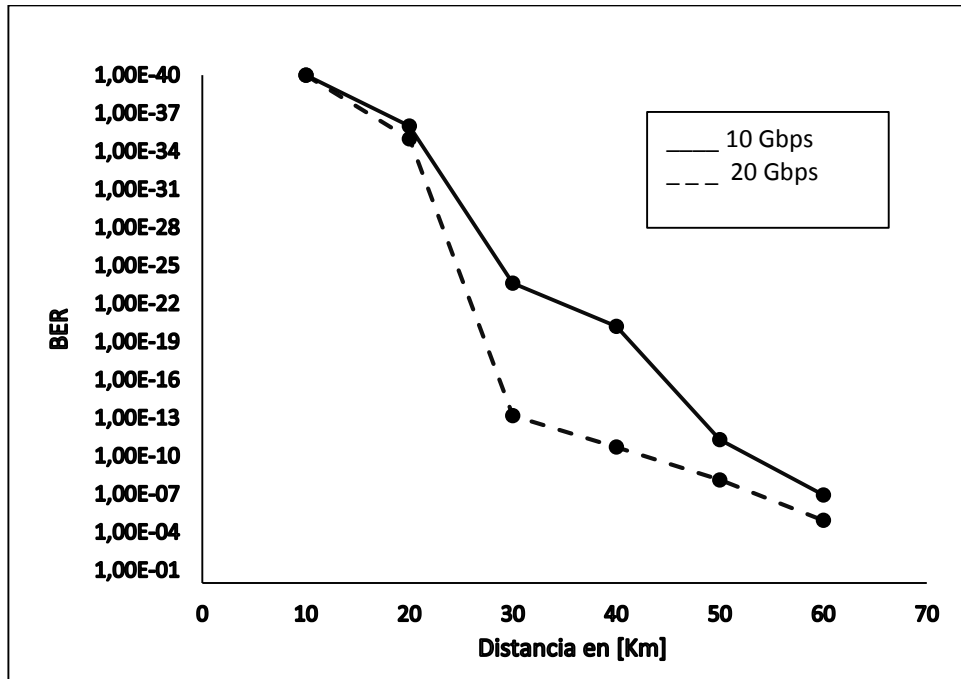


Figura 30. Comparación del BER vs distancia para velocidades de transmisión de 10 y Gbps 20 Gbps para la red WDM PON con la influencia del efecto no lineal SBS con una potencia de entrada de 20 milivatios.

Fuente: creada por el autor

En la figura 31 se puede observar el BER vs velocidad de transmisión para la red WDM/TDM PON con influencia del efecto no lineal SBS a 20 Km de distancia, con una potencia de entrada de 20 milivatios; el BER se degrada entre los 15 y 20 Gbps a valores mayores a 10^{-9} .

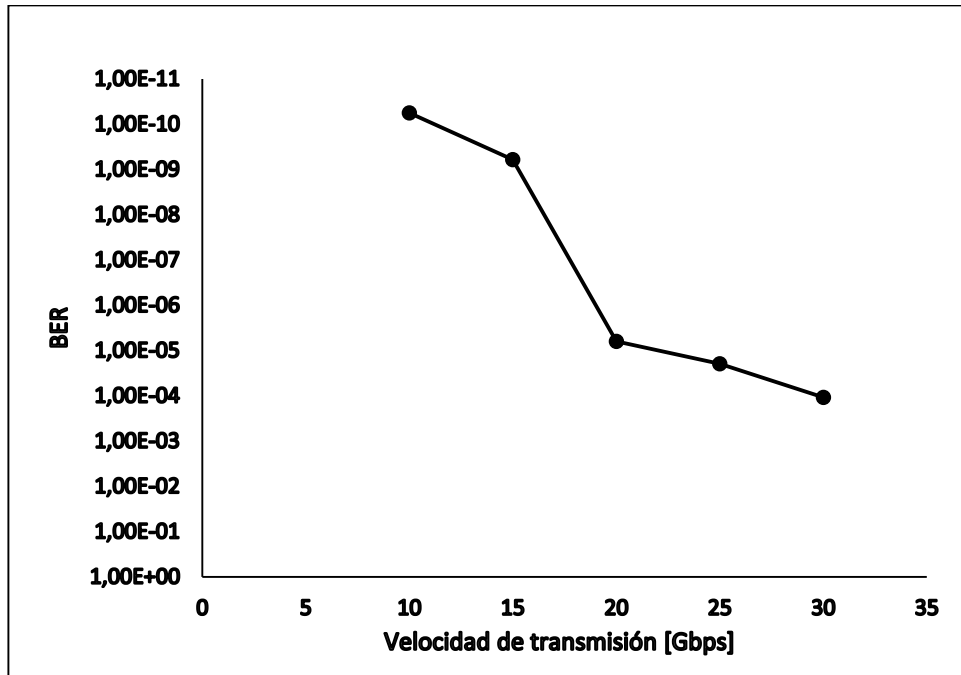


Figura 31. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM/TDM PON con influencia del efecto no lineal SBS para una potencia de entrada de 20 milivatios y una distancia de 20 km.

Fuente: creada por el autor

En la figura 32 el BER vs velocidad para la red WDM PON a 20 Km de distancia con una potencia de entrada de 20 milivatios el efecto SBS a 25 Gbps produce un BER mayor a 10^{-9} .

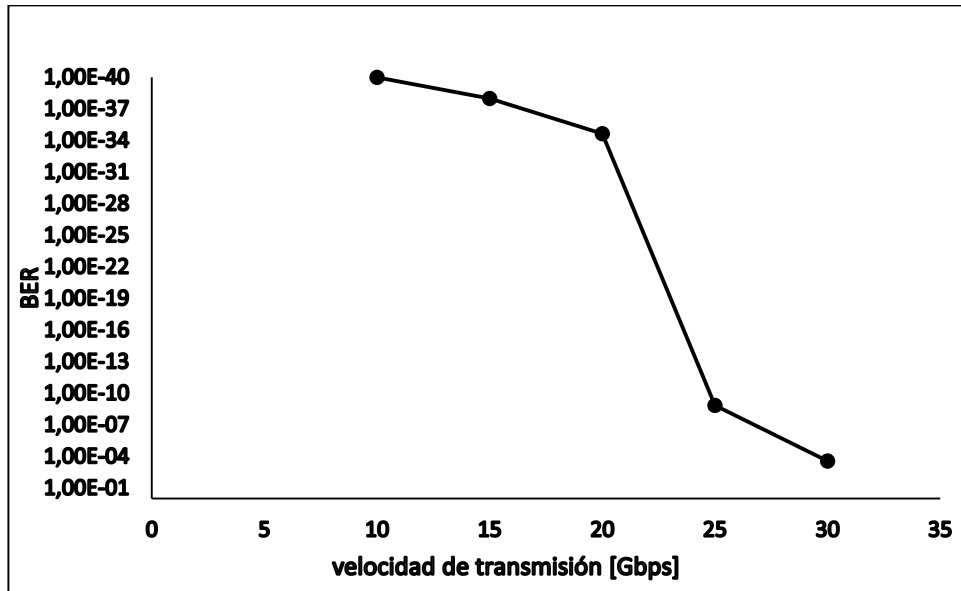


Figura 32. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM PON con influencia del efecto no lineal SBS para una potencia de entrada de 20 milivatios y una distancia de 20 km.

Fuente: creada por el autor

Se puede observar en la figura 33 la potencia recibida vs la distancia en la red WDM/TDM PON comparando el efecto no lineal SBS a velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps con una potencia de entrada de 20 milivatios a 20 km de distancia. La potencia recibida a 60 km es el 25% de la potencia transmitida.

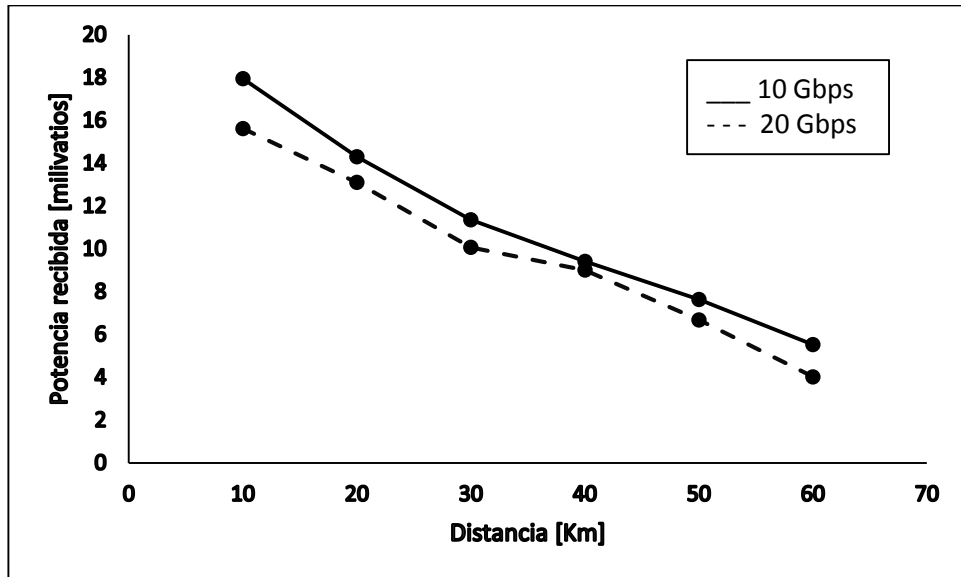


Figura 33. Potencia recibida vs distancia para la red WDM/TDM PON con influencia del efecto no lineal SBS a 20 km de distancia con velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps y una potencia de entrada 20 milivatios.

Fuente: creada por el autor

En la figura 34 se observa la gráfica de la potencia recibida vs la distancia para la red WDM PON influenciada por el efecto SBS a velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps con una potencia de entrada de 20 milivatios a 20 km de distancia. A una distancia de 60 km la potencia recibida es la mitad de la potencia transmitida.

