

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previa a la obtención del título de: INGENIERO  
ELECTRÓNICO**

**TEMA:**

**ANALIZAR Y SIMULAR LOS EFECTOS NO LINEALES CAUSADOS POR EL  
FENÓMENO DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN EN LA CAPA FÍSICA EN UNA  
RED PON DE NUEVA GENERACIÓN.**

**AUTOR:**

**VÍCTOR DANIEL PROAÑO GAVILANES**

**DIRECTOR:**

**LUIS GERMÁN OÑATE CADENA**

**Quito, mayo de 2015**

**DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIZACIÓN DE USO DEL  
TRABAJO DE TITULACIÓN.**

Yo, autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además, declaro que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito, mayo de 2015

-----  
V́ctor Daniel Proaño Gavilanes

CC: 1718686692

## **DEDICATORIA**

A mi familia, por y para ellos.

Víctor Daniel Proaño Gavilanes.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana, a cada uno de los docentes que de una u otra manera y durante toda mi formación, me supieron guiar, ayudar e inculcar esta hermosa profesión.

Al Ingeniero Luis Oñate por la confianza y paciencia en la elaboración del trabajo de grado, de igual manera para el Ingeniero Germán Arévalo por su aporte en la revisión y ayuda en este trayecto.

Víctor Daniel Proaño Gavilanes.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	3
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	3
1.1 Problema a resolver.....	3
1.2 Antecedentes. ....	4
1.3 Pregunta.....	5
1.4 Objetivos. ....	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos. ....	5
1.5 Justificación.....	6
1.6 Alcances.....	7
1.7 Metodología de la investigación. ....	7
1.7.1 Investigación bibliográfica y análisis del estado del arte.....	7
1.7.2 Desarrollo de la simulación.....	8
1.7.3 Documentación. ....	8
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	9
<b>ESTADO DEL ARTE</b> .....	9
2.1 Red de nueva generación NGN.....	9
2.2 Fibra hasta el hogar FTTH .....	9
2.3 Red óptica pasiva PON .....	10
2.4 Red TDM-WDM.....	11
2.4.1 Red TDM-PON .....	11
2.4.2 Red WDM-PON.....	12
2.5 Efectos no lineales.....	14
2.5.1 Modulación Cruzada de Fase (XPM).....	15

2.5.2 Mezclado de Cuatro Ondas (FWM).....	17
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>20</b>
<b>SIMULACIÓN DE LA RED TDM-WDM-PON.....</b>	<b>20</b>
3.1 Simulación de la red TDM-WDM-PON sin efectos causados por efectos del índice de refracción.....	20
3.1.1 Bloque transmisor. ....	21
3.1.2 Enlace de fibra óptica.....	24
3.1.3 Bloque receptor .....	25
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>29</b>
<b>PRUEBAS, RESULTADOS Y CÁLCULOS DE POTENCIA .....</b>	<b>29</b>
4.1 Pruebas de la red TDM-WDM-PON sin efectos no lineales causados por la variación del índice de refracción. ....	29
4.1.1 Resultados de la Red TDM-WDM-PON sin efectos causados por la variación del índice de refracción. ....	38
4.2 Pruebas de la red TDM-WDM-PON con efectos causados por la variación del índice de refracción. ....	44
4.2.1 Efecto XPM (Modulación de fase cruzada).....	44
4.2.2 Efecto FWM (Mezclado de cuatro ondas) .....	54
4.3 Cálculos de potencia en la red TDM-WDM-PON.....	62
4.4 Cálculo de potencia en la red TDM-WDM con el efecto XPM.....	64
4.5 Cálculo de potencia en la red TDM-WDM con el efecto FWM.....	66
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>69</b>
<b>ANÁLISIS DE COSTOS .....</b>	<b>69</b>
5.1 Costos de equipos de la red TDM-WDM-PON .....	69
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>72</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>73</b>
<b>LISTA DE REFERENCIAS .....</b>	<b>73</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Esquema de la arquitectura de una red PON.....	10
<i>Figura 2.</i> Esquema general de un enlace TDM. ....	12
<i>Figura 3.</i> Esquema general de un enlace WDM. ....	13
<i>Figura 4.</i> Clasificación de los efectos no lineales en la fibra óptica.....	14
<i>Figura 5.</i> Diagrama de la red híbrida TDM-WDM-PON. ....	20
<i>Figura 6.</i> Transmisor. ....	21
<i>Figura 7.</i> Interior del bloque transmisor. ....	22
<i>Figura 8.</i> Bloques transmisores TDM-WDM.....	24
<i>Figura 9.</i> Enlace de fibra óptica.....	25
<i>Figura 10.</i> Bloque receptores WDM-TDM-PON.....	26
<i>Figura 11.</i> Interior de un bloque receptor TDM. ....	27
<i>Figura 12.</i> Receptor de señal. ....	28
<i>Figura 13.</i> Conjunto de datos generados en el bloque transmisor.....	30
<i>Figura 14.</i> Espectro de señal del primer bloque transmisor TDM-PON.....	31
<i>Figura 15.</i> Grupo de espectro de frecuencias TDM-WDM-PON.....	32
<i>Figura 16.</i> Espectro de frecuencia a la salida del enlace de fibra óptica. ....	33
<i>Figura 17.</i> Espectro de frecuencia dedicado para el primer grupo receptor. ....	34
<i>Figura 18.</i> Datos recibidos a la salida del filtro óptico del bloque receptor.....	35
<i>Figura 19.</i> Datos recibidos.....	36
<i>Figura 20.</i> Diagrama de ojo de la señal recibida. ....	37
<i>Figura 21.</i> Dato filtrado para el primer usuario.....	37
<i>Figura 22.</i> Diagrama de ojo del dato filtrado para el primer usuario. ....	38
<i>Figura 23.</i> Gráfica de distancia vs. BER a una velocidad de transmisión de 10Gbps.....	39
<i>Figura 24.</i> Gráfica de distancia vs. BER a una velocidad de transmisión de 20Gbps.....	40



<i>Figura 25.</i> Gráfica de velocidad de transmisión vs. BER a una velocidad de 10Gbps. ...	41
<i>Figura 26.</i> Gráfica de distancia vs. BER a una velocidad de 30Gbps. ....	42
<i>Figura 27.</i> Gráfica de distancia vs. Potencia recibida, con una velocidad de transmisión de 10Gbps. ....	42
<i>Figura 28.</i> Gráfico de velocidad de trasmisión vs. Potencia recibida a 20Km. ....	43
<i>Figura 29.</i> Gráfico de velocidad transmisión vs. Potencia recibida a 30Km. ....	44
<i>Figura 30.</i> Pestaña dentro del bloque de fibra óptica en el software OptSim. ....	45
<i>Figura 31.</i> Gráfica de dispersión cromática vs. BER con una distancia de 10 Km y velocidad de transmisión de 10Gbps. ....	46
<i>Figura 32.</i> Efecto XPM – Gráfica distancia vs. BER con una velocidad de transmisión de 10Gbps. ....	47
<i>Figura 33.</i> Efecto XPM – Gráfica distancia vs. BER con una velocidad de transmisión de 20Gbps. ....	48
<i>Figura 34.</i> Gráfica de velocidad de transmisión vs. BER con 1mW de potencia de entrada. ....	49
<i>Figura 35.</i> Gráfica de velocidad de transmisión vs. BER con 30mW de potencia de entrada. ....	50
<i>Figura 36.</i> Gráfica de distancia vs. Potencia recibida con 1mW en la potencia de entrada. ....	51
<i>Figura 37.</i> Gráfica de distancia vs. Potencia recibida con 30mW en la potencia de entrada. ....	52
<i>Figura 38.</i> Gráfica de potencia recibida vs. BER con velocidad de transmisión de 20Gbps y potencia de entrada de 1mW. ....	53
<i>Figura 39.</i> Gráfica de potencia recibida vs. BER con velocidad de transmisión de 20Gbps y potencia de entrada de 20mW. ....	54
<i>Figura 40.</i> Elementos utilizados para la simulación del fenómeno de las cuatro ondas. ....	55
<i>Figura 41.</i> Ventana para el cambio de características dentro del modulador externo. ....	56

<i>Figura 42.</i> Gráfica de frecuencia portadora vs. BER para simular el efecto FWM. ....	57
<i>Figura 43.</i> Gráfica de la distancia vs. BER. ....	58
<i>Figura 44.</i> Gráfica de la velocidad de trasmisión vs. BER con potencia de entrada de 1mW.....	59
<i>Figura 45.</i> Gráfica de la velocidad de transmisión vs. BER con potencia de entrada de 30mW.....	59
<i>Figura 46.</i> Gráfica de distancia Vs potencia recibida.....	60
<i>Figura 47.</i> Gráfica de la potencia recibida vs. BER con una potencia de entrada de 1mW. ....	61
<i>Figura 48.</i> Gráfica de la potencia recibida vs. BER con una potencia de inserción de 20mW.....	61
<i>Figura 49.</i> Diagrama de enlace óptico.....	62
<i>Figura 50.</i> Potencia medida a la salida del filtro óptico. ....	64
<i>Figura 51.</i> Potencia medida en el receptor con efecto XPM. ....	66
<i>Figura 52.</i> Potencia medida en el receptor con efecto XPM. ....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Frecuencias para cada bloque de transmisión TDM-PON.</i> .....	23
Tabla 2. <i>Parámetros de la fibra que son utilizados en la simulación.</i> .....	25
Tabla 3. <i>Elementos que quitan o aportan potencia en la red.</i> .....	63
Tabla 4. <i>Valores de cada uno de los elementos en la red óptica con efecto XPM.</i> .....	65
Tabla 5. <i>Valores de cada uno de los elementos en la red óptica con efecto FWM.</i> .....	67
Tabla 6. <i>Costo y detalle de equipos para su implementación.</i> .....	70
Tabla 7. <i>Costo de la instalación de la red óptica.</i> .....	71
Tabla 8. <i>Costo total para la implementación del proyecto.</i> .....	71

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Índice efectivo de refracción para un medio no lineal .....	15
Ecuación 2. Cambio de fase para un canal óptico.....	16
Ecuación 3. Nueva frecuencia producto de la mezcla de las otras tres en el FWM.....	18
Ecuación 4. Potencia generada.....	18
Ecuación 5. Cálculo de la pérdida de potencia durante la transmisión de información...63	
Ecuación 6. Cálculo de la pérdida de potencia. ....	63
Ecuación 7. Cálculo de la pérdida de potencia en la red TDM-WDM-PON con influencia del efecto XPM. ....	64
Ecuación 8. Cálculo numérico de las pérdidas de potencia. ....	65
Ecuación 9. Cálculo de la pérdida de potencia en la red TDM-WDM-PON con influencia del efecto FWM.....	66
Ecuación 10. Cálculo numérico de las pérdidas de potencia. ....	67

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. OLT - SmartOLT.....	75
Anexo 2. ONU HG-8010 .....	76
Anexo 3. Amplificador EDFA1500 .....	77
Anexo 4. Filtro óptico - HTD.....	79
Anexo 5. AWG Mux/DeMux Module – AAWG SERIES .....	80
Anexo 6. Cable de fibra óptica monomodo – Powerguide TTH.....	81

## RESUMEN

La demanda por parte de los abonados sobre los servicios que reciben a través de internet, hace que las empresas prestadoras de servicios de internet busquen nuevas formas para la transmisión de información con la mayor calidad posible. Es por ello que las redes ópticas son una de las alternativas al proporcionar un gran ancho de banda a los usuarios, y donde las redes PON son utilizadas al componerse de elementos pasivos. En redes ópticas el uso de las técnicas de transmisión que se utilizan son la división de tiempo (TDM) y la técnica por división de onda (WDM). Una red híbrida TDM-WDM-PON permite combinar las mejores características de cada una de las redes de transmisión y ofrecer una mejor calidad de servicio.

Se realiza un análisis y simulación de la red TDM-WDM-PON sin efectos y con los efectos no lineales causados por la variación en el índice de refracción, como son la modulación de fase cruzada (XPM) y el mezclado de cuarto ondas (FWM), y también se realizó un análisis comparativo entre las dos redes simuladas para determinar las pérdidas de potencia presentes durante la transmisión de datos.

La red TDM-WDM-PON para este trabajo de grado consta de 64 usuarios donde se realizó simulaciones para determinar la potencia máxima de transmisión, velocidad y distancia máximas para una red sin los efectos de no linealidad. De manera similar se realizó simulaciones de la modulación de fase cruzada (XPM) y el mezclado de cuatro ondas (FWM) para encontrar la potencia máxima de transmisión, velocidad y distancia máximas con la presencia de los efectos no lineales en la red TDM-WDM-PON. Donde el efecto del mezclado de cuatro ondas es mucho más predominante en comparación al efecto de la modulación cruzada de fase.

## **ABSTRACT**

The demand from subscribers for the services they receive through internet, makes companies providing Internet services search new ways to transmit information with the highest possible quality. That is why the optical networks are one alternative to provide a high bandwidth to users, and where PON are used, because they are composed of passive elements. In optical networks using transmission techniques used are the time division (TDM) technique and wave division (WDM). A TDM-WDM-PON hybrid network combines the best features of each of the transmission and provide better quality of service.

An analysis and simulation of the WDM-TDM-PON without no effect and with the nonlinear effects caused by the variation in refractive index is performed, such as cross-phase modulation (XPM) and quarter-wave mixing (FWM ), and to do a comparative analysis between the two networks simulated to determine the power losses present during the transmission of data.

The network TDM-WDM-PON for this grade work consists of 64 users, where simulations was performed to determine the maximum transmission power, maximum rate and distance to a network without the effects of nonlinearity. Similarly, was performed simulations of the cross-phase modulation (XPM) and four-wave mixing (FWM) to find the maximum transmission power, maximum rate and distance with the presence of nonlinear effects in the network TDM-WDM-PON. Where the effect of four-wave mixing is much more dominant compared to the effect of cross phase modulation.

## INTRODUCCIÓN

El aumento en la demanda de servicios por parte de los abonados como son: internet, video en alta definición, voz IP, requieren un mayor ancho de banda, para satisfacer estas necesidades y las redes de nueva generación (NGN) basadas en fibra óptica permiten llenar estas expectativas.

Existen diversas tecnologías disponibles y topologías para redes de acceso, donde las redes PON son redes de fibra óptica cuyos componentes son enteramente pasivos. También se encuentran técnicas de acceso al medio para las redes PON tales como: multiplexación por división de tiempo (TDM), que es una técnica donde el ancho de banda total del medio de transmisión es concedido a cada canal durante un intervalo de tiempo determinado, y es por ello la mayor limitación para esta técnica de transmisión es su ancho de banda. Una segunda forma de transmitir datos es utilizar la técnica de multiplexación por división de onda (WDM), esta es una técnica donde cada usuario tiene una longitud de onda dedicada con lo cual tiene un mayor ancho de banda, sin embargo, una de las limitaciones de esta técnica es su alto costo de implementación.