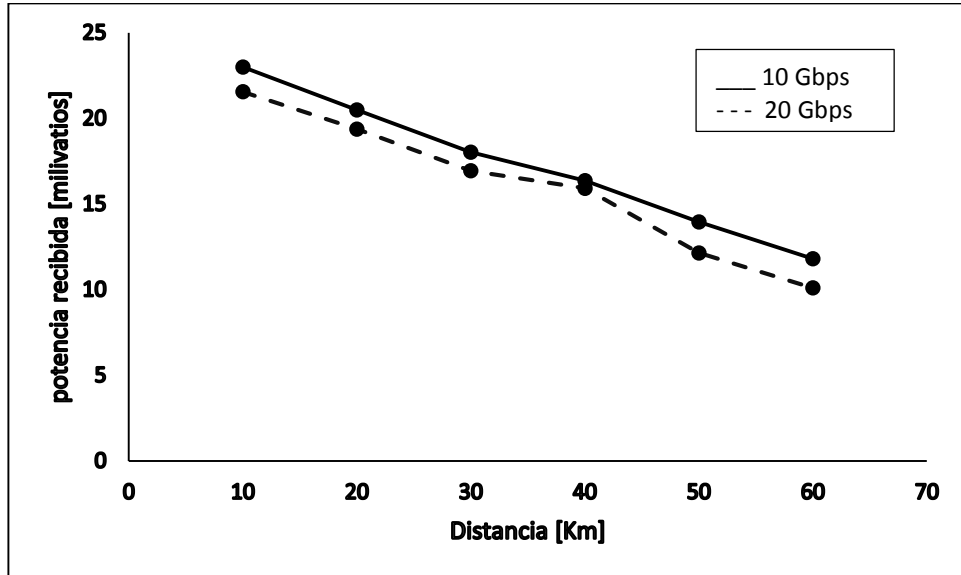


Figura 34. Potencia recibida vs distancia para la red WDM PON con influencia del efecto no lineal SBS a 20 km de distancia con velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps con una potencia de entrada 20 milivatios.

Fuente: creada por el autor

3.4. Efecto Modulación de fase cruzada (XPM)

A continuación se analiza el efecto no lineal XPM en la red WDM/TDM-PON y en la red WDM/PON.

En la figura 35 se observa el BER vs la distancia con el efecto no lineal XPM a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps para la red WDM/TDM PON con una potencia de entrada de 10 milivatios y una dispersión de la fibra de 10 ps/nm/km. Para una distancia mayor a los 30 km y una velocidad de transmisión de 20 Gbps el BER es mayor a 10^{-9} .

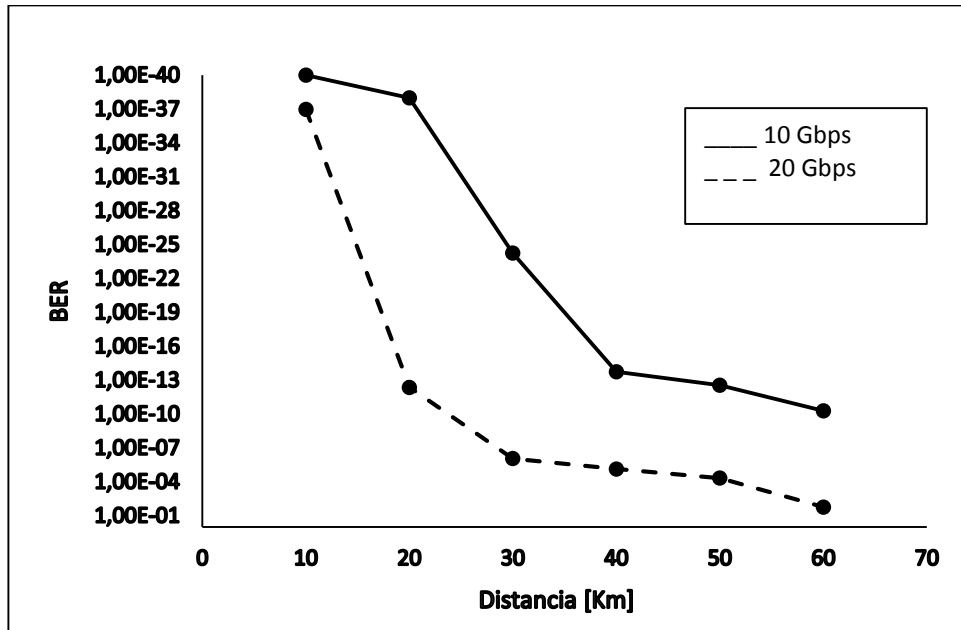


Figura 35. Comparación del BER vs distancia para velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps para la red WDM/TDM PON con la influencia del efecto no lineal XPM con una potencia de entrada de 10 milivatios y una dispersión de 10 ps/nm/km.

Fuente: creada por el autor

En la figura 36 se observa el BER vs distancia con el efecto no lineal XPM comparando la respuesta de la red WDM/PON a velocidades de trasmisión de 10 y 20 Gbps con un factor de dispersión de 10 ps/nm/km. Este efecto desde los 40 Km y una velocidad de transmisión de 20 Gbps provoca un BER mayor a lo aceptado en una red óptica.

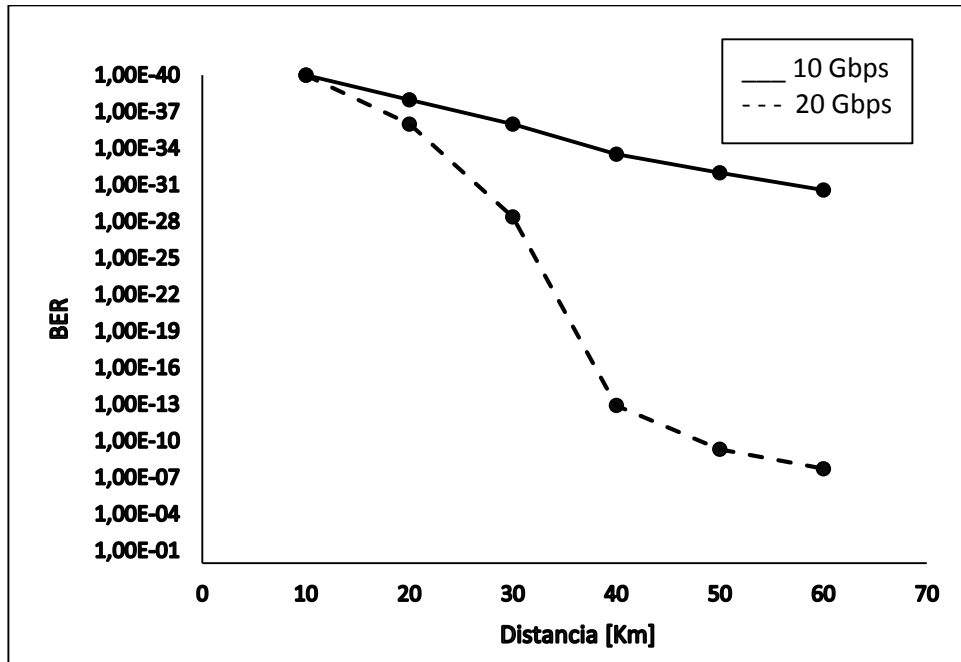


Figura 36. Comparación del BER vs distancia para velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps para la red WDM PON con la influencia del efecto no lineal XPM con una potencia de entrada de 10 milivatios y una dispersión de 10 ps/nm/km.

Fuente: creada por el autor

En la figura 37 se observa como el efecto no lineal XPM afecta a la red WDM/TDM PON con una potencia de entrada de 10 milivatios, un factor de dispersión de 10 ps/nm/km a 20 km de distancia, para una velocidad de transmisión a 25 Gbps el BER es de 9.32×10^{-5} .

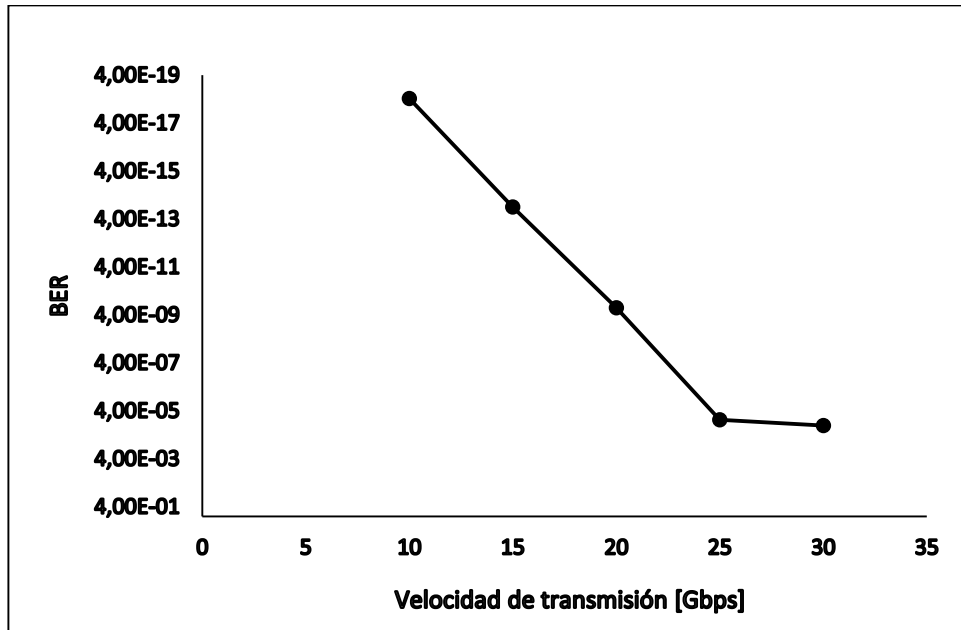


Figura 37. Comparación del BER vs velocidades de transmisión para la red WDM/TDM PON con la influencia del efecto no lineal XPM con una potencia de entrada de 10 milivatios y 20 Km de distancia.

Fuente: creada por el autor

En la figura 38 se puede observar la gráfica del BER vs velocidad de transmisión para la red WDM PON a una distancia de 20 Km, con un factor de dispersión de 10 ps/nm/km y 10 milivatios de potencia de entrada. En esta red el efecto XPM produce valores de BER menores al valor de 10^{-9} en el enlace óptico.

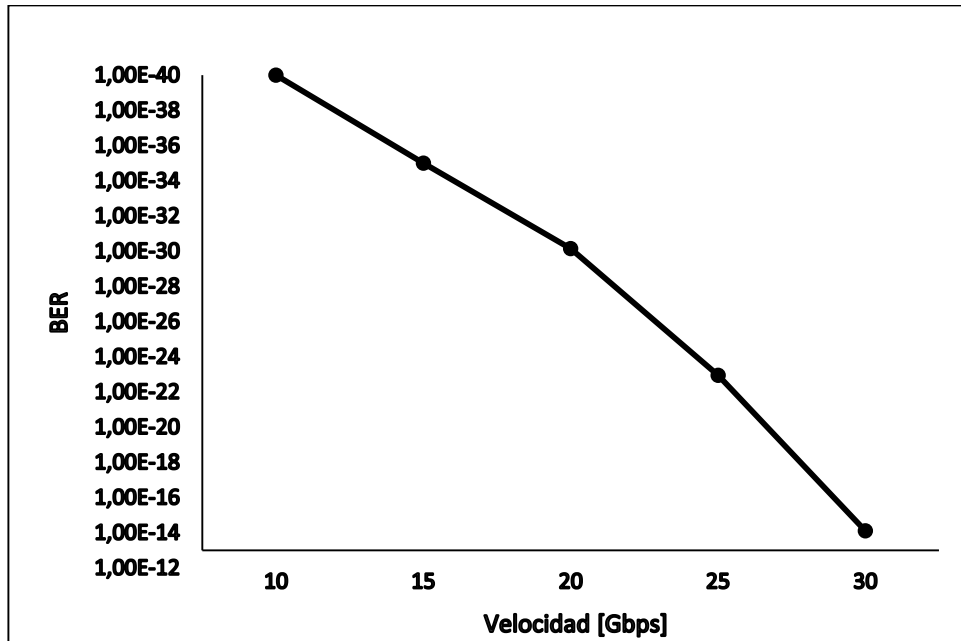


Figura 38. Comparación del BER vs velocidades de transmisión para la red WDM PON con la influencia del efecto no lineal XPM con una potencia de entrada de 10 milivatios y 20 km de distancia.

Fuente: creada por el autor.

En la figura 39 se observa la potencia recibida vs distancia para la red WDM/TDM PON a velocidades de transmisión 10 y 20 Gbps con el efecto no lineal XPM, con 30 milivatios de potencia de entrada y un factor de dispersión de 10 ps/km/nm. A una velocidad de trasmisión de 10 Gbps y a una distancia de 60 km la potencia recibida es la mitad de la potencia transmitida, mientras a 20 Gbps con la misma distancia la potencia recibida es la sexta parte de la potencia transmitida.

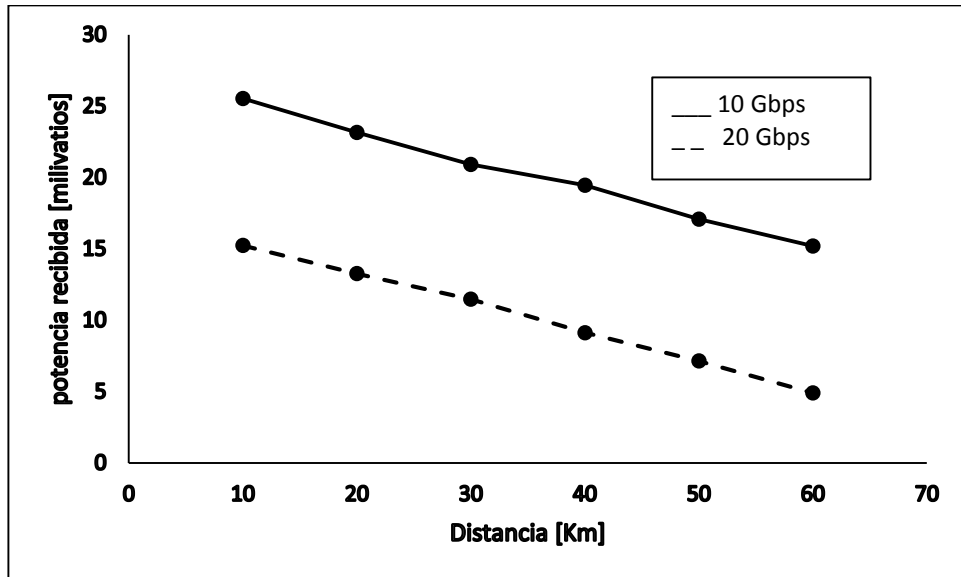


Figura 39. Potencia recibida vs distancia para la red WDM/TDM PON con influencia del efecto no lineal XPM a 20 km de distancia con velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps con una potencia de entrada 10 milivatios.

Fuente: creada por el autor

En la figura 40 se puede observar la comparación de las curvas de la potencia recibida y la distancia para velocidades de 10 Gbps y 20 Gbps con el efecto no lineal XPM para la red WDM PON con 30 milivatios de potencia de entrada. La potencia recibida es un tercio de la potencia transmitida a 60 Km y 10 Gbps, para 20 Gbps y la misma distancia la potencia recibida es casi la cuarta parte de la potencia transmitida.

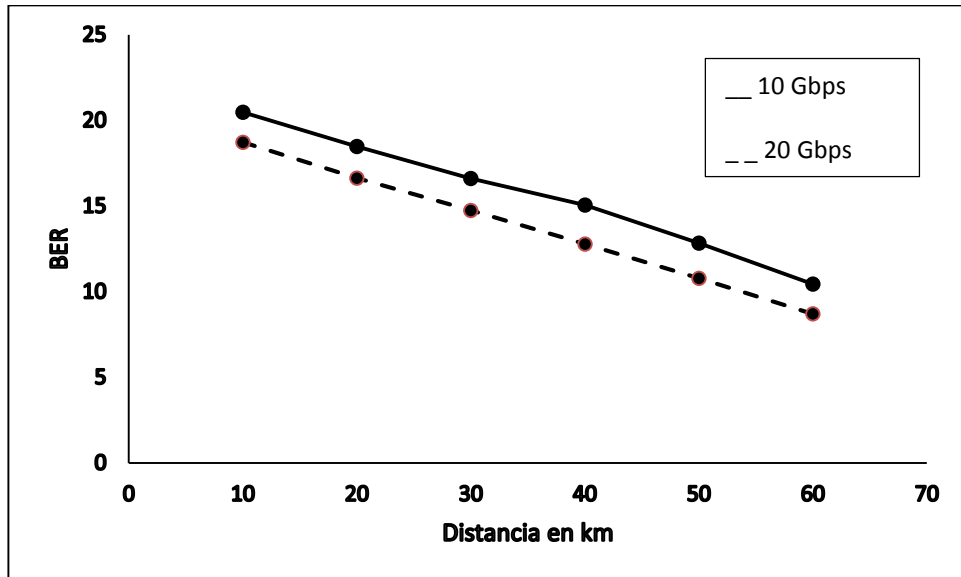


Figura 40. Potencia recibida vs distancia para la red WDM/TDM PON con influencia del efecto no lineal XPM a 20 km de distancia con velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps y una potencia de entrada 10 milivatios.

Fuente: creado por el autor

3.4. Efecto mezclado de las cuatro ondas (FWM)

Para simular el efecto de las cuatro ondas en el bloque transmisor TDM se incluyó un circuito [18] que simule una modulación con portadora suprimida creando el efecto de una señal óptica con la frecuencia de la suma de las tres ondas de longitud de onda superior, los componentes incluidos se pueden ver en la figura 41.

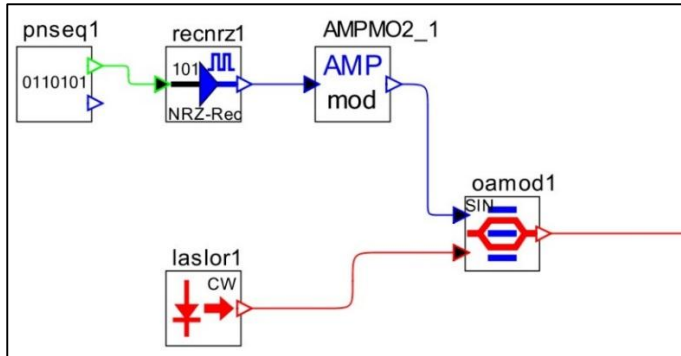


Figura 41. Circuito óptico simulación FWM

Fuente: creada por el autor

Este circuito óptico está conformado por un generador de impulso cuya señal ingresa al modulador AM, y una fuente óptica continua que se modula con el modulador match Zener, generando una señal óptica similar al efecto FWM.

En la figura 42 se puede observar el BER vs la distancia para la red WDM/TDM PON para una velocidad de trasmisión de 10 Gbps y 20 Gbps; este caso el efecto no lineal FWM impide la comunicación óptica.