La técnica híbrida TDM-WDM-PON pretende combinar estas dos técnicas de acceso y de esta manera llegar a más usuarios con un mayor ancho de banda, sin embargo, existe una pérdida por aumentar el número de longitudes de onda asignado a cada canal de transmisión (WDM) junto con la dispersión al dividir la señal en el tiempo. La red TDM-WDM-PON es una opción de red de nueva generación tipo FTTx.

Sobre la red TDM-WDM-PON se llevará un análisis y simulación de los efectos no lineales causados por la variación que se da en el índice de refracción como son: la modulación cruzada de fase (XPM) y el mezclado de cuatro ondas (FWM). Donde se realizarán pruebas de la red con y sin efectos cambiando varias características de la red TDM-WDM-PON y de donde se obtendrán varias gráficas que mostrarán el estado de los datos transmitidos, las pérdidas de potencia por causa de estos efectos no lineales, así como analizar la tasa de bits errados (BER) en la red simulada.



El primer capítulo hace una reseña sobre el problema a resolver, los antecedentes, los objetivos de la investigación, la justificación, así como los alcances del trabajo de titulación y por último la metodología de la investigación.

El segundo capítulo detalla el estado del arte correspondiente a las redes de nueva generación (NGN), redes ópticas pasivas (PON), las técnicas de acceso al medio, los efectos no lineales como lo son la modulación de fase cruzada (XPM) y el mezclado de cuatro ondas (FWM).

En el tercer capítulo se describe la implementación en el simulador de la red híbrida TDM-WDM-PON.

El cuarto capítulo explica las pruebas que se efectuaron en el simulador sobre la red TDM-WDM-PON sin efectos no lineales y con los efectos no lineales causados por la variación del índice de refracción XPM y FWM, además de exhibir los resultados que se obtuvieron al probar la red TDM-WDM-PON con diferentes distancias, velocidades de transmisión, potencias y cálculos de potencia.

Por último el quinto capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de titulación, así como lista de referencias bibliográficas junto con los anexos correspondientes a los equipos que conforman la red TDM-WDM-PON.

# CAPÍTULO 1

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo se detallan los problemas que se necesitan analizar, el planteamiento a la pregunta que encierra este trabajo sobre los efectos no lineales XPM (Modulación Cruzada de Fase) y FWM (Mezclado de Cuatro Ondas). Así como objetivos, justificación, alcance del proyecto, la metodología de investigación que se utilizará para el diseño y desarrollo para este trabajo de titulación.

### **1.1 Problema a resolver.**

Debido a la constante necesidad de implementar nuevas redes de acceso que faciliten la transmisión de datos con un mayor ancho de banda, los diferentes proveedores de redes y servicios de telecomunicaciones están definiendo nuevas redes convergentes de banda ancha basadas en la utilización IP en la última milla. Lo que permite ofrecer más servicios (televisión, datos, voz, video, entre otros) sobre la misma infraestructura a precios más competitivos, reduciendo la inversión necesaria en equipamiento de la red. (Viviana S. Gutierrez, 2011, pág. 86)

En redes PON de nueva generación se presenta un conjunto de problemas que es preciso tener en cuenta al momento de la transmisión, estos aparecen cuando la potencia en la transmisión en la fibra excede de algunos milivatios y su velocidad tiende a ser mayor a los 2.5 Gbps, produciendo una serie de efectos no lineales en la transmisión causados por la variación del índice de refracción y que son obligatorios considerar para este trabajo como son: XPM (Modulación Cruzada de Fase) y FWM (Mezclado de Cuatro Ondas), ya que su aparición puede llegar a alterar de manera significativa las características de la señal enviada, y esto puede ocasionar perturbación en la señal recibida. (Pereda, 2004, pág. 423)

Esta investigación permitirá determinar el nivel de pérdida de potencia en la transmisión que se da en la fibra óptica debida a los efectos no lineales XPM y FWM en una red híbrida TDM-WDM-PON mediante simulación por computadora, y así determinar si son o no un factor crítico para la transmisión.

## **1.2 Antecedentes.**

La técnica de acceso al medio TDM, permite enviar datos pero esta técnica presenta varios inconvenientes al asignar un cierto ancho de banda por intervalos de tiempo. Este problema debe ser superado si se desea aumentar la velocidad de los sistemas TDM-PON con velocidades que superan los 10Gbps. Por otro lado, cuando se supera velocidades de transmisión mayores de 40Gbps, se utiliza para la transmisión la técnica de multiplexación por división de onda (WDM). Este tipo de técnica permite aumentar la velocidad, pero uno de los inconvenientes que se encuentra es la pérdida de potencia que se da debido a los divisores ópticos que conforman las redes WDM-PON. (Kimura, 2010, p. 14)

La concepción de usar una técnica híbrida TDM-WDM-PON es la única forma de mejorar las tecnologías existentes. La forma más fácil de ampliar el margen de potencia es el aumento de la energía insertada (Lašuks, 2010). Y debido a esta potencia de aumento se genera un incremento en el campo eléctrico, el cual da lugar a la variación del índice de refracción y este a su vez produce el efecto no lineal XPM (Modulación Cruzada de Fase) o FWM (Mezclado de Cuatro Ondas).

Por otra parte el mezclado de cuatro ondas (FWM) se presenta cuando existen combinaciones entre longitudes de onda en una misma fibra que circulan con un número elevado de canales, produciendo el brote de pulsos de señal nuevos con nuevas longitudes de onda.

### **1.3 Pregunta.**

Se plantea la siguiente pregunta:

¿Los efectos de no linealidad XPM (Modulación Cruzada de Fase) y FWM (Mezclado de Cuatro Ondas) causan penalizaciones de potencia en una red TDM-WDM-PON?

### **1.4 Objetivos.**

A continuación se presenta el objetivo general, así como los objetivos específicos para este proyecto.

#### **1.4.1 Objetivo general.**

- Analizar y simular los efectos no lineales causados por el índice de refracción: Mezclado de Cuatro Ondas (FWM) y Modulación Cruzada de Fase (XPM), en la capa física de una red PON de nueva generación que utiliza las técnicas TDM-WDM.

#### **1.4.2 Objetivos específicos.**

- Analizar el estado del arte de los efectos no lineales causados por el índice de refracción: Mezclado de Cuatro Ondas (FWM) y Modulación Cruzada de Fase (XPM) en la capa física en una red PON de nueva generación, cuando la velocidad de transmisión de datos supera los 10Gbps.
- Implementar una simulación en computadora de una red PON de nueva generación con y sin los efectos no lineales de: Mezclado de Cuatro Ondas (FWM) y Modulación Cruzada de Fase (XPM).
- Determinar las pérdidas de potencia causados por los fenómenos de índice de refracción no lineal, en la fibra óptica de una red NGN-PON a través de la comparación entre las dos redes simuladas.

## **1.5 Justificación.**

La expansión de servicios multimedia, como vídeo, videoconferencia, televisión de alta definición (HDTV), e-learning, juegos interactivos, exige que cada usuario de internet tenga un ancho de banda garantizado. Con el fin de ofrecer servicios de banda ancha a los usuarios, hay una fuerte competencia entre los distintos tipos de tecnologías: cable coaxial, inalámbricas, FTTX entre otras. Sin embargo, el ancho de banda de las redes de accesos que trabajan con cable de cobre y de acceso inalámbrico es limitado debido a las restricciones de los medios físicos. Como resultado, y para satisfacer la demanda de ancho de banda en el futuro, los proveedores de servicios de red tendrán que desplegar redes de acceso óptico. (Md. Shamim Ahsan, Man Seop Lee, S. H. Shah Newaz And Syed Md. Asif, 2011)

Las redes de nueva generación (NGN) brindan servicios de voz, datos, video, además de servicios adicionales como televisión IP, datos de comunicaciones móviles LTE, llevando estos servicios o incluso otros más, pudiendo ofrecer n servicios (n-play) a los abonados, para cumplir dicho objetivo es necesario utilizar medios de transmisión de alta velocidad. La fibra óptica, es el medio de transmisión que tiene las características para soportar velocidades necesarias para satisfacer los requerimientos de las redes NGN-PON, sin embargo a velocidades mayores de 2.5Gbps, aparecen efectos no lineales en la fibra óptica. (Pereda, 2004)

La importancia de este proyecto radica en determinar el nivel de pérdida de potencia en un enlace de fibra óptica de una red NGN-PON, causada por los efectos no lineales que son provocados por la variación del índice de refracción. Mediante los cuales se podrá determinar si son o no un factor crítico para la transmisión de datos en una red NGN-PON, todo este análisis se realiza mediante simulación por computadora.

Además este proyecto de grado generará material útil para para los estudiantes de la UPS en temas relacionados a fibra óptica, y redes PON de nueva generación.

## **1.6 Alcances.**

Las simulaciones que se realizan en la red TDM-WDM-PON, son las siguientes:

- Simular una red TDM-WDM-PON sin los efectos de no linealidad.
- Simular una red TDM-WDM-PON, con los efectos no lineales provocados por la variación del índice de refracción como son: XPM y FWM.
- Comparar los datos obtenidos de las simulaciones, entre las redes que poseen los efectos y aquellas que no los tienen.

Las simulaciones que en la red TDM-WDM-PON no se realizan son:

- No se considerará el análisis desde la capa 2 en adelante tomando en cuenta el modelo de referencia OSI.
- No se determinará como los efectos no lineales afectan a los datos transmitidos.
- No obtendrá información de tráfico de datos.
- No realizará la simulación de efectos no lineales causados por la dispersión inelástica.

## **1.7 Metodología de la investigación.**

La metodología de investigación consta de las siguientes etapas:

- Búsqueda del estado del arte de los efectos de no linealidad generados por el índice de refracción en la fibra óptica.
- La simulación por computadora de la red de nueva generación PON con y sin los efectos causados por la variación de índice de refracción.
- Comparación entre las dos redes simuladas para determinar las penalidades de potencia que se encuentran presentes en la fibra óptica.

### **1.7.1 Investigación bibliográfica y análisis del estado del arte.**

Se procederá a la indagación sobre redes PON de nueva generación, cuáles son sus principales características, técnicas de acceso al medio, así como la velocidad en las que

típicamente trabajan este tipo de redes. Este trabajo de titulación realizará simulaciones sobre una red TDM-WDM-PON que consta de 64 usuarios.

Posteriormente se realiza el análisis del estado del arte de los efectos no lineales del XPM (Modulación Cruzada de Fase) y FWM (Mezclado de Cuatro Ondas), y si estos efectos no lineales presentan algún tipo de riesgo en la transmisión de información.

### **1.7.2 Desarrollo de la simulación.**

En el desarrollo de la simulación de la red TDM-WDM-PON se utilizará el software "OptSim". Este software se especializa en redes ópticas, donde se pueden mostrar los efectos no lineales del XPM y FWM. En este software, se desarrolla la red TDM-WDM-PON sin efectos. Posteriormente se realizarán las simulaciones de la red TDM-WDM-PON con efectos no lineales causados por el cambio en el índice de refracción, para después hacer la comparación entre las dos redes simuladas y de esta manera determinar las pérdidas de potencia que se presentan en la fibra óptica por causa del XPM (Modulación Cruzada de Fase) y FWM (Mezclado de Cuatro Ondas).

### **1.7.3 Documentación.**

Se procederá a redactar un texto que explique cada uno de los bloques que en conjunto forman la red TDM-WDM-PON, sobre la cual se basa el desarrollo de este proyecto. De igual manera se analizarán cada una de las simulaciones, se interpretarán los datos obtenidos de una manera clara y ordenada realizando una comparación entre los datos de la red con y sin efectos.

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se detallan los problemas que se necesitan analizar, así como las bases teóricas de las redes de nueva generación (NGN) y las técnicas de acceso al medio TDM y WDM. También se examinará el estado del arte de los efectos de no linealidad provocados por la variación del índice de refracción XPM (Modulación Cruzada de Fase) y FWM (Mezclado de Cuatro Ondas).

#### 2.1 Red de nueva generación NGN

Red que basa su funcionamiento en paquetes, permite prestar servicios de telecomunicación y en la que se pueden utilizar múltiples tecnologías de transporte de banda ancha, y en la que las funciones relacionadas con los servicios son independientes de las tecnologías subyacentes relacionadas con el transporte. Soporta movilidad generalizada que permitirá la prestación coherente de servicios a los usuarios”. (ITU-T Recommendation Y.2001 (12/2004) - General overview of NGN, 2004)

Es por ello que la fibra óptica, como medio de transmisión, es ideal para soportar redes de nueva generación ya que permite utilizar una amplia gama de servicios (voz, datos, video de alta definición, juegos en línea, servicios en tiempo real) con un mayor ancho de banda y grandes velocidades, y la red PON es aquella que se ajusta a las necesidades que presentan este tipo de requerimiento porque ofrece un mayor ancho de banda.

#### 2.2 Fibra hasta el hogar FTTH

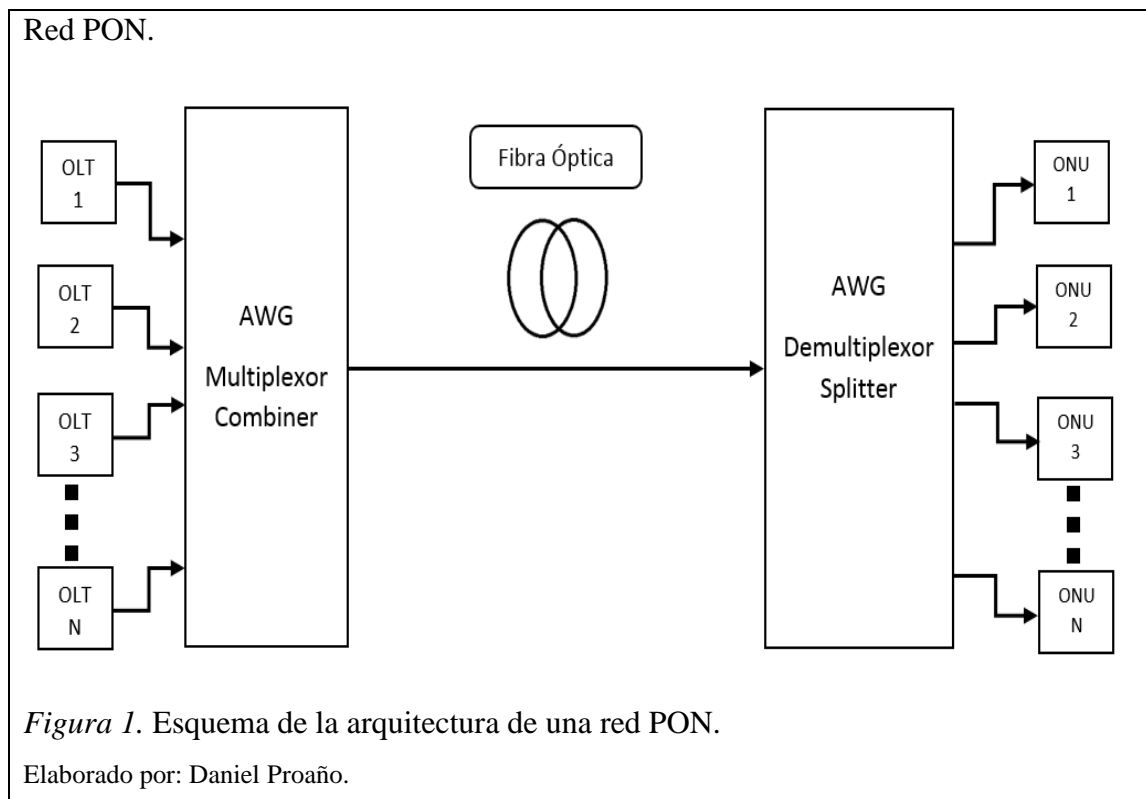
Este concepto está basado en FTTx (Fiber to the x) y donde x puede denotar distintos destinos dependiendo de la profundidad de la fibra, los más importantes son: FTTH (casa), FTTB (edificio), FTTN (nodo) donde la preferencia de una de estas arquitecturas dependerá del tipo de servicios que desee brindar el operador. La arquitectura FTTH es aquella que fundamenta su funcionamiento en divisores ópticos pasivos dividiendo los



costos segmento óptico entre las diferentes terminales, lo que permite reducir la cantidad de fibra óptica en este tipo de redes de acceso. (Viviana S. Gutierrez, 2011, p. 87)

### 2.3 Red óptica pasiva PON

Una red PON es una red óptica punto a punto o multipunto que se constituye por una terminal de línea óptica (OLT) la cual se encuentra alojada en una oficina central, y un conjunto de unidades de redes ópticas (ONU), que se encuentran en nodos terminales remotos donde se hallan los usuarios. Las OLT y las ONU están unidas mediante varios multiplexores y demultiplexores ópticos, como por un enlace de fibra óptica como se muestra en la figura 1. Este tipo de redes contienen elementos pasivos para su funcionamiento, esto quiere decir que contiene equipos que no necesitan energía externa para poder funcionar. Estas redes surgen de la necesidad de abaratar costos en redes de acceso. Las redes FTTH (Fiber To The Home) son una de las mejores opciones en la actualidad, gracias a las grandes prestaciones que proporciona la fibra óptica como medio de transmisión al subir o bajar información. (Alex Vukovic, Khaled Maamoun, Heng Hua, Michel Savoie, 2007)



La figura 1 muestra como está constituida una red óptica pasiva. La OLT tiene el trabajo de proveer servicios ya que es el punto final de una PON, mientras que el AWG\_Mux, el multiplexor o combiner tienen la tarea de agrupar múltiples datos provenientes de distintos canales de transmisión para enviarlos por un mismo medio. La fibra óptica será el medio de transmisión por el que viajará la información, esta llegará a un AWG\_Demux, demultiplexor o splitter donde los datos serán divididos hacia cada ONU donde se reciben la información los usuarios.

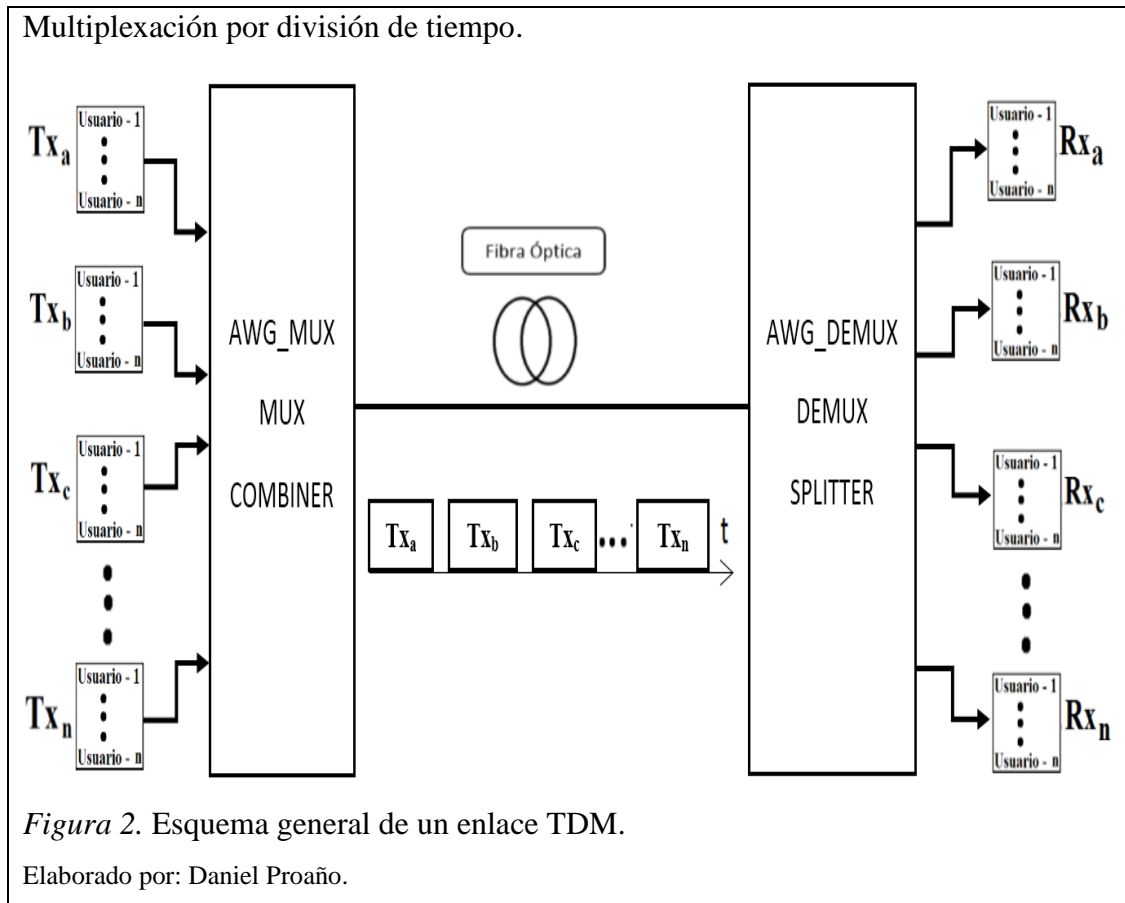
## **2.4 Red TDM-WDM**

A continuación se procederá con la parte teórica de la red híbrida TDM-WDM-PON.

### **2.4.1 Red TDM-PON**

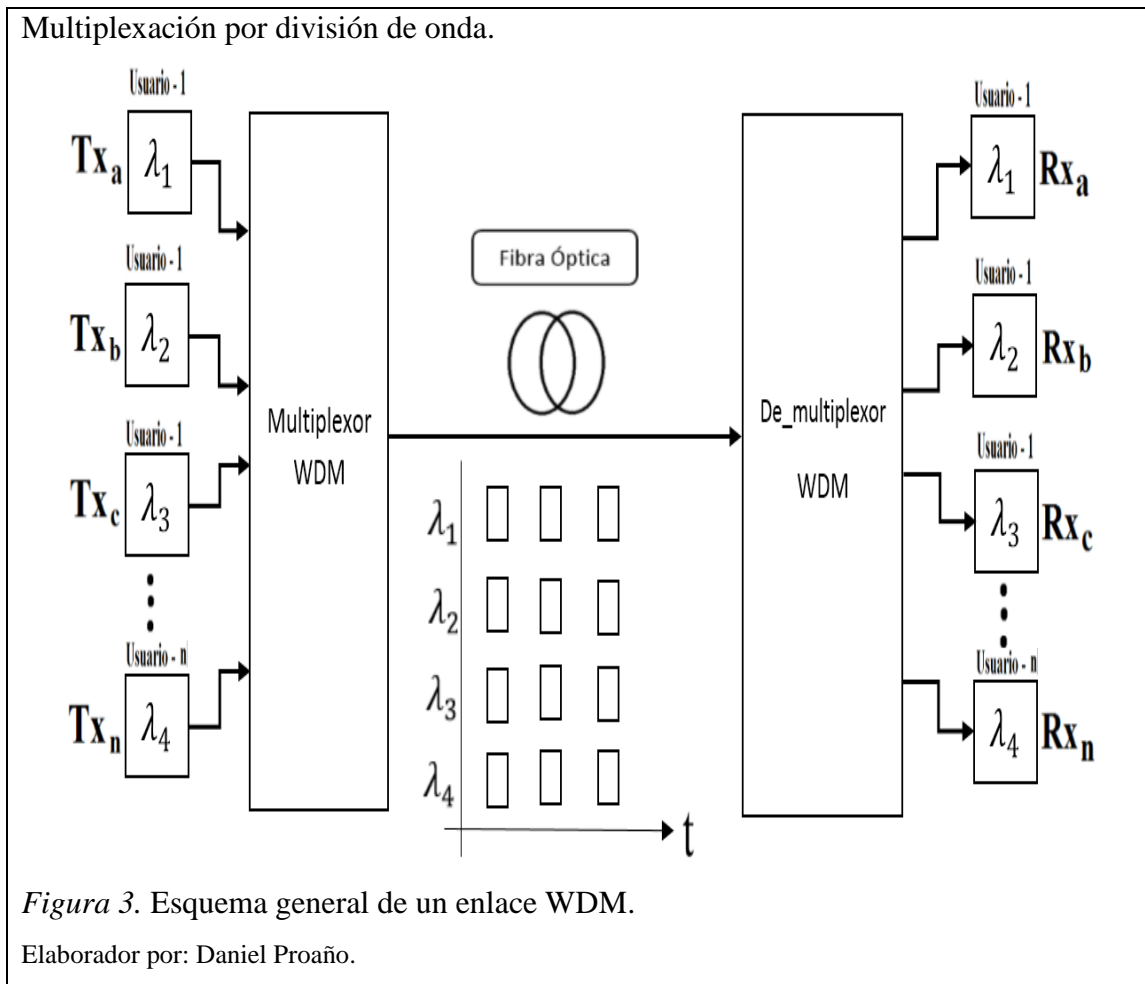
La figura 2 muestra de una manera gráfica la técnica de acceso al medio por división de tiempo TDM. Las transmisiones de varias fuentes se hacen por el mismo medio, pero no al mismo tiempo. Estos datos se unen en el multiplexor TDM, después de cruzar por este último, conforman un solo flujo de datos. Estos datos llegan hacia el demultiplexor TDM donde los datos que se transmitieron son separados según su posición cronológica. (Pereda, 2004, pág. 708).

Como se mencionó anteriormente esta técnica de acceso asigna un intervalo de tiempo a cada usuario por medio de la OLT, pero utiliza una misma longitud de onda para todos los abonados, lo que causa que el ancho de banda en cada ONU sea común para todos los usuarios.



## 2.4.2 Red WDM-PON

La multiplexación por división de onda (WDM) transmite señales de información que ocupen la misma banda de frecuencias, a través de la misma fibra y al mismo tiempo, sin que interfieran entre ellas (Tomasi, 2003, pág. 754). Este sistema de transmisión contiene varios canales de información que provienen de distintas fuentes generadas en varios emisores, los cuales llegan a un multiplexor WDM. En cada uno de estos canales la información transmitida tiene una longitud de onda diferente ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ), después se unen a un multiplexor WDM y luego entran a un único canal viajando de manera simultánea hasta llegar al demultiplexor WDM que se encuentra al otro lado del enlace de fibra óptica. Y es aquí, en donde las distintas frecuencias se separan de manera simétrica con respecto a lo que se produjo en la entrada como se observa en la figura 3.



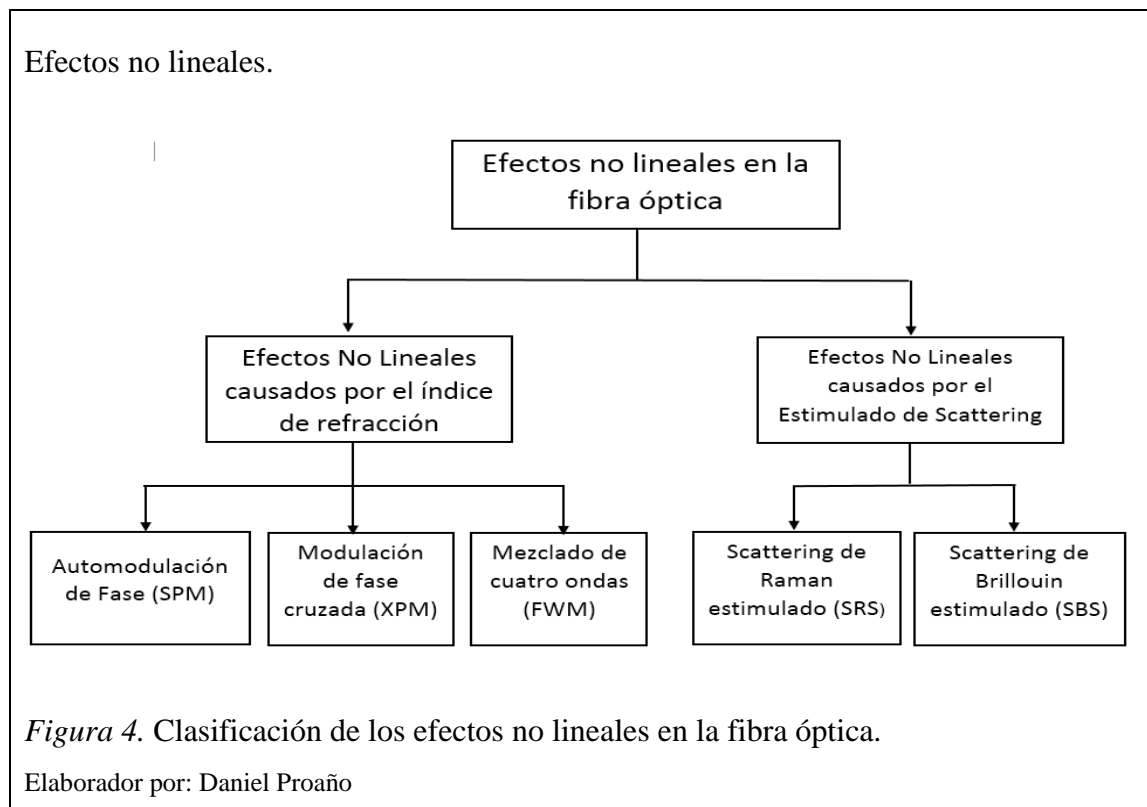
Para este trabajo de titulación se ha propuesto elaborar una red híbrida TDM-WDM-PON, ya que es necesario tener en cuenta que en los últimos años el uso de internet en todo el mundo se ha incrementado, así como los servicios que prestan las empresas proveedoras. Al incrementar los servicios y la calidad de los mismos es necesario el aumento del ancho de banda (cuestión que está limitada por la técnica TDM) y de la velocidad con la que se transmite la información y por supuesto tratar de abaratar el costo de las redes de acceso (lo que no es muy factible al utilizar la técnica WDM) y es por ello que una red híbrida TDM-WDM-PON pretende mantener de la mejor manera los datos que los usuarios envíen o reciban al combinar estas dos técnicas de acceso al medio para así obtener un mayor número de usuarios y mayor velocidad de transmisión con un costo relativamente

bajo y un gran ancho de banda. (Md. Shamim Ahsan, Man Seop Lee, S. H. Shah Newaz And Syed Md. Asif, 2011).