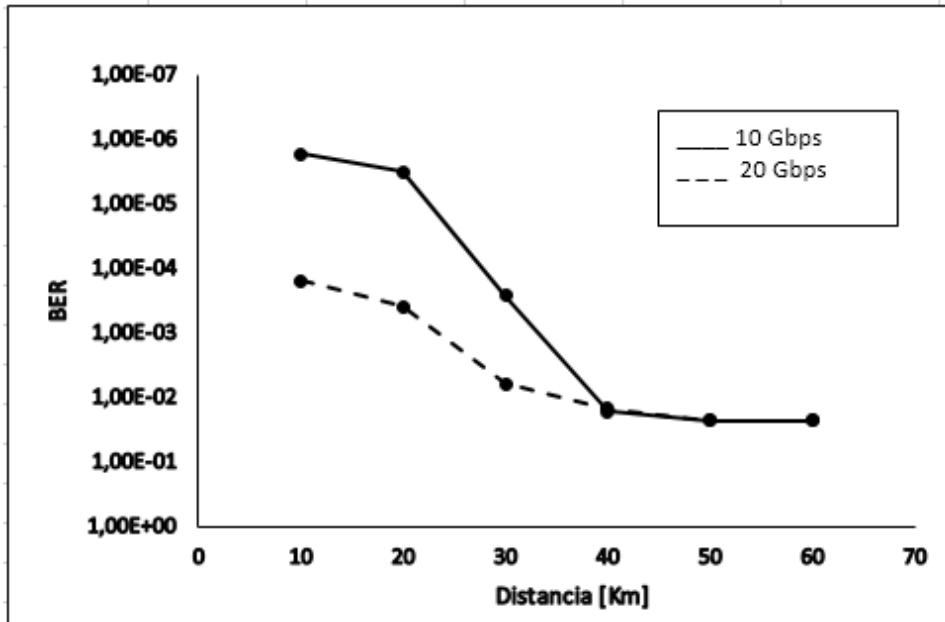


Figura 42. Comparación BER vs distancia para la red WDM/TDM PON a velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps con el efecto no lineal FWM y una potencia de entrada de 1 milivatio.

Fuente: creada por el autor

En la figura 43 se compara las curvas de BER vs distancia para la red WDM PON a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps afectado por el efecto no lineal FWM. A partir de 20 km y una velocidad de transmisión de 20 Gbps el BER es superior al mínimo permitido en un enlace óptico

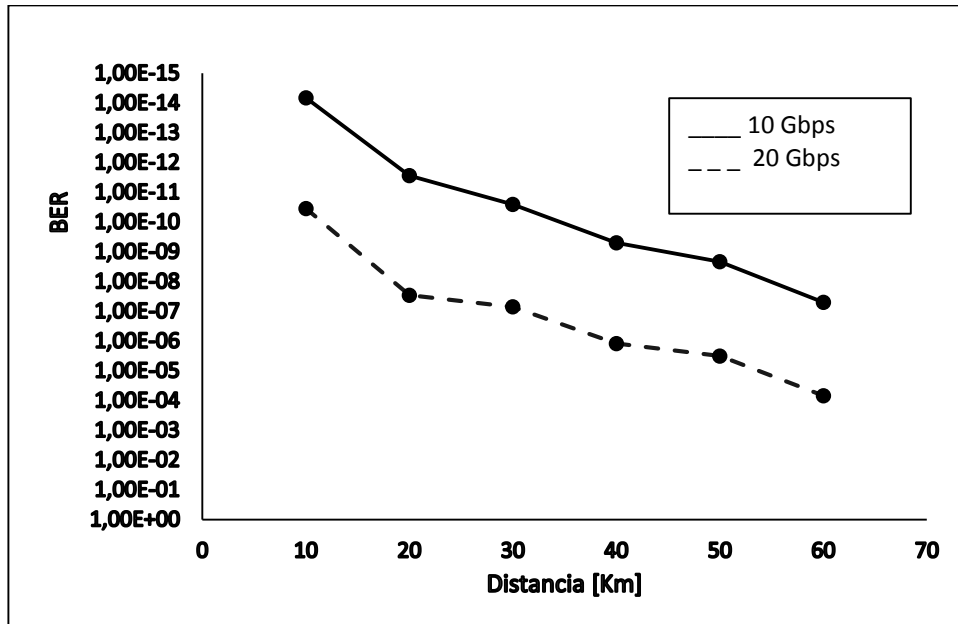


Figura 43. Comparación BER vs distancia para la red WDM PON a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps con el efecto no lineal FWM y una potencia de entrada de 1 milivatio.

Fuente: creada por el autor

En la figura 44 se observa como el efecto no lineal FWM afecta a la curva BER vs velocidad de transmisión para la red WDM/TDM PON a una distancia de 20 km. En este caso los datos una tasa de error de bit mayor a 10^{-9} .

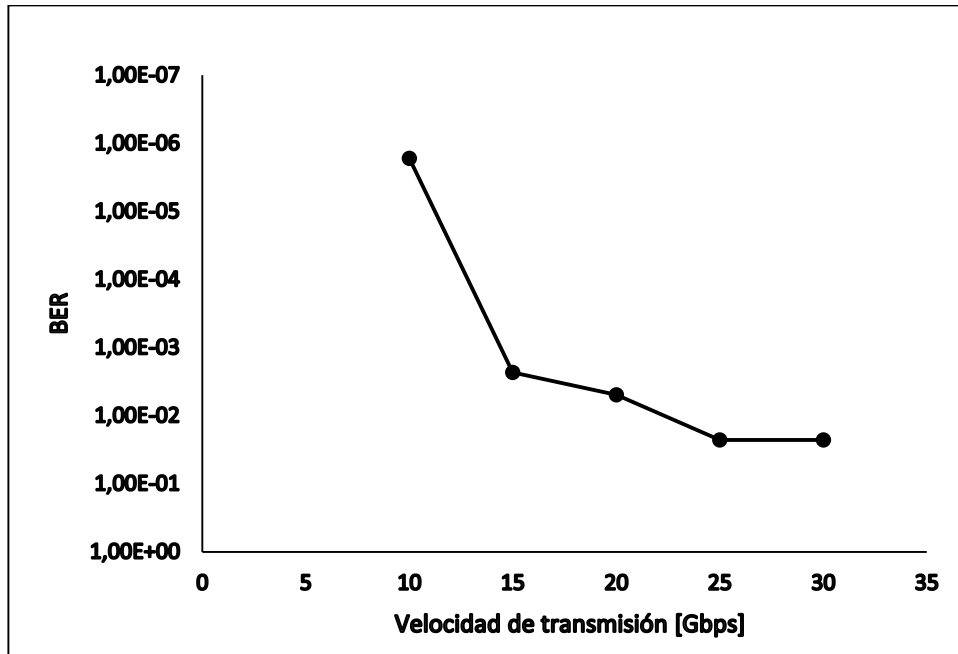


Figura 44. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM/TDM PON a una distancia de 20 km con el efecto no lineal FWM con una potencia de entrada de 1 milivatio.

Fuente: creada por el autor

En la figura 45 se observa la gráfica BER vs velocidad de transmisión para la red WDM PON con la influencia del efecto no lineal FWM para una distancia de 20 km. A partir de una velocidad de transmisión superior a 20 Gbps se obtiene un BER mayor a 10^{-9} .

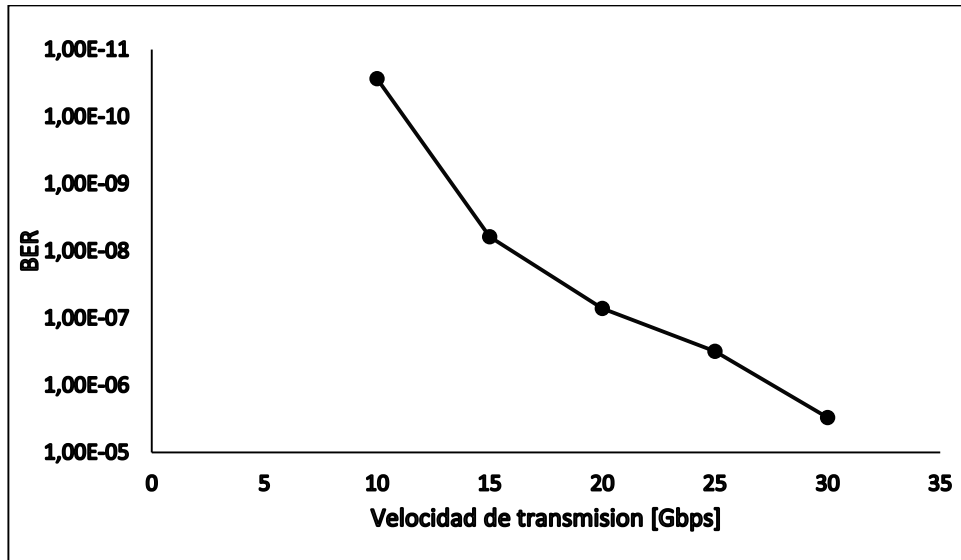


Figura 45. BER vs velocidad de transmisión para la red WDM PON a una distancia de 20 km con el efecto no lineal FWM con una potencia de entrada de 1 milivatio.

Fuente: creada por el autor

En la figura 46 se observa la gráfica de la potencia recibida vs la distancia para la red WDM/TDM PON con el efecto FWM a una velocidad de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps con 1 milivatio de potencia de entrada. La potencia a 60 km es cercana a 0 milivatios a 10 Gbps y 20 Gbps.