## 2.5 Efectos no lineales

Los efectos no lineales tienen su origen en el material del que están compuestos, ya que estos materiales se comportan de manera no lineal cuando la intensidad de la radiación óptica que pasa por este sobrepasa un determinado nivel de intensidad, haciendo que el índice de refracción tenga variaciones en su comportamiento debido a este cambio de intensidad. El efecto Kerr provoca que un rayo de luz se refracte en dos rayos diferentes, uno en sentido del rayo incidente y otro en sentido contrario al rayo incidente, dentro de la fibra óptica cuando es sometido a un campo eléctrico intenso. El origen físico de este efecto se encuentra en la respuesta armónica de los electrones a los campos ópticos dando como resultado en una susceptibilidad no lineal. (Agrawal, 2002, pág. 64)

Serán analizados aquellos fenómenos no lineales generados por la variación del índice de refracción, como se muestra en la parte izquierda de la figura 4.



Cuando una señal modulada en intensidad se desplaza a través de una fibra óptica, debido al índice no lineal de refracción, el pico de un pulso viaja más lentamente que los extremos. Esto produce que la longitud de onda se estire. A este tipo de efecto se conoce como automodulación de fase y será designada por SPM (Self-Phase Modulation). (Jaen, 2002, pág. 137)

La Modulación de fase cruzada se genera cuando dos o más canales ópticos se encuentran transmitiendo de manera simultánea por la fibra óptica, en este caso la intensidad de cada uno de ellos afectará al otro de una manera análoga y, consecuentemente, sus respectivos índices de modulación se verán afectados por la presencia del otro. Un segundo fenómeno tiene también lugar, derivado de una raíz similar. Es aquel que se conoce como mezclado de cuatro ondas (FWM) y que conduce a la aparición de longitudes de onda adicionales a las que inicialmente se introdujeron en la fibra óptica. (Pereda, 2004, pág. 424)

### **2.5.1 Modulación Cruzada de Fase (XPM)**

Tomando de base el fenómeno no lineal del SPM, el cual aparece por la fibra cuando se transmite sobre un único canal, la modulación cruzada de fase únicamente es posible cuando dos o más canales ópticos son transmitidos simultáneamente al interior de un mismo medio, utilizando la técnica WDM. (Agrawal, 2002, págs. 64,65)

El índice efectivo de refracción de un medio no lineal puede ser expresado en términos de la potencia de entrada ( $P$ ) y el área efectiva  $A_{eff}$  como:

Ecuación 1. Índice efectivo de refracción para un medio no lineal

$$n'_j = n_j + \bar{n}_2 \frac{P}{A_{eff}}$$

Donde:

$n'_j \rightarrow$  Coeficiente del índice efectivo de refracción no – lineal.

$n_j \rightarrow$  Coeficiente del índice de refracción lineal.

$\bar{n}_2 \rightarrow$  Coeficiente del índice no – lineal.

$P \rightarrow$  Potencia de entrada.

$A_{eff} \rightarrow$  Área efectiva de la fibra.

En este caso, el efecto de cambio de índice de refracción que se genera en la SPM, se ve reforzado por la presencia simultánea de múltiples canales que, tienen el efecto de intensificar la acción que se conseguía con un único canal. En tales sistemas, el cambio de fase no lineal para un canal específico depende no sólo de la potencia de ese canal, sino también en el poder de otros canales (Pereda, 2004, pág. 434). El cambio de fase para el canal  $j$  se convierte en:

Ecuación 2. Cambio de fase para un canal óptico.

$$\phi_j^{NL} = \gamma L_{eff} \left( P_j + 2 \sum_{m \neq j} P_m \right)$$

Dónde:

$\phi_j^{NL} \rightarrow$  Coeficiente no – lineal de cambio de fase para el canal  $j$ .

$\gamma \rightarrow$  Constante de propagación.

$L_{eff} \rightarrow$  Longitud efectiva de la fibra.

$P_j \rightarrow$  Potencia del canal  $j$ .

$P_m \rightarrow$  Potencia del canal  $m$ .

Como es lógico, la presencia de varios canales WDM hará más notorio el efecto. Se puede observar en la ecuación 2, que la variación de fase está determinada por la suma de  $P_j +$

$2 \sum_{j \neq m} P_m$ . El primer sumando es análogo y proviene del SPM. El segundo sumando es nuevo y se produce por la presencia del segundo campo y cómo afecta al primero. Se observa que la influencia del segundo campo sobre el primero es más importante, ya que si ambos tienen igual intensidad, la del segundo tendrá un efecto doble y esto provocará que el chirp sea más importante y con él todos los efectos que pueda originar este fenómeno. (Pereda, 2004, pág. 434)

La forma más fácil de evitar este efecto no lineal es distribuir cada canal óptico con un espacio mayor a los 0,1THz. Con este intervalo de frecuencias, las constantes de propagación son lo suficientemente diferentes como para que se desplacen a diferentes velocidades y el solape que pueda haber entre pulsos desaparezca al cabo de una distancia no muy grande con lo que la XPM entre ellos es mínima. Este hecho tiene lugar siempre que la diferencia entre la dispersión cromática correspondiente a uno y otro canal difiera en cantidades próximas a los  $2 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ . Esta diferencia ocurre para el espaciado mencionado antes, siempre que estos canales no se encuentren próximos a la zona de dispersión cero, en fibras SMF convencionales. Cuando se trabaja sobre fibras de dispersión desplazada, y las longitudes de onda están en el orden de 1.550nm, este efecto puede ser un problema grave para velocidades por encima de los 10 Gb/s". (Pereda, 2004, pág. 434)

### 2.5.2 Mezclado de Cuatro Ondas (FWM)

El mezclado de cuatro ondas es un fenómeno no lineal de tercer orden, este se produce por que el índice de refracción en la sílice depende de la intensidad. El FWM se presenta para cualquier número de canales con diferentes ondas a frecuencias  $\omega_1, \omega_2, \omega_3 \dots \omega_n$ , siempre que no sea uno único. El efecto final es la aparición de pulsos de señal nuevos con nuevas longitudes de onda con frecuencias de la forma  $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$ , donde las correspondientes  $\omega_i, \omega_j, \omega_k$  no han de ser necesariamente diferentes. La aparición de estas nuevas frecuencias, que surgen de la resta o suma de los valores de las tres iniciales, justifica el nombre con el que se representa a este fenómeno. (Jaen, 2002, pág. 144)



Su efecto puede ser importante y, en algunos casos, conducir a una degradación considerable de la transmisión, aún más cuando el espaciamiento entre canales sea muy próximo o cercano. En sistemas WDM donde se tienen canales igualmente espaciados, su presencia es significativa, donde el espaciamiento de cada canal deberá analizarse con cuidado, ya que si esta cuarta frecuencia coincide en valor con alguna de las tres anteriores aparecerán diafonías. (Jaen, 2002, pág. 144)

Entre todas estas mezclas de señales las más problemáticas son las que corresponden a la forma  $\omega_i \pm \omega_j - \omega_k$ , con  $j \neq k$ . De acuerdo con la notación usual en otros campos, se define como:

Ecuación 3. Nueva frecuencia producto de la mezcla de las otras tres en el FWM.

$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k$$

Tomando como origen de esta expresión, y asumiendo que el área efectiva por la que se transmite estos campos es  $A_e$ , se presenta la ecuación de la potencia generada a la frecuencia  $\omega_{ijk}$ , tras atravesar una distancia  $L$ . (Pereda, 2004, pág. 436)

Ecuación 4. Potencia generada.

$$P_{ijk} = \left( \frac{\omega_{ijk} n_{NL} d_{ijk}}{3A_e c} \right) P_i P_j P_k L^2$$

Donde:

$P_{ijk} \rightarrow$  Potencias generada a la frecuencia  $\omega_{ijk}$ .

$\omega_{ijk} \rightarrow$  Nueva frecuencia.

$n_{NL} \rightarrow$  Índice de refracción no lineal.

$d_{ijk} \rightarrow$  Factor de degeneración.

$A_e \rightarrow$  Área efectiva de la fibra.

$C \rightarrow$  Velocidad de la luz.

$P_{i,j,k} \rightarrow$  Potencias de entrada correspondientes a las frecuencias  $\omega_{i,j,k}$ .

$L \rightarrow$  Longitud de la fibra.

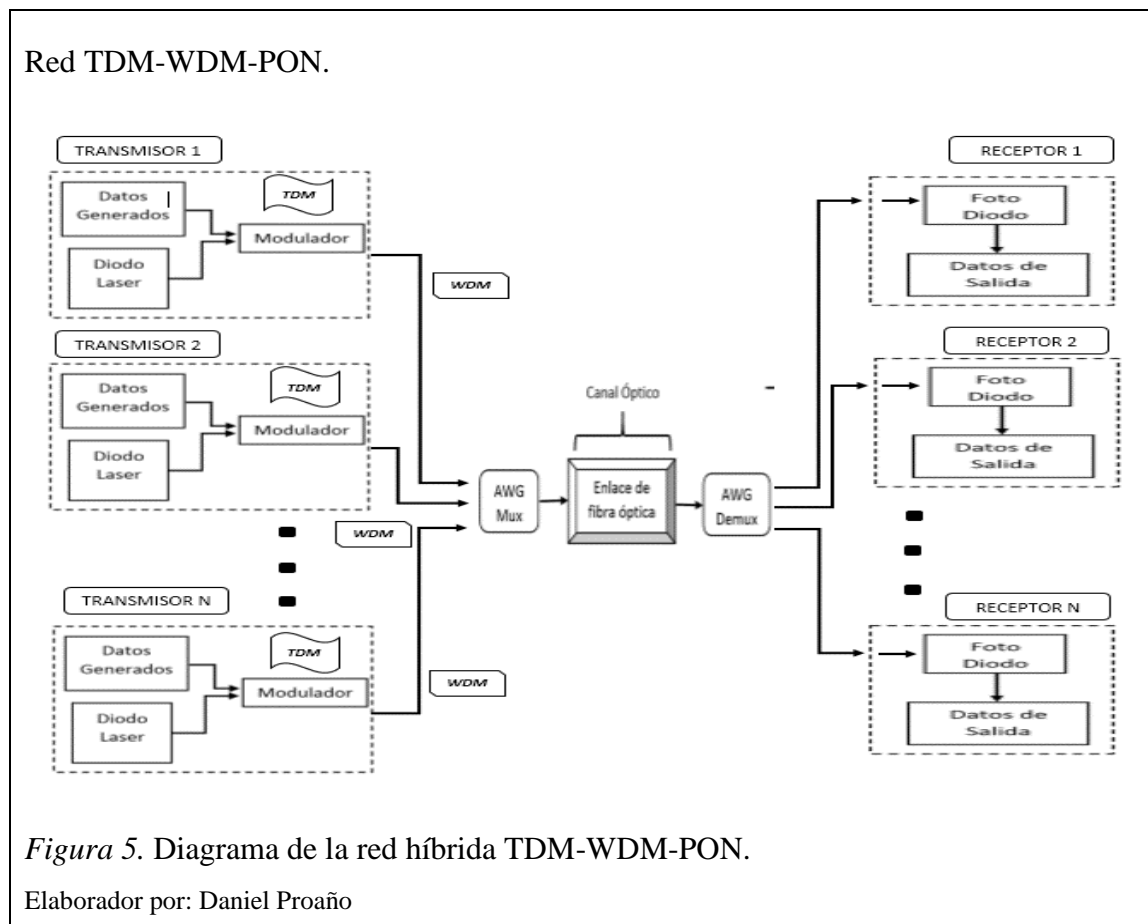
## CAPÍTULO 3

### SIMULACIÓN DE LA RED TDM-WDM-PON

En el presente capítulo se procede a describir las simulaciones de la red TDM-WDM-PON. También se describe como está constituida la red tanto en el bloque transmisor, en el enlace de fibra óptica y por último el bloque receptor.

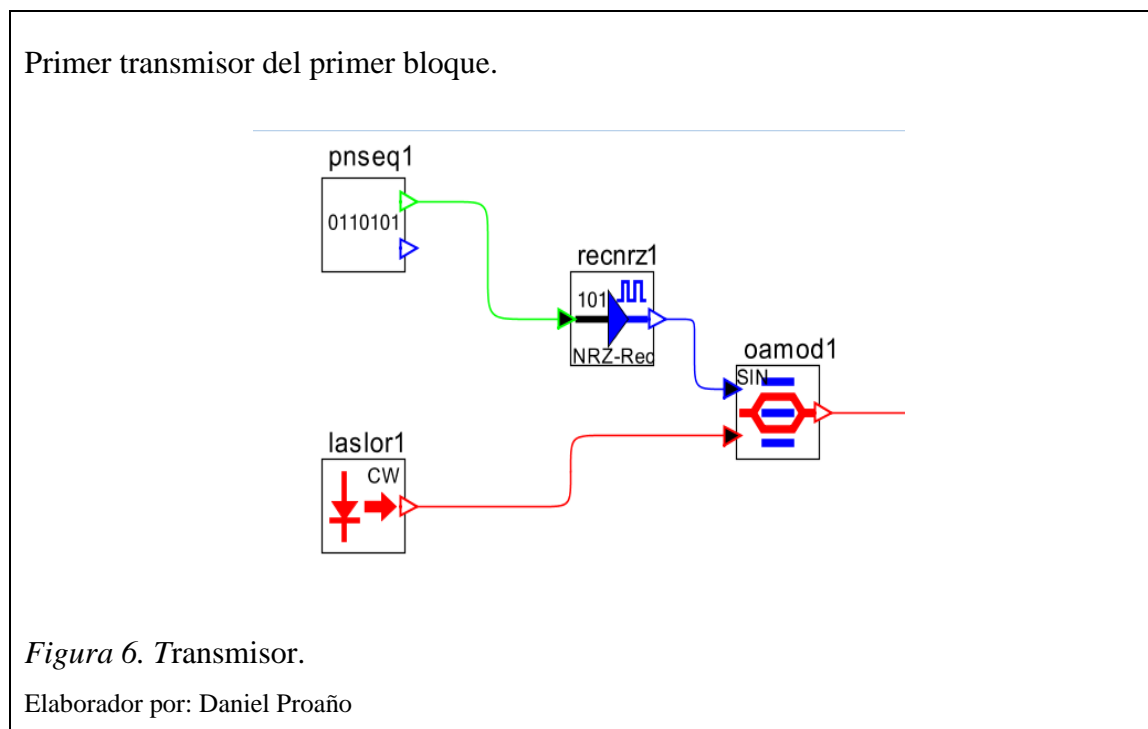
#### 3.1 Simulación de la red TDM-WDM-PON sin efectos causados por efectos del índice de refracción.

La figura 5 muestra la arquitectura en la que se basa este trabajo de titulación. La red híbrida TDM-WDM-PON está conformada por ocho bloques transmisores, dentro de cada bloque transmisor, se encuentran ocho usuarios, que en conjunto suman un total de 64 usuarios para esta red.



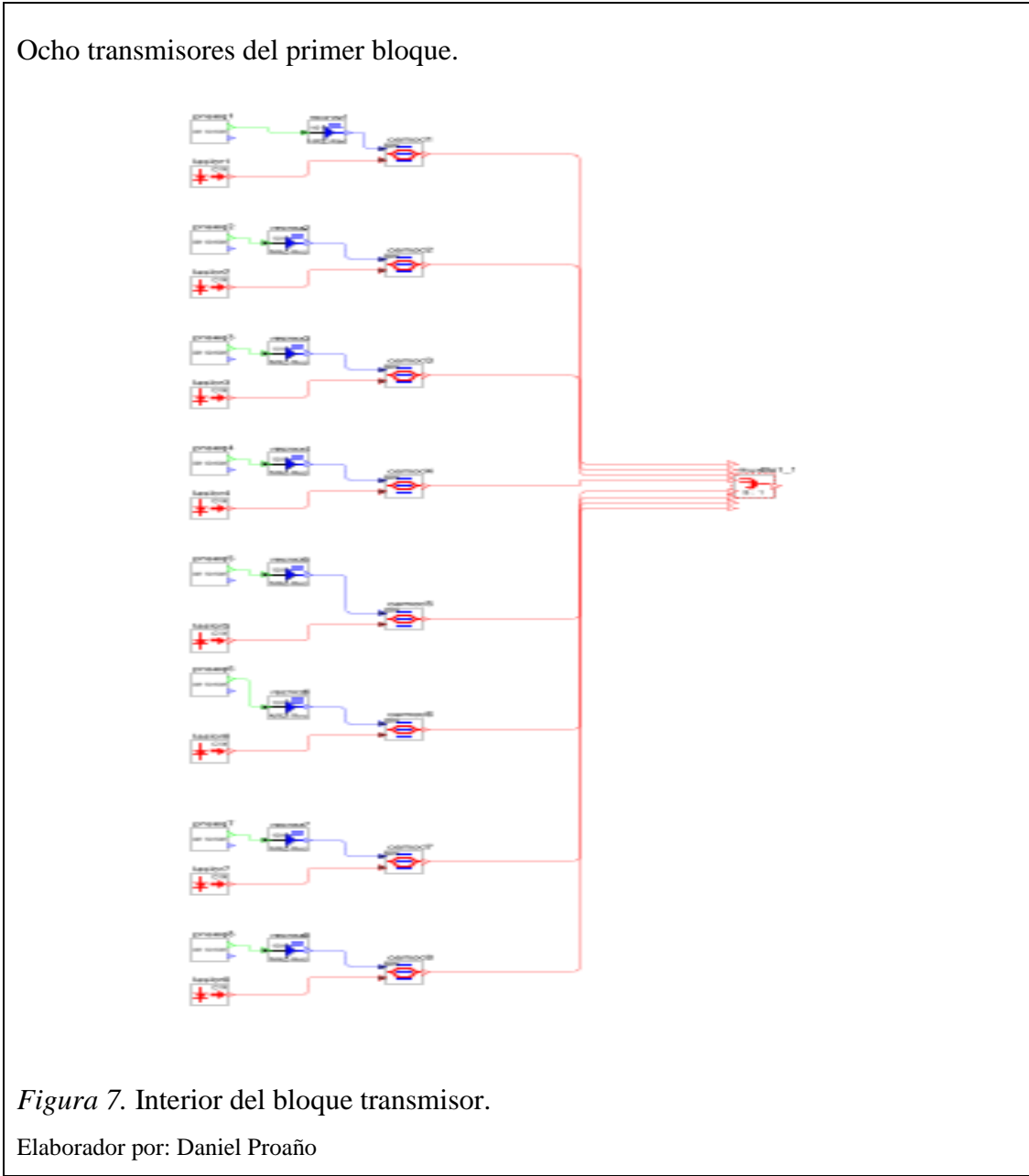
### 3.1.1 Bloque transmisor.

En la figura 6 se observa el interior de un bloque transmisor, este se conforma de un generador aleatorio de señal, un codificador NRZ (No Return to Zero) donde todos los unos son representados por un nivel positivo de voltaje y todos los ceros por el contrario son representados por un nivel negativo de voltaje, así como de un láser de onda continua (CW) y de un modulador de amplitud Mach-Zehnder. El componente que simula la información es el generador aleatorio de señal. Para armar el transmisor, se utilizó una secuencia determinística, con una velocidad de transmisión de 10 Gbps. Este generador se conecta a la entrada del codificador NRZ, de la salida de este último se conecta a un modulador de amplitud Mach-Zehnder para generar una señal óptica. (Beeram, 2010, pág. 27)



Otro de los elementos utilizados en el bloque transmisor es el láser de onda continua el cual es usado para generar la onda de la señal de luz óptica. Su longitud de onda, frecuencia y potencia de la señal se establecen en este bloque. El láser también se conecta al modulador de amplitud para generar la señal que se transmitirá.

La figura 7 muestra el grupo de 8 emisores que conforman el primer bloque de transmisores de la red TDM-PON. Todos estos emisores se enlazan en un AWG\_MUX\_1 que enviará los datos de todos los emisores por un único canal. Cada uno de los láser de los 8 emisores se encuentran configurados a una frecuencia de 192,7 THz, y sus respectivos generadores aleatorios de señal se encuentran configurados para que envíen un solo dato y de esta manera simular los 8 datos correspondientes al primero de los ocho bloques transmisores.



La red TDM-WDM-PON está constituida por 8 bloques transmisores TDM-PON como se mencionó anteriormente, cada uno de estos bloques transmisores TDM-PON trabajan a diferentes frecuencias como se muestra en la tabla 1, con un espaciamiento de 100 GHz por grupo.

Tabla 1.

*Frecuencias para cada bloque de trasmisión TDM-PON.*

<b>Número del grupo TDM</b>	<b>Frecuencia [THz]</b>
1	192.7
2	192.8
3	192.9
4	193.0
5	193.1
6	193.2
7	193.3
8	193.4

Nota. Elaborado por: Daniel Proaño.

En la figura 8 se observa la secuencia de los 8 bloques transmisores con su correspondiente frecuencia y los cuales se conectan en una AWG\_MUX\_2 posibilitando la propagación de los datos de los 64 usuarios hacia la próxima etapa de la red que en este caso es el enlace de fibra.

Bloques transmisores de la red.

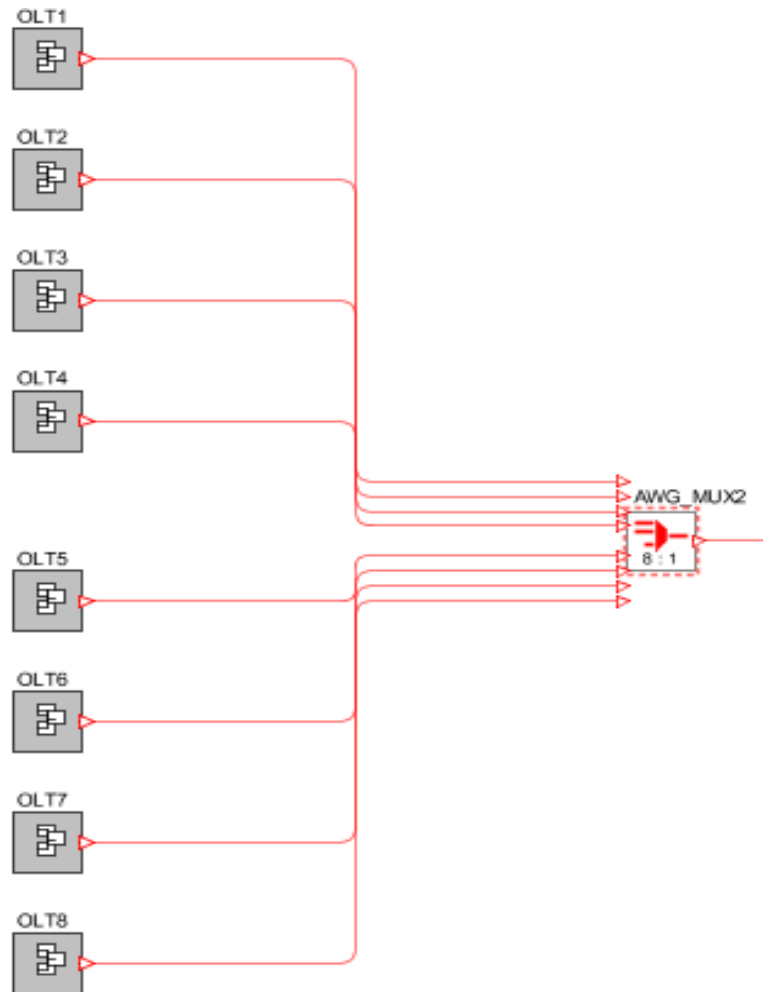


Figura 8. Bloques transmisores TDM-WDM.

Elaborado por: Daniel Proaño

### 3.1.2 Enlace de fibra óptica

La señal de salida que es producto del AWG\_MUX\_2 se une a un enlace de fibra óptica. Este enlace está conformado por un amplificador óptico de ganancia constante a 10 dB, compuesto de los parámetros que constan en la tabla 2. A la salida de la fibra óptica se conecta a una fibra compensadora de dispersión o ideal grating.

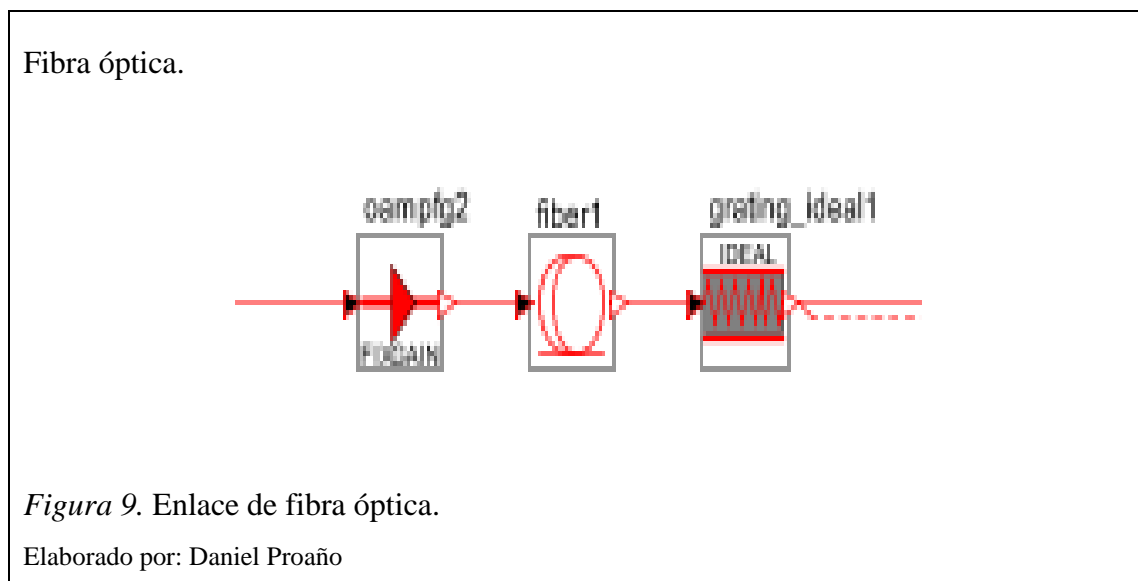
Tabla 2.

*Parámetros de la fibra que son utilizados en la simulación.*

Parámetro	Valor
Longitud	20 Km
Perdidas por atenuación	0,2 dB/Km
Dispersión	-20 ps <sup>2</sup> /Km
Dispersión cromática	16 ps/nm/km

Nota. Elaborado por: Daniel Proaño.

En la figura 9 se observa el enlace de fibra óptica.



### 3.1.3 Bloque receptor

Las señales que dejan la fibra compensadora ingresan a un AWG\_DEMUX, este permite distribuir en ocho señales iguales, cada una de estas se conecta a un filtro óptico tipo pasa banda (a 50GHz) y luego de pasar por este último se conecta a cada bloque receptor WDM-TDM-PON como se muestra en la figura 10.



Bloques receptores.