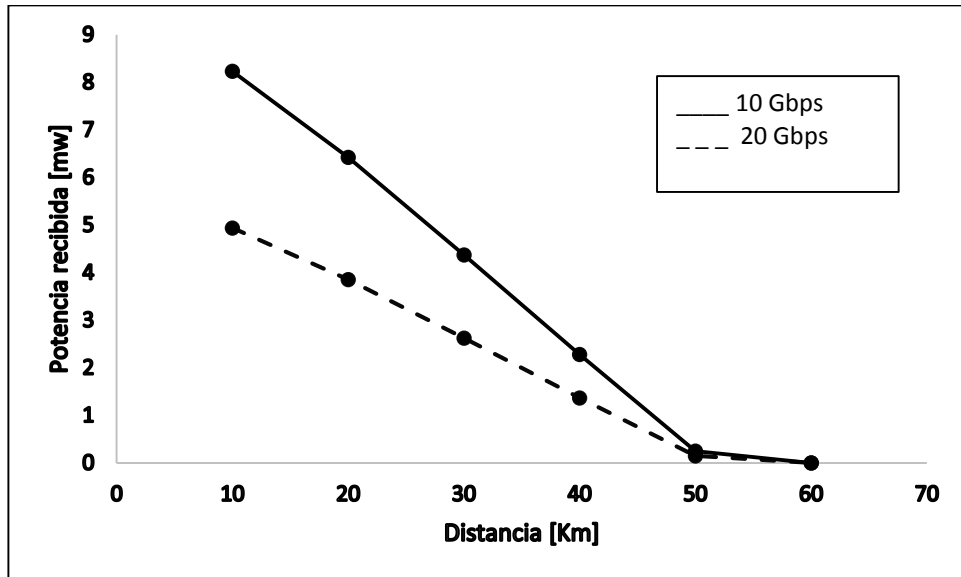


Figura 46. Potencia recibida vs distancia para la red WDM/TDM PON con efecto no lineal FWM a una velocidad de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps a una potencia de entrada de 1 milivatio.

Fuente: creada por el autor

En la figura 47 se observa la gráfica de la potencia recibida vs la distancia para la red WDM PON a 1 milivatio de potencia de entrada, velocidad de transmisión de 20 Gbps, a una distancia de 20 km. En este caso no se atenúa la potencia de salida con una potencia de entrada de 1 milivatio.

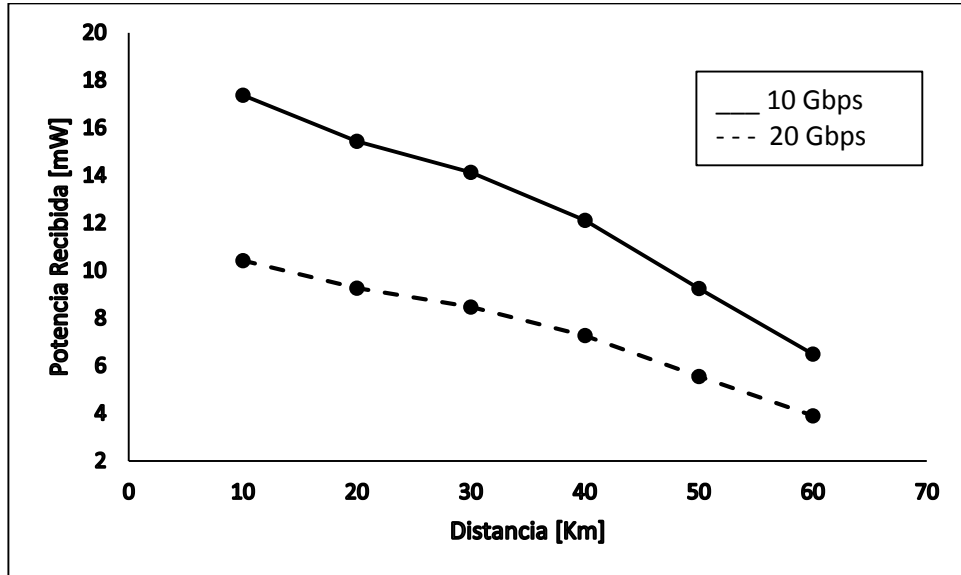


Figura 47. Potencia recibida vs distancia para la red WDM PON con efecto no lineal FWM a una velocidad de transmisión de 10 Gbps y una potencia de entrada de 1 milivatio.

Fuente: creada por el autor

3.5. Espectro de la red óptica

En la figura 48 se puede observar el espectro de la red que ingresan a la fibra óptica, se observa los dos canales ITU.

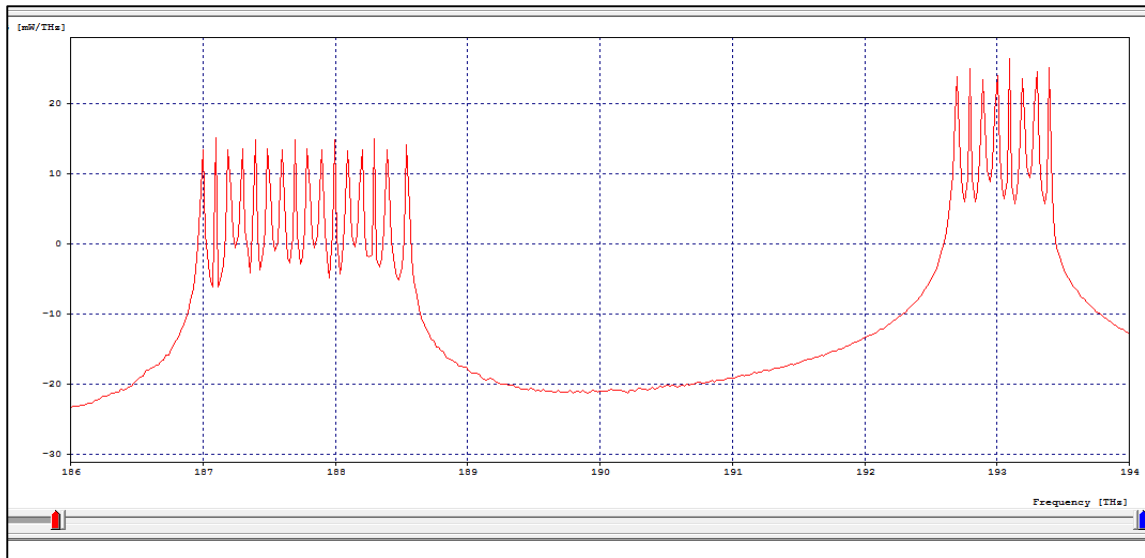


Figura 48. Grupo de longitudes de onda que ingresan a la fibra óptica

Fuente: creada por el autor

En la figura 49 se puede observar el espectro luego de la fibra óptica sin efectos no lineales.

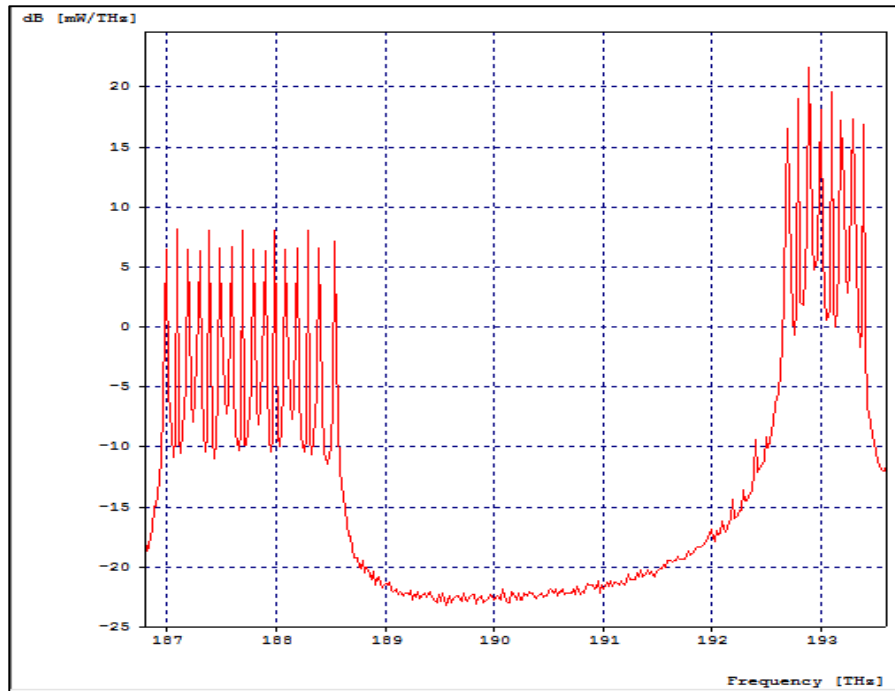


Figura 49. Espectro óptico sin efectos no lineales

Fuente: creada por el autor

En la figura 50 se puede observar el espectro óptico a la salida de la fibra óptica y el grating con el efecto no lineal SRS, como se puede observar tiene un mayor efecto sobre las longitudes de onda de los extremos.

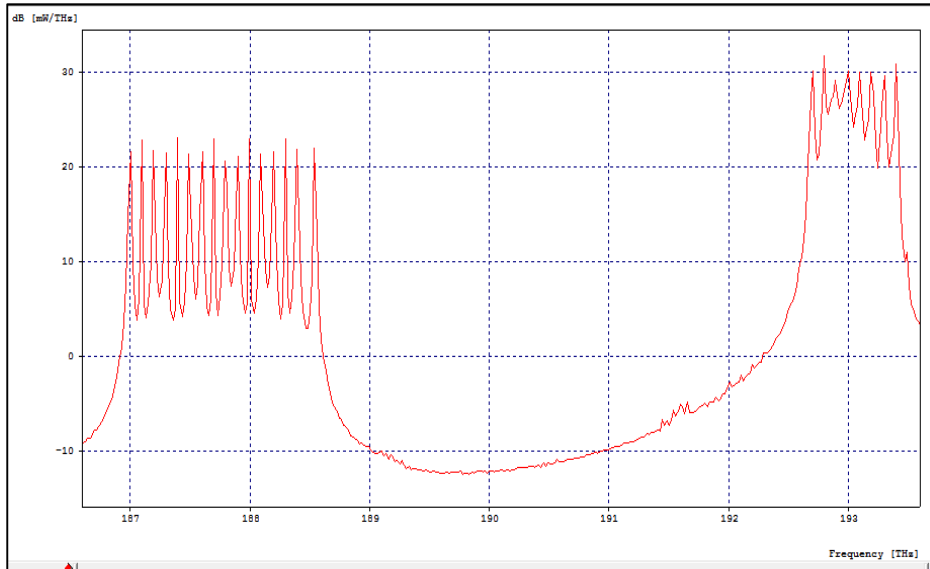


Figura 50. Espectro óptico con efecto no lineal SRS

Fuente: creada por el autor

En la figura 51 se puede observar el espectro óptico a la salida de la fibra óptica y la fibra grating con el efecto no lineal SBS, este efecto presente mayor ruido en la fibra.