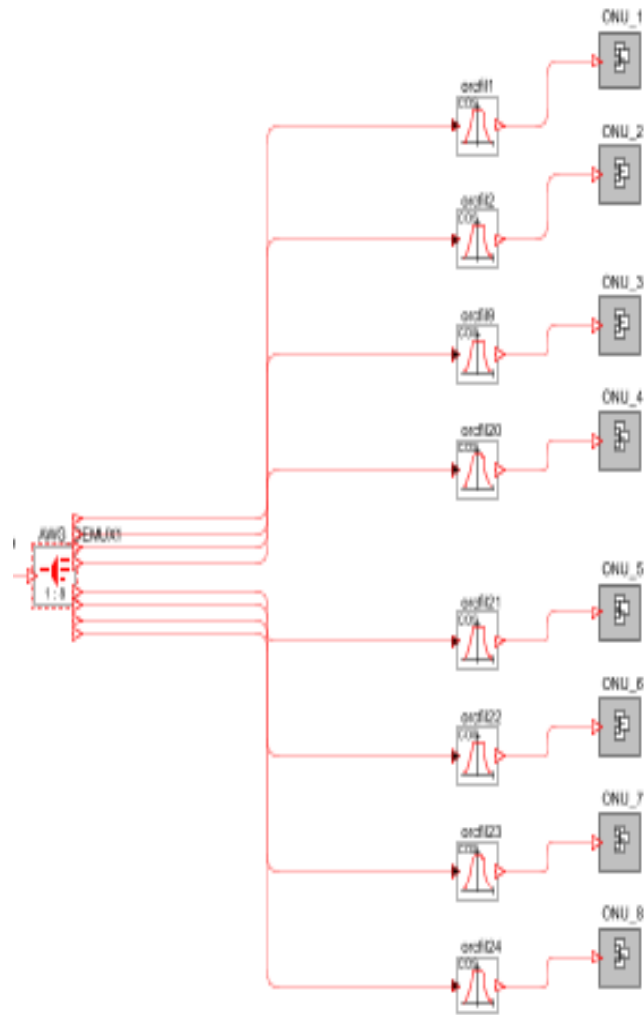


Figura 10. Bloque receptores WDM-TDM-PON.

Elaborado por: Daniel Proaño.

Cada una de las señales que han pasado el filtro óptico entra a sus respectivos bloques receptores. Al interior de cada bloque receptor se encuentra un AWG\_DEMUX el que

divide la señal para cada uno de los 8 receptores que conforma uno de los 8 bloques receptores, como se observa en la figura 11.

Interior del primer bloque receptor.

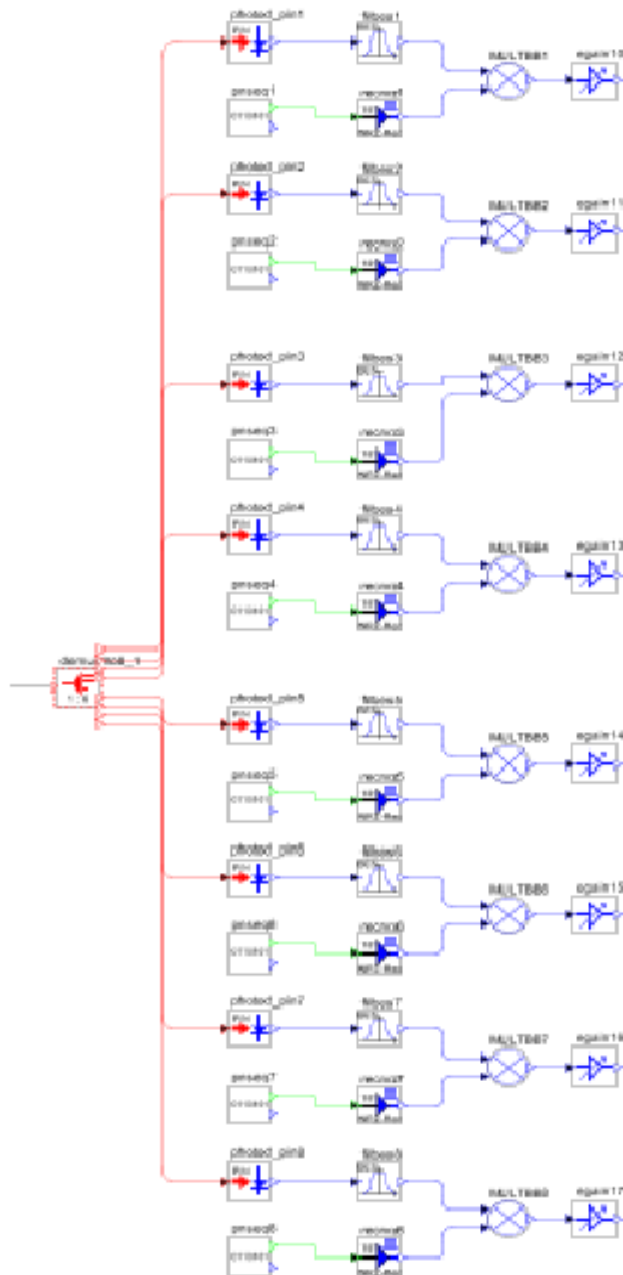
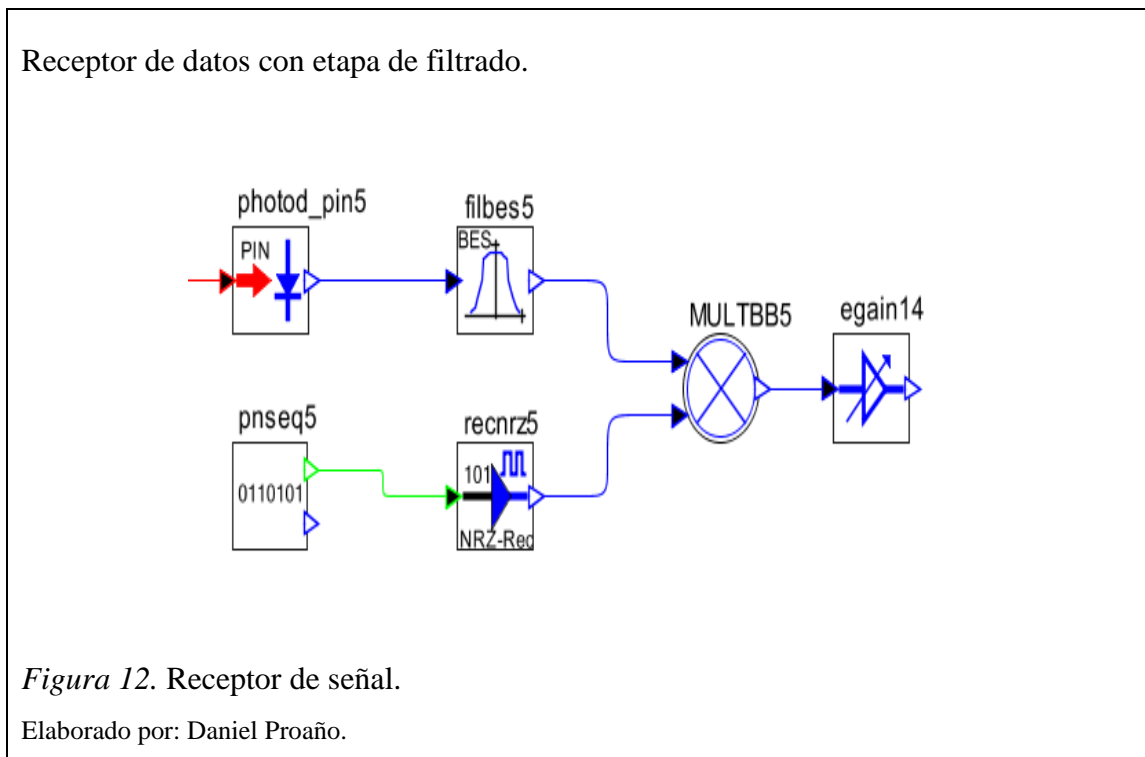


Figura 11. Interior de un bloque receptor TDM.

Elaborado por: Daniel Proaño.

La figura 12 muestra como está conformado cada receptor, empezando por un fotodiodo PIN que convierte la señal óptica en señal eléctrica, seguido de un filtro eléctrico Bessel tipo pasa bajos con un ancho de banda del doble de la velocidad de transmisión y que tendrá el trabajo de filtrar la señal original si existiera ruido. Así como de un generador aleatorio de datos configurado a la misma velocidad con la que son transmitidos los datos (10Gbps), luego se encuentra un codificador NRZ (No Return to Zero), donde estas señales ingresan a un multiplicador para el filtrado del dato correspondiente a cada usuario final, y finalmente un amplificador eléctrico con ganancia de 52 dB.



## CAPÍTULO 4

### PRUEBAS, RESULTADOS Y CÁLCULOS DE POTENCIA

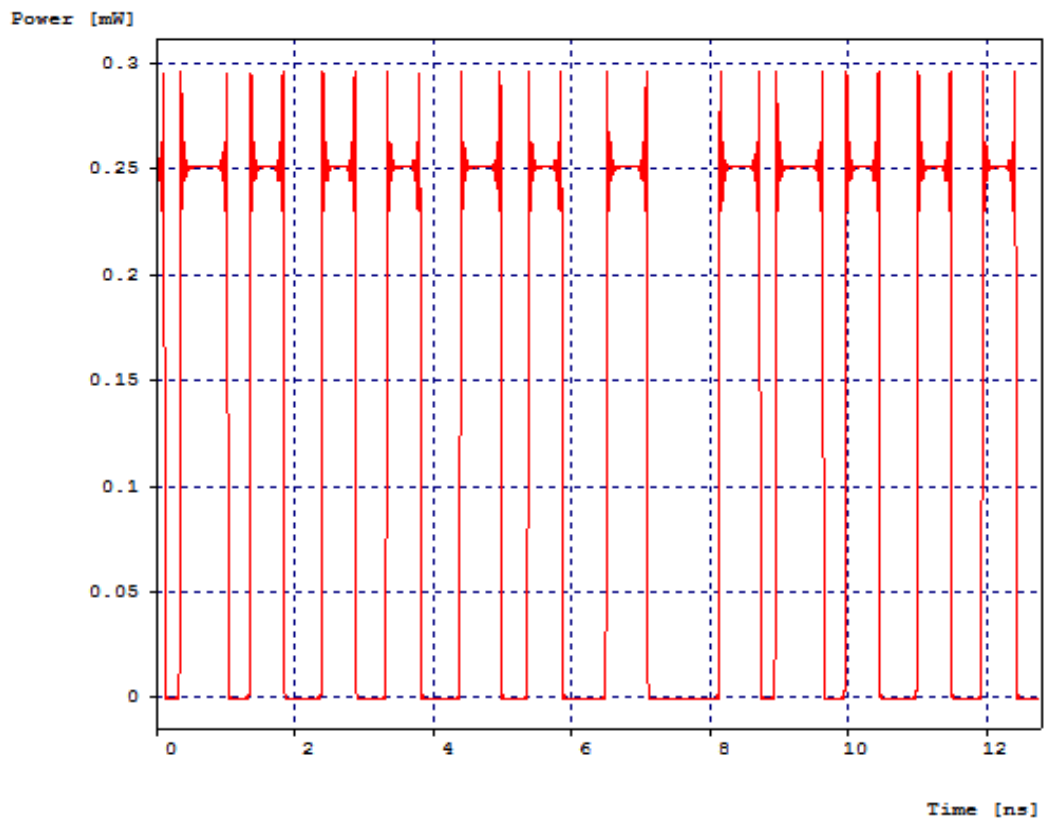
Este capítulo detalla las pruebas y resultados que se obtuvieron sobre la red híbrida TDM-WDM-PON sin efectos y con efectos no lineales causados por la variación del índice de refracción, en particular: la modulación cruzada de fase y el mezclado de cuatro ondas, también se realizará el cálculo de las pérdidas de potencia durante la transmisión de información.

#### **4.1 Pruebas de la red TDM-WDM-PON sin efectos no lineales causados por la variación del índice de refracción.**

Se empezará mostrando el comportamiento de los datos en cada una de las etapas de la red TDM-WDM-PON durante su trayecto desde los transmisores hasta su punto final en los receptores.

Al interior de cada bloque transmisor se generan los ocho datos. La figura 13 muestra estos datos, los cuales son producidos individualmente por los ocho emisores. Posteriormente se unirán en un solo conjunto de datos utilizando la técnica TDM dentro del AWG\_MUX\_1. Este tipo de señal es de color roja (color definido por el software) al ser una señal óptica ya que fue producida por los laser dentro del bloque transmisor.

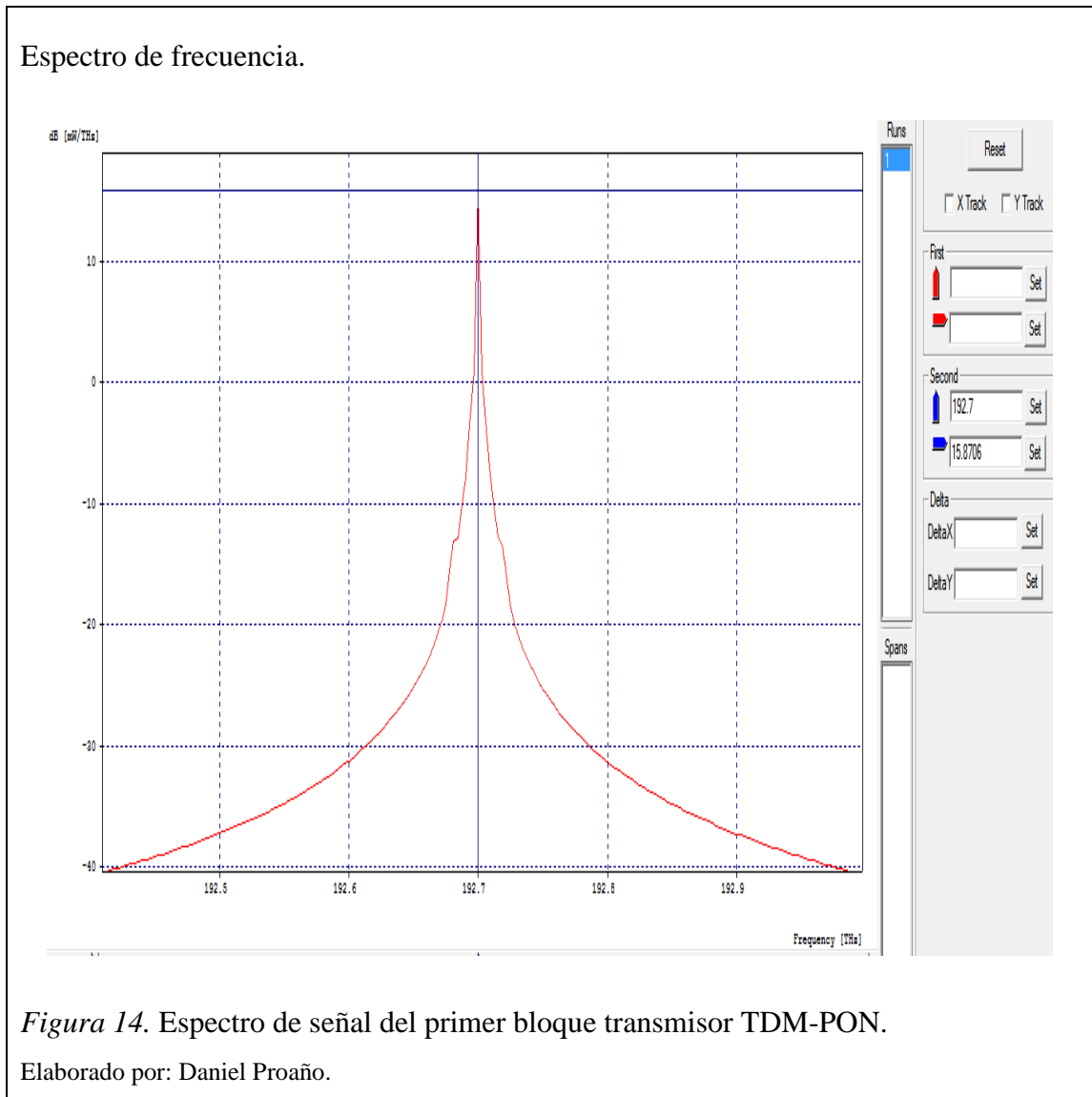
Datos generados.



*Figura 13.* Conjunto de datos generados en el bloque transmisor.

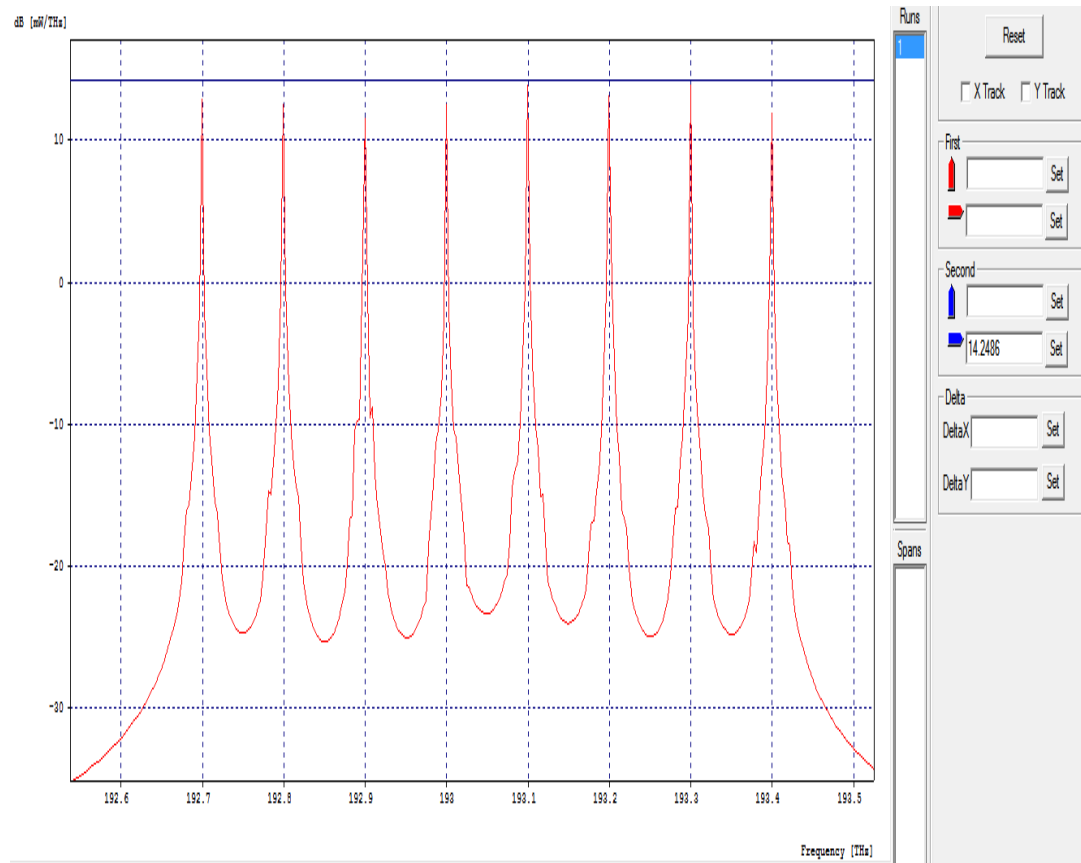
Elaborado por: Daniel Proaño.

La figura 14 muestra el espectro de señal del primer bloque transmisor TDM-PON con una frecuencia de  $\lambda_1 = 192.7 THz$ , esta frecuencia es común para los ocho datos generados en la figura anterior y se observa que tienen una potencia inicial de 15.8706 dB.



Ahora es necesario mostrar el grupo de 8 frecuencias que conforman la red, y esto se observa en la figura 15. Donde se muestra el grupo que contienen los datos de los 64 usuarios de la red TDM-WDM-PON. Esta imagen es tomada a la salida del AWG\_MUX\_2 de la red, antes de ingresar al enlace de fibra óptica, es decir que aún no se encuentra amplificada y por lo tanto no presenta ruido por causa de su propagación dentro de la fibra. Su potencia es de 14.2486 dB.

### Grupo de 8 frecuencias.

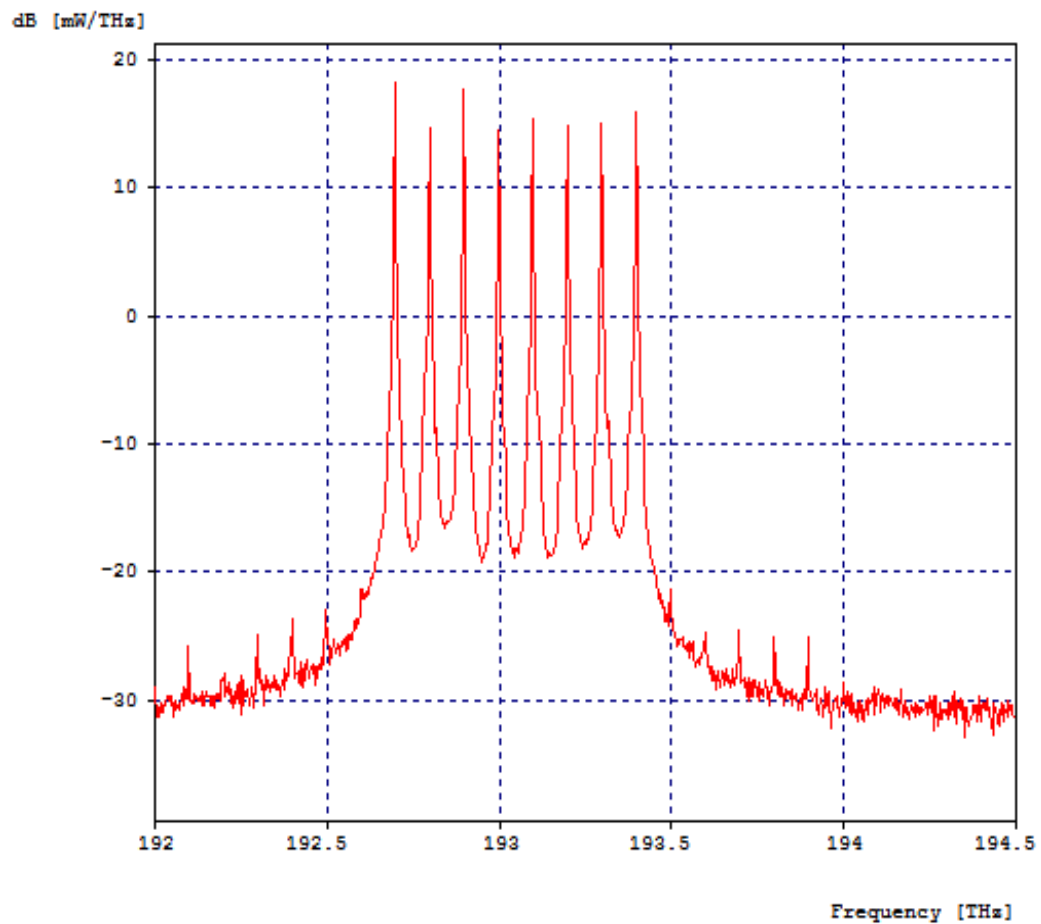


*Figura 15.* Grupo de espectro de frecuencias TDM-WDM-PON.

Elaborado por: Daniel Proaño.

En el espectro siguiente de la figura 16, se muestra el grupo de frecuencias luego de atravesar el enlace de fibra óptica donde su potencia aumentó hasta los 20 dB, con respecto a la de la figura anterior debido al amplificador óptico que se encuentra en el enlace de fibra. Además se puede notar el ruido que aparece en la misma figura.

Grupo de frecuencia después de la fibra.



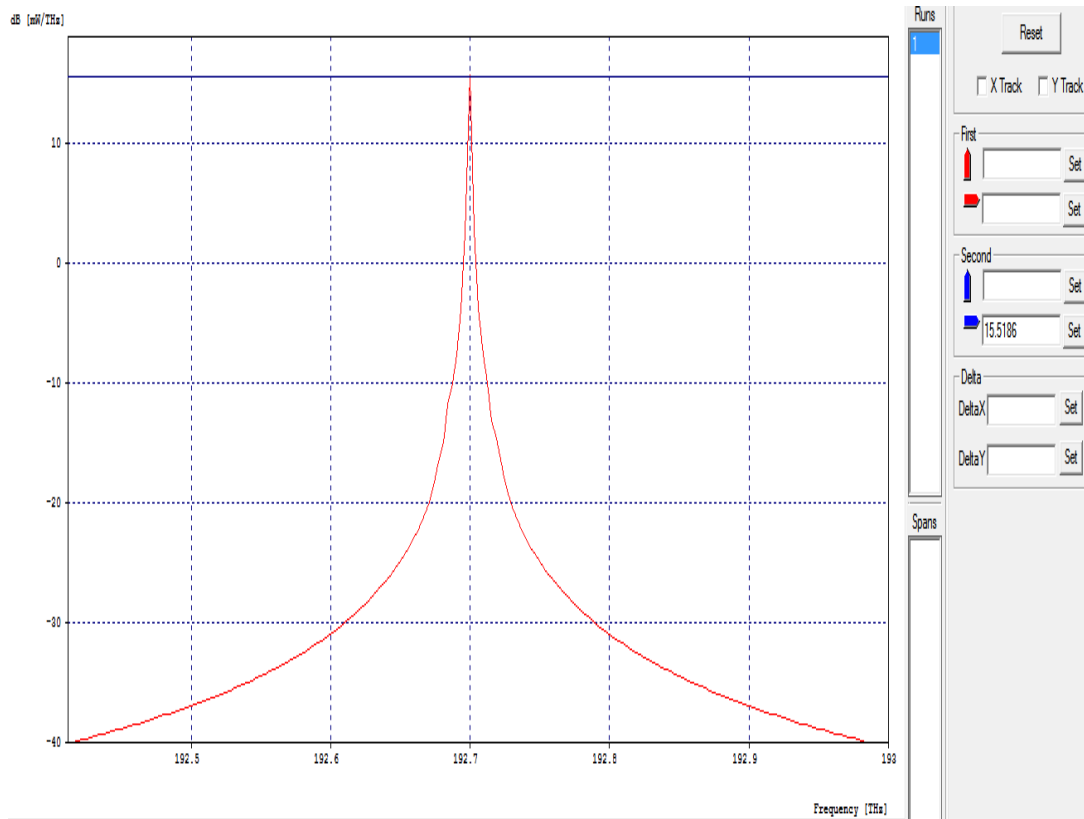
*Figura 16.* Espectro de frecuencia a la salida del enlace de fibra óptica.

Elaborado por: Daniel Proaño.

El espectro de frecuencia que se tiene a la salida del primer filtro óptico es el que se observa en la figura 17 y que tendrá como frecuencia centrada  $\lambda_1 = 192.7 THz$  para filtrar únicamente a los datos correspondientes al primer bloque receptor y cuya potencia de salida es de 15.5186 dB.



### Frecuencia en el primer receptor.

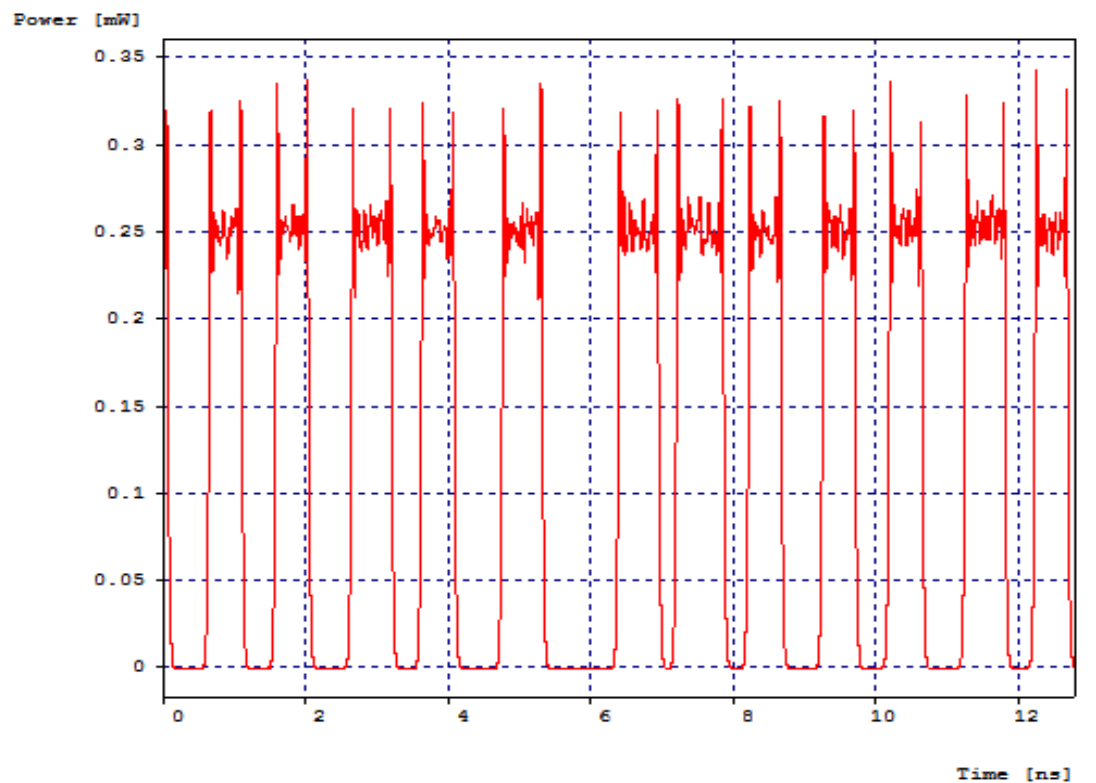


*Figura 17.* Espectro de frecuencia dedicado para el primer grupo receptor.