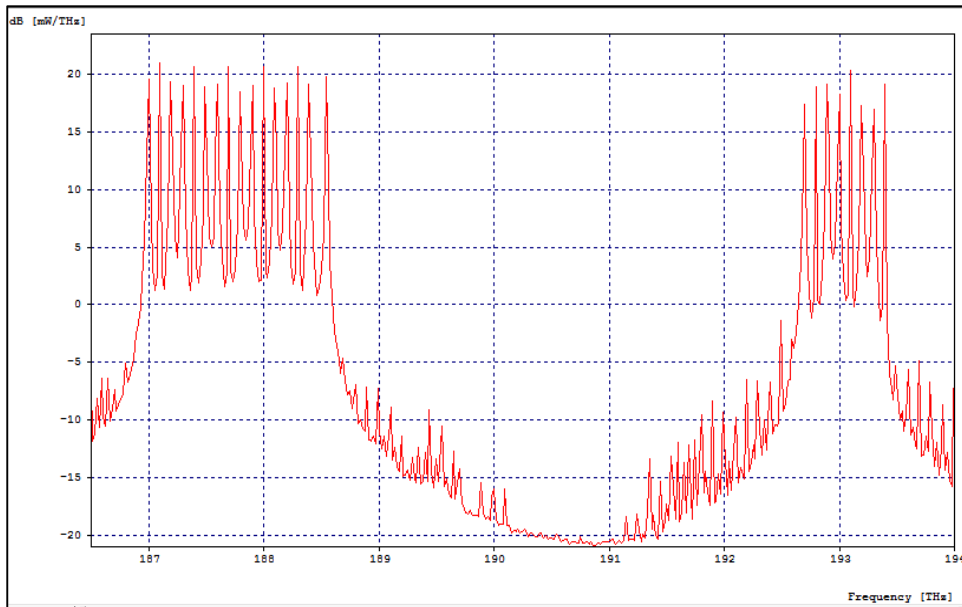


Figura 51. Espectro óptico con efecto no lineal SBS

Fuente: creada por el autor

En la figura 52 se puede observar el espectro óptico a la salida de la fibra óptica y la fibra grating con el efecto no lineal XPM.

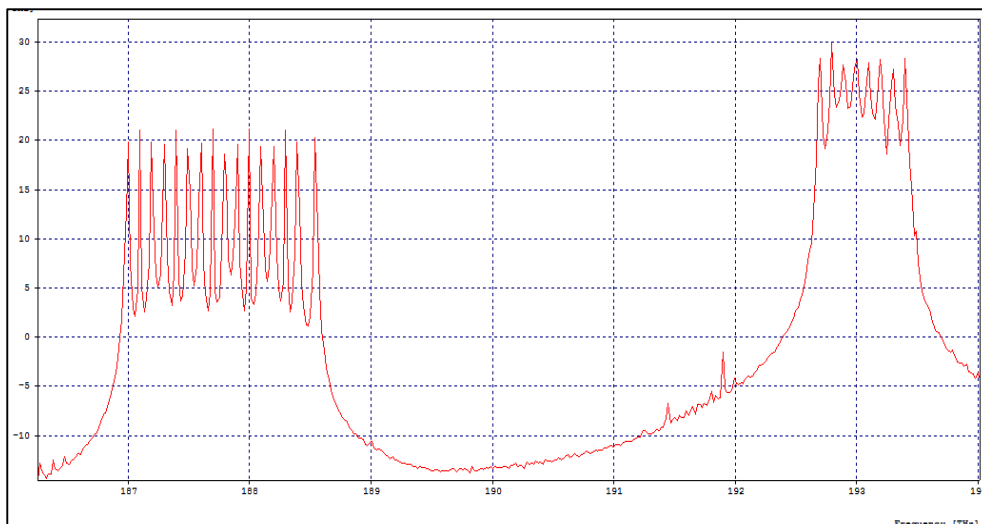


Figura 52. Espectro óptico con efecto no lineal XPM

Fuente: creada por el autor

En la figura 53 se puede observar el espectro óptico a la salida de la fibra óptica con el efecto no lineal FWM. Se observa el efecto en la señal con frecuencia más alta de cada grupo.

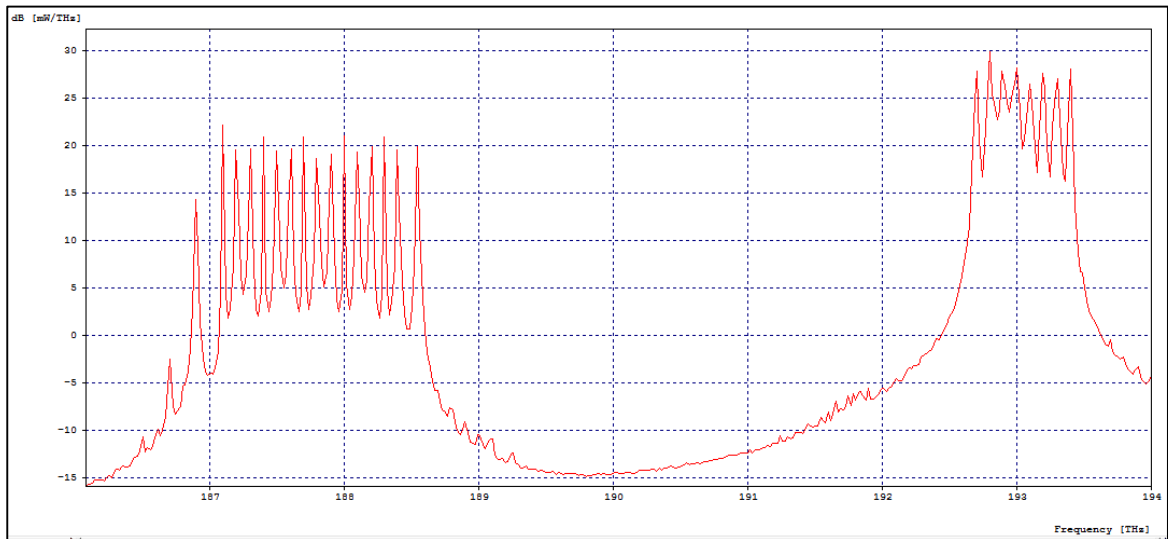


Figura 53. Espectro óptico con el efecto no lineal FWM

Fuente: creada por el autor

3.6. Análisis de Resultados

Sin efectos no lineales

El BER en la red WDM/TDM PON sin la presencia de efectos no lineales presenta un decrecimiento exponencial, para la velocidad de transmisión de 10 Gbps se puede llegar a distancias mayores de 60 Km. Con un BER aceptable, para la velocidad de transmisión de esta red a 20 Gbps se puede transmitir datos hasta los 50 Km. La máxima velocidad de transmisión para la red WDM/TDM PON es de 20 Gbps con un BER de 5.58×10^{-9} . La potencia de la red WDM/TDM PON para velocidades de 10 Gbps y 20 Gbps tiene un decrecimiento exponencial. Con

una potencia en el transmisor de 0.5 milivatios, la potencia recibida puede ser detectada hasta los 60 Km, pero a partir de los 20 Km de distancia se necesitaría receptores con umbrales más sensibles.

En la red WDM PON sin efectos no lineales se puede transmitir datos con un BER superior a 10^{-9} tanto a 10 Gbps como a 20 Gbps. Se puede incrementar la velocidad de transmisión hasta 30 Gbps en la red simulada, luego de esto el BER es mayor al que es permitido en un enlace óptico, y la potencia decrece exponencialmente en esta red y para distancias superiores a 50 Km el umbral de sensibilidad en el receptor debe ser más alto.

Análisis efecto SRS

La potencia transmitida por el diodo laser es de 30 milivatios, con valores menores de potencia en el transmisor no se observó ningún efecto, al comparar en la red WDM/TDM PON el BER y la distancia, para velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps, a partir de los 20 Km el BER es superior al valor mínimo indicado para redes ópticas. La velocidad de transmisión máxima en esta red es de 10 Gbps, debido a que a velocidades de 15 Gbps o mayores el BER comienza a incrementarse rápidamente. La comparación de la potencia recibida por el receptor óptico para velocidades de 10 Gbps y 20 Gbps muestra cómo va decreciendo con la distancia y a 50 Km llega a ser la mitad de la potencia transmitida.

En la red WDM PON la potencia transmitida también fue de 30 milivatios en donde se presentó el efecto no lineal, en este caso al comparar el BER con la distancia a velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps, el efecto no lineal se presenta a una distancia de 60 Km. A una distancia de 20 km de enlace óptico a partir de los 30 Gbps se presenta un BER de $4,7 \times 10^{-4}$. En cuanto a la potencia y la distancia en este caso hay una menor atenuación de la potencia con respecto a la red WDM/TDM PON, incluso a 60 Km se llega a recibir alrededor de 18 milivatios.

Análisis efecto SBS

Al simular el efecto no lineal SBS este comenzó a presentarse a 20 milivatios de potencia transmitida por el transmisor óptico, al comparar el BER vs la distancia para velocidades de 10 Gbps y 20 Gbps en la red WDM/TDM PON, en el primer caso a 50 Km se obtiene un BER entorno a los 10^{-7} , en cambio en el segundo caso a 20 Km se tiene un BER cercano a los 10^{-6} ; al analizar a 20 Kilómetros de enlace óptico el BER a una velocidad de transmisión de 20 Gbps es superior al valor recomendado. En cuanto a la potencia que recibe el receptor óptico con respecto a la distancia hay un decrecimiento un poco mayor en el caso de la red de 20 Gbps y a 60 km de distancia que es de 4 milivatios, en la red de 10 Gbps el valor mínimo a 60 Km de distancia es de 5 milivatios.

En la red WDM PON comparando para velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps, el BER está bajo lo recomendado a una distancia de 60 Km para ambos

casos. Si se compara el BER vs la velocidad de transmisión a 20 km se obtuvo un valor de 2.79×10^{-4} . Al comparar para 10 Gbps y 20 Gbps la potencia recibida por el receptor óptico en la red WDM PON, en el primer caso la potencia a 60 km es de 10 milivatios, y en el segundo caso la potencia es de 12 milivatios.

Análisis efecto XPM

En la red WDM/TDM PON el efecto no lineal XPM, el peor caso fue con una dispersión de 10 ps/nm/km, el cual se analiza para un velocidades de transmisión de 10 Gbps y 20 Gbps; en el primer caso el BER vs la distancia permite transmitir datos en la red de fibra óptica, en el segundo caso a partir de 30 km el BER es mayor a 10^{-9} . El BER es mayor al valor aceptable del enlace óptico hasta 20 Gbps. La potencia transmitida es de 10 milivatios y la influencia sobre la potencia no es tan significativa como en el efecto no lineal SBS, aunque para distancias de 60 km la potencia recibida en el receptor óptico es de 15 milivatios para una velocidad de transmisión de 10 Gbps y de 5 milivatios para una velocidad de transmisión de 20 Gbps.

En la red WDM PON con una dispersión de 10 ps/nm/km y 10 milivatios de potencia en el transmisor se comprobó el efecto no lineal XPM. Al comparar el BER y la distancia para una velocidad de transmisión de 10 Gbps el efecto XPM no provoco valores de BER menores a 10^{-9} , para una velocidad de transmisión de 20 Gbps a partir de los 60 Km se presenta un BER cercano a 10^{-8} . Aunque el efecto no lineal está presente, el BER hasta una velocidad de transmisión de 30

Gbps y 20 km de distancia no afecta la comunicación óptica. En este caso la potencia recibida en la red WDM PON para una velocidad de transmisión de 10 Gbps y 60 km es de 10 milivatios, y para una velocidad de transmisión de 20 Gbps y 60 km es de 8 milivatios.

Análisis efecto FWM

Al comparar el efecto no lineal FWM en la red WDM/TDM PON para velocidades de 10 Gbps y 20 Gbps con respecto al BER y la distancia, el BER es superior a 10^{-6} . De igual forma el BER supera los valores ya indicados cuando se analiza este parámetro con respecto a la velocidad de transmisión a 20 km. La potencia recibida decrece, a distancias superiores a los 60 km se obtiene una potencia recibida cercana a 0 milivatio, se utilizó una potencia en el transmisor óptico de 1 milivatio.

En la red WDM PON para velocidades de 10 Gbps y 20 Gbps al analizar el BER contra la distancia, en el primer caso a una distancia de 60 km se tiene un BER de 5×10^{-8} y en el segundo caso a 20 km el BER es de 3×10^{-8} . En el caso del BER vs la velocidad de transmisión a 20 km solo se puede transmitir hasta 15 Gbps. La potencia recibida decrece con la distancia y llega a un valor de 5 milivatios a velocidades de transmisión de 20 Gbps, se utilizó una potencia en el transmisor óptico de 1 milivatio.

3.6.1. Consideraciones para la implementación en el Ecuador

Para implementar redes TDM/WDM PON en el Ecuador se tiene como ventaja que se podría llegar a un mayor número de usuarios que solo utilizando las redes TDM PON de nueva generación. Este es un paso que permite llegar a brindar mayores servicios como juegos en línea, televisión de alta definición, telepresencia, teleducación. Sin embargo luego de las simulaciones realizadas se encuentra que se provocan pérdidas de potencia en específico por los efectos SBS y FWM. En el caso del efecto SBS el efecto aparece a los 20 milivatios esto quiere decir que se pueden utilizar equipos cuya potencia de trasmisión sea menor a los 20 milivatios. En el caso del efecto FWM no es tan preocupante porque aunque se presenta a 1 milivatio, esto ocurre porque en la simulación se utilizó una frecuencia idéntica a la frecuencia del siguiente canal DWDM esto quiere decir que por ejemplo si se utiliza la frecuencia 192.6 THz y el efecto FWM genera una frecuencia de 192.6 THz el resultado es destructivo, pero los equipos actuales DWDM tiene la guarda de frecuencia de 100 GHz con lo cual se minimizaría la presencia de este efecto. En caso de presentarse el efecto FWM se debería enviar los datos con una guarda de 0.2 Terahertz de esta manera se evitaría que la cuarta onda destruya los datos enviados por la frecuencia del canal WDM,

Las potencias de los equipos deben trasmitan a valores menores de 20 milivatios o 10 dBm porque el efecto SBS se presenta a potencias mayores a este valor.

En el caso de las distancias mayores a 50 Km, la primera solución es mantener una velocidad de 10 Gbps y usar transmisores con una potencia menor a 20 milivatios utilizando la arquitectura analizada en la tesis; la segunda solución es incorporar el uso de amplificadores ópticos para compensar la pérdida por la distancia y se puede llegar a más de 100 km de distancia [19].

4. Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones:

Se concluye que en una red WDM/PON las pérdidas de potencia y el incremento del BER debido a efectos no lineales, son menores que la red WDM/TDM-PON, guardando la tendencia de que a mayor distancia existen mayores pérdidas de potencia y se incrementa el BER.

Se concluye que el fenómeno SBS tiene mayor efecto sobre la potencia que el efecto SRS. A partir de los 20 Km de distancia de enlace de fibra, con una potencia de 20 milivatios en la red WDM/TDM-PON, con velocidad de transmisión de 20 Gbps, aunque el BER sigue siendo aceptable para transmitir datos.

Se concluye al respecto del efecto XPM, que al variar el factor de dispersión de la fibra desde 1 ps/Km nm hasta 17 ps/Km nm, se evidenció que el efecto no lineal se muestra relevante a una dispersión de 10 ps/Km nm, a 20 Gbps, y con de potencia de entrada mayor o igual a 10 milivatios.

Se concluye que el efecto FWM es el más destructivo, dado que en la red WDM/TDM-PON se presenta a 10 Gbps con valores de BER de 10^{-4} para una potencia de transmisión de 1 milivatio. En la red WDM-PON de igual forma presenta valores inaceptables de BER, de alrededor de 10^{-6} a una velocidad de trasmisión de 10 Gbps, con una potencia de entrada de apenas 1 milivatios, la máxima distancia antes que en ambas redes ópticas comience a presentarse el efecto es de 10 km.

Recomendaciones

Se recomienda simular los efectos no lineales en el modo bloque del simulador Optsim, que tiene la ventaja de ser más rápido, analizando la arquitectura propuesta pero incrementado los grupos de transmisión de longitud de onda ITU, y analizar cómo afectaría que se envíen datos para 64 usuarios para apreciar como varia el efecto no lineal con respecto a la potencia y el BER en esta arquitectura más compleja.

Se recomienda para evitar los efectos no lineales en las redes TDM/WDM-PON y en las redes WDM/PON el uso de transmisores de baja potencia (menores a 10 milivatios), esto conllevaría a que el receptor tenga mayor sensibilidad pero se asegura que el efecto no lineal no afecte la trasmisión de datos.

Se recomienda analizar el efecto no lineal pero en específico el SBS y el FWM en las capas superiores de una red óptica a nivel de capa enlace y capa red para determinar el grado de efecto que tiene sobre la trasmisión de datos.

Se recomienda para evitar las pérdidas debidas a los efectos no lineales SBS y FWM utilizar potencias menores 20 milivatios y velocidades de transmisión menores a 20 Gbps, así como utilizar guardas de 0.2 Terhertz en caso de presentarse el efecto del mezclado de las cuatro ondas.

Se recomienda para alcanzar distancias mayores a 50 km utilizar amplificadores ópticos en los enlaces de fibra óptica, para disminuir las pérdidas de potencia.

Referencias Bibliográficas

- [1] Abril Evaristo, «no linealidades en la fibra óptica,» 2011. [En línea]. Available: http://delibes.tel.uva.es/tutorial/Tema_I/No_lineal/No_lineal.html. [Último acceso: 10 octubre 2013].
- [2] L. Zhou, X. Cheng, Y.-K. Yeo y L. H. Ngoh, «Hybrid WDM-TDM PON architectures and DWBA algorithms,» *Communications and Networking in China (CHINACOM), 2010 5th International ICST Conference on*, pp. 25-27, 2010.
- [3] C. H. Camelo Miguel, «Asociacion Colombiana de ingenieros en Sistemas,» 2011. [En línea]. Available: http://www.acis.org.co/fileadmin/Revista_108/dos.pdf. [Último acceso: 10 octubre 2013].
- [4] J. Ganuza y K. Perca, «Las Redes de Nueva Generación: ¿un nuevo modelo para las telecomunicaciones en España?,» *Fedea*, p. 24, 2011.
- [5] UIT-T y Y-2001, «UIT-T vision general de las redes de nueva generacion,» 2001. [En línea]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2001-200412-1/es>. [Último acceso: 12 11 2013].
- [6] J. Zhang y N. Ansari, «Communications Magazine IEEE 2009,» *Topics in optical Communications*, 2009.
- [7] ITU-T y G.984.6, G.984.6, ITU, 2008.
- [8] J. Z. Nirwan Ansari, *Media Access Control and Resource Allocation for next generation optical passive networks*, New York: Springer, 2013.
- [9] G. P. D. T. Talli, «Hybrid DWDM–TDM Long-Reach PON for Next-Generation Optical Access,» *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 24, NO. 7*, pp. 2827-2834, 2006.
- [10] Y. Shachaf, C. H. Chang, P. Kourtessis y J. M. Senior, «Multi-PON access network using a coarse AWG for smooth migration from TDM to WDM PON,» *Opt.Express*, vol. 15, pp. 7840-7844, 2007.

- [11] S. M. L. K. O. a. C. H. L. S. G. Mun, «A multiple star WDM-PON using a band splitting WDM filter,» *Optics Express*, vol. 16, no. 9, p. 6260–6266, 2008.
- [12] S. G. Mun, S. M. Lee, K. Okamoto y a. C. H. Lee, «A multiple star WDM-PON using a band splitting WDM filter,» *Optics Express*, vol. 16, no. 9, pp. 6260-6266, 2008.
- [13] M. S. L. M. S. N. S. H. S. & A. S. M. Ahsan, Migration to the Next Generation Optical Access Networks Using Hybrid WDM/TDM-PON, 2011, pp. 18-25.
- [14] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communications Systems, John Wiley & Sons, 2002.
- [15] A. Ruffin, «Stimulated Brillouin Scattering: An Overview of Measurements, System Impairments, and Applications,» *Symposium of Optical Fiber Measurements, National Institute of Standards and Technology*, pp. 23-26, 2004.
- [16] R. Boyd, NonLinear Optics, San Diego: Academic Press, 1992.
- [17] J. Tang, Siew y Zhang, «Optical nonlinear effects on the performance of IP traffic over GMPLS-based DWDM networks,» *computer communications*, pp. 1330-1340, 2003.
- [18] J. P. A. Supe, «Comparison of Different FWM Realization Methods in optica fibre,» *ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING*, p. 50, 2011.
- [19] S. Huan, K. Byoung-Whi y M. Biswanath, «Long-Reach Optical Access Networks: A Survey of Research Challenges, Demonstrations, and Bandwidth Assignment Mechanisms,» *IEEE COMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 1*, p. 200, 2010.
- [20] ETSI, «Next Generation Networks,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/next-generation-networks>. [Último acceso: 12 11 2013].

- [21] J. P. a. S. D. W. C. Bock, «Hybrid WDM/TDM PON using the AWG FSR and featuring centralized light generation and dynamic bandwidth allocation,» *J. Lightw Technol.*, vol. 23, no. 12, , pp. 3981-3988, 2005.
- [22] H. Mukai, «Physical layer requirements for smooth migration from the current FTTH,» *Joint ITU-T/IEEE Workshop on Next Generation Optical Access Systems*, p. 15, 2008.
- [23] W. Jiang y H. Schulzrinne, «Analysis of On-Off Patterns in VoIP and Their Effect on Voice Traffic Aggregation,» *Computer Communications and Networks, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on* , pp. 82-87, 2000.
- [24] Alex Vukovic, Khaled Maamoun, Heng Hua, Michel Savoie, «Performance Characterization of PON Technologies,» the Broadband Applications and Optical Networking Group, Communications Research Centre (CRC), Ottawa , 2007.
- [25] Viviana S. Gutierrez, Diana M. Espinosa, Cesar A. Hernández, «IMPACTO Y MASIFICACIÓN DEL USO DE LAS REDES GPON EN COLOMBIA FRENTE A OTRAS TECNOLOGIAS,» Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” ., 2011.
- [26] Silvia Pato, Sergey Y. Ten, «Effect of nonlinearities in a 10 Gbit/s EPON system,» Universidad de coimbra, Coimbra, 2012.
- [27] I. Łašuks, «The Effect of Stimulated Brillouin Scattering on WDM-PON,» Riga Technical University, Lituania, 2010.
- [28] Chowdhury, R. Jaumard, B., «A cross layer optimization scheme for WDM PON network design and dimensioning,» CSE, Concordia Univ. Montreal, Montreal, 2012.
- [29] Sławomir Pietrzyk, Waldemar Szczesny, and Marian Marciniak, «Power penalty caused by Stimulated Raman Scattering in WDM Systems,» JOURNAL OF TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGY, Kielce, Poland, 1998.

- [30] M. I. F. A. A. S. S. Yasin M. Karfaa, «THEORETICAL EVALUATION OF NONLINEAR EFFECTS ON OPTICAL WDM NETWORKS WITH VARIOUS FIBER TYPES,» *IJUM Engineering Journal*, 2008.
- [31] J.-P. GALAUP, «Dispersiones Raman, Brillouin y Rayleigh Espectroscopía Raman,» Centre d'Orsay, ORSAY.
- [32] R. J. M. Tejedor, «Conectrónica nº 154, GM2 Publicaciones Técnicas,» 15 Noviembre 2012. [En línea]. Available: <http://www.ramonmillan.com/tutoriales/ngpon.php>.
- [33] G. P. AGRAWAL, *Fiber-Optic Communication Systems*, Rochester: NY: John Wiley & Sons, 2010, 2002.
- [34] Thomas T. Goldsmith Jr. y Estle Ray Mann, «Wikipedia,» 14 Octubre 2013. [En línea]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Simulaci%C3%B3n>.
- [35] Rejaul Chowdhury, Brigitte Jaumard, «A Cross Layer Optimization Scheme for WDM,» CSE, Concordia University, Montreal, 2012.
- [36] Benyang Chen, Chaoqin Gan, «Novel architecture of WDM-PON based on single-fiber ring topology featuring,» Shanghai University, Shanghai, 2011.
- [37] J. A. M. Pereda, *Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones*, Madrid: Prentice Hall, 2004.
- [38] K. M. H. H. M. S. Alex Vukovic, «Performance Characterization of PON Technologies».
- [39] D. M. K. H. T. M. Samia Sharmin Shimu, «Analysis of Self and Cross-Phase Modulation Effect in Optical WDM System with Dispersion Compensation,» 2005.
- [40] P. D. T. Giuseppe Talli, «Hybrid DWDM–TDM Long-Reach PON for Next-Generation Optical Access,» *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 2006.

- [41] J. P. S. D. W. Carlos Bock, «Hybrid WDM/TDM PON Using the AWG FSR and Featuring Centralized Light Generation and Dynamic Bandwidth Allocation,» *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 2005.
- [42] J. Pereda, *Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones*, Madrid: Prentice Hall, 2004.
- [43] Conectronica, «Conectronica,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.conectronica.com/Noticias-Visor-pincipal/Redes-de-fibra-%C3%B3ptica-NG-PON-Next-Generation-Passive-Optical-Network.html>. [Último acceso: 10 octubre 2013].
- [44] S. Huan, B. Klm y M. Biswanath, «Long-Reach Optical Access Networks: A Survey of Research Cahllenges, Demonstrations, and Bandwidth Assignment Mechanism,» *ATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, VOL. 1, p. 200, 2010.

GLOSARIO

Absorción: En una fibra óptica, la pérdida de potencia, producido porque se genera calor debido a la luz. Las causas incluyen impurezas, agua, defectos de la fibra.

Ancho de banda: Rango de frecuencias en donde no existe distorsión para transmitir datos en una fibra óptica. Se tiene como límite una frecuencia de corte a -3 dB causado por la dispersión en la fibra óptica.

Atenuación: Disminución de la amplitud de la señal óptica en el medio de transmisión. Se expresa generalmente en dB o dB por unidad de longitud. Para cada longitud de onda la fibra tiene una atenuación distinta.

AWG: Es una reja de guía de onda, sirven para multiplexar diferentes longitudes de onda en una fibra óptica.

BER: Es el número de bits recibidos correctamente sobre el número de bits transmitidos, para el caso de la fibra óptica máximo debe ser 10^{-9} .

BIT: un valor binario 1 o 0.

BPS: unidad de la velocidad de transmisión, bits por segundo

BYTE: formado por 8 bits.

dB: Es una medición logarítmica que relaciona la potencia recibida con respecto a la potencia transmitida.

dBm: Es la relación de la potencia transmitida en dB con respecto a 1 milivatio

DEMUX: es un dispositivo que tiene un canal de entrada y distribuye una señal en varios canales de salida.

Dispersión: Es el ensanchamiento de los impulsos de luz debido a los diversos caminos que esta toma y a las características propias de la fibra.

MUX: Es un dispositivo que tiene varios canales de entrada donde recibe señales y las envía a un solo canal de salida.

Protocolo: Es utilizado para que los equipos de comunicaciones pueden comprenderse entre sí.

Receptor óptico: Es un equipo que recibe la luz y mediante un conversor electro-óptico la convierte en señal eléctrica.

Refracción: Es un fenómeno que provoca que un rayo de luz que pasa de un medio a otro cambie de velocidad y ángulo.

Transmisor óptico: es un equipo que mediante un conversor análogo digital transforma una señal eléctrica y la envía al canal óptico como luz.

Fibra óptica: es un dispositivo utilizado como canal de transmisión por el que viaja la luz.

OLT: Terminal de unidad óptica, es un elemento activo ubicado en la oficina central, mediante una fibra óptica se conecta a un demux transmitiendo la señal óptica a la ONU para que esta llegue a cada abonada.

ONU: Unidad óptica de la red, es un dispositivo óptico que lleva al abonado la señal óptica y que debe convertirla en señal eléctrica.

PON: Una red óptica pasiva es una red de tipo punto a multipunto, está conformada por una OLT que se encuentra ubicada en la oficina central, que se conecta por medio de un canal de fibra óptica con cada uno de los usuarios mediante una ONU.