Elaborado por: Daniel Proaño.

Mientras que la figura 18 muestra el estado de los datos al ingresar al bloque receptor y antes de ser convertidos a señal eléctrica.

### Datos ópticos.

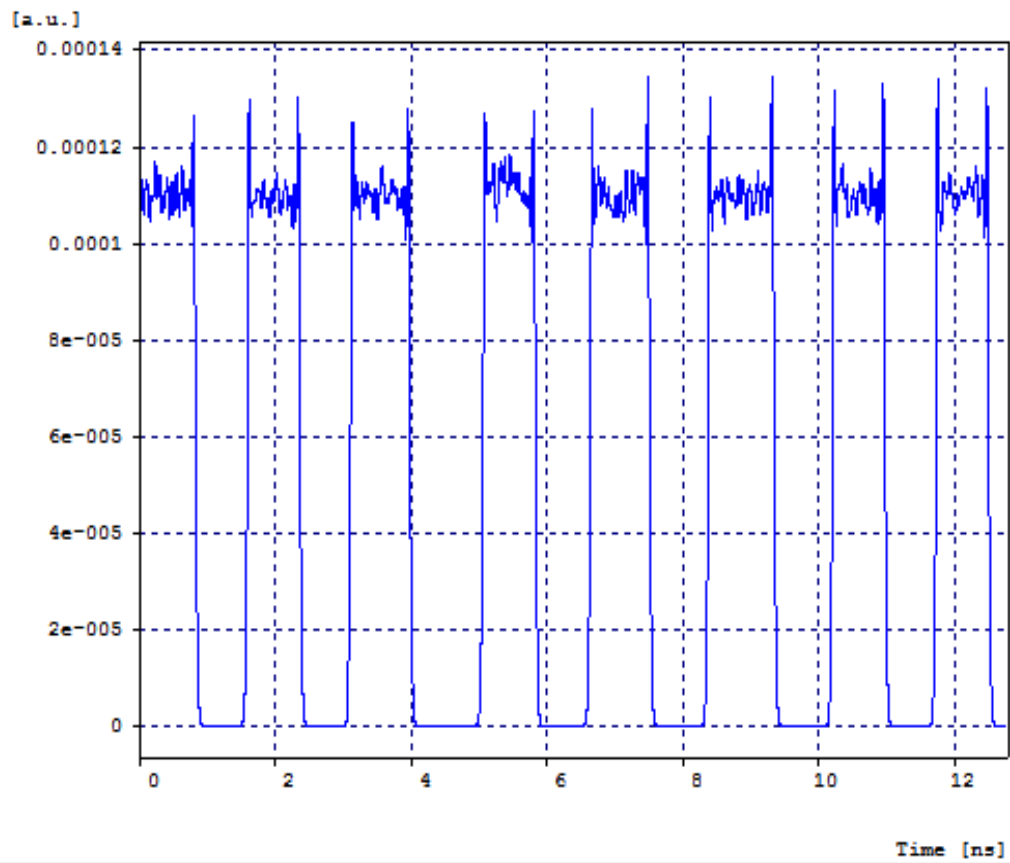


*Figura 18.* Datos recibidos a la salida del filtro óptico del bloque receptor.

Elaborado por: Daniel Proaño.

La señal que pasa por el filtro óptico entra al receptor, el receptor utiliza un diodo PIN que convertirá la señal óptica en señal eléctrica y es esta última es la que se observa en la figura 19. Los datos en el receptor tienen un desfase con respecto a los datos en el transmisor si se los compara con la señal de entrada de la figura 13.

Datos eléctricos.



*Figura 19.* Datos recibidos.

Elaborado por: Daniel Proaño.

En la figura 20 se muestra el diagrama del ojo en el receptor, con un Jitter de 0.0230842 [ns], una tasa de bit errado (BER) con un valor de  $1.95031 \times 10^{-14}$  y por último un factor de calidad (Q factor) de 17,576879 [dB].

Diagrama de ojo.

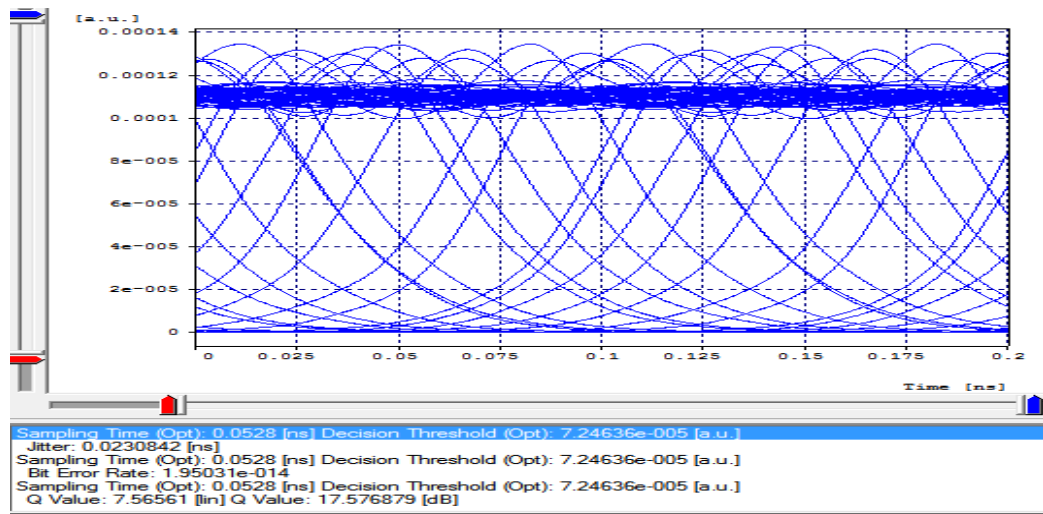


Figura 20. Diagrama de ojo de la señal recibida.

Elaborada por: Daniel Proaño.

En la figura 21 se muestra el dato filtrado para un único usuario.

Dato del primer usuario.

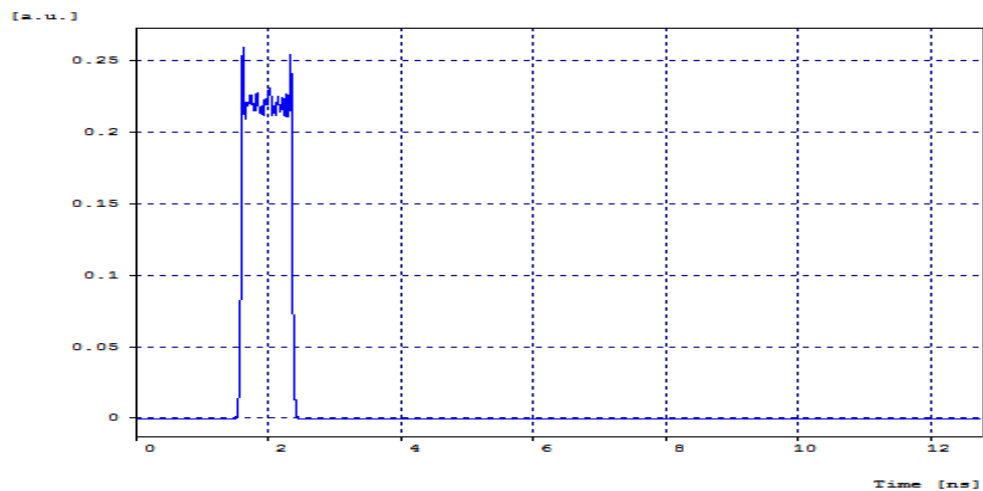


Figura 21. Dato filtrado para el primer usuario.

Elaborado por: Daniel Proaño.

En la figura 22 se observa el diagrama de ojo para un único usuario a la salida del receptor, el BER tiene un valor de  $1 \times 10^{-40}$ , el factor de calidad (Q factor) posee un valor de 31.612844 [dB] y por último el desfase o Jitter igual a 0,0193195 [ns].

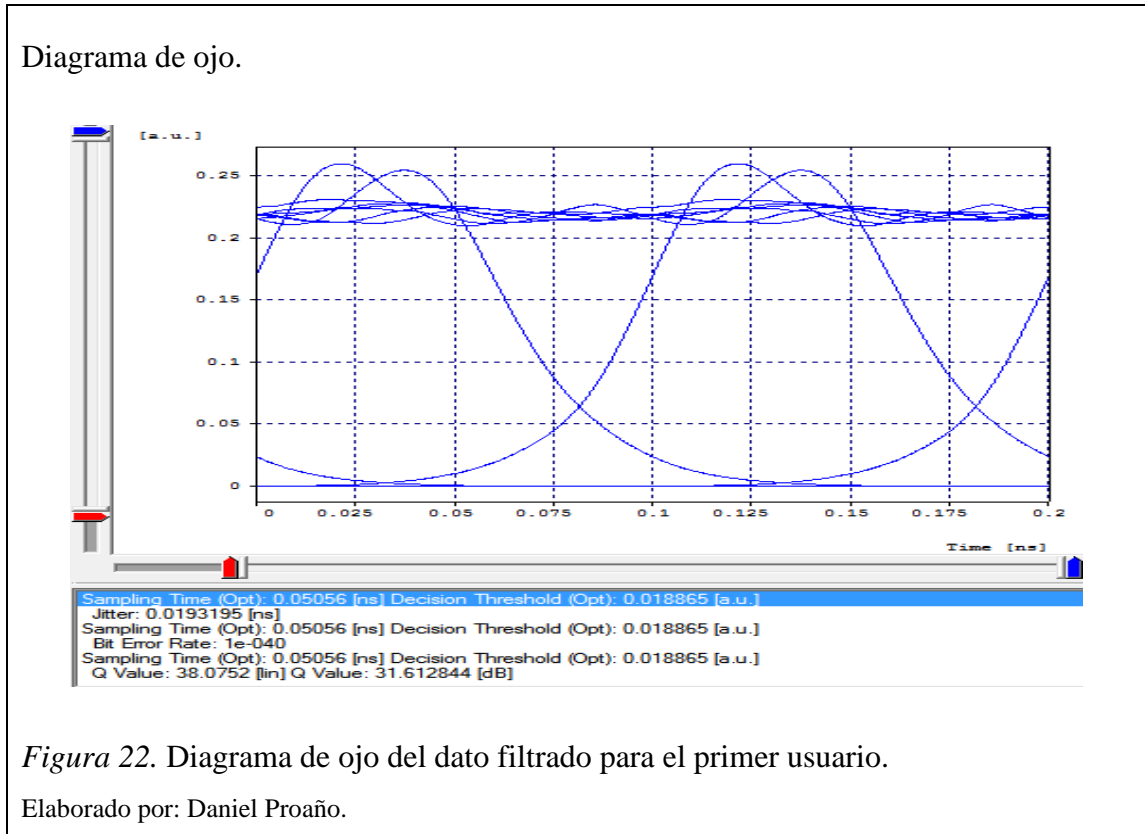


Figura 22. Diagrama de ojo del dato filtrado para el primer usuario.

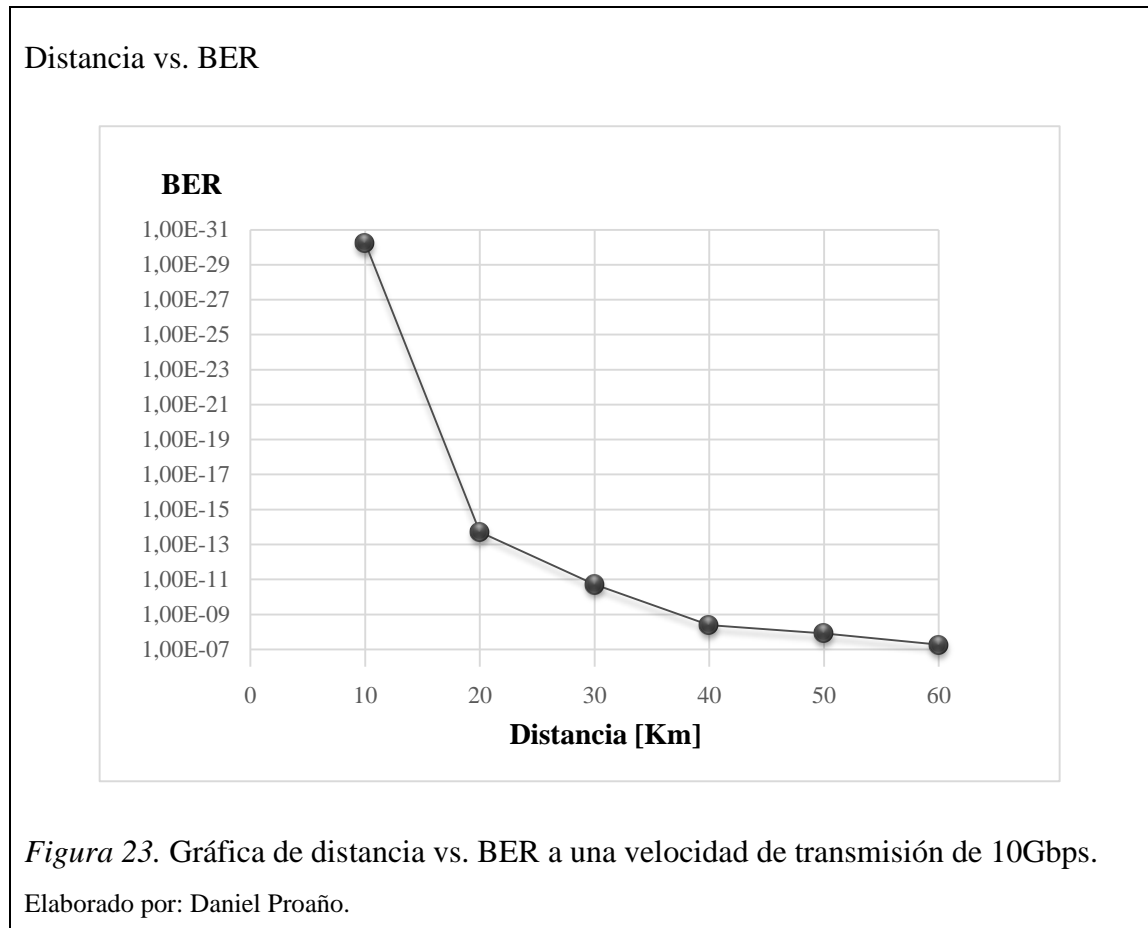
Elaborado por: Daniel Proaño.

#### 4.1.1 Resultados de la Red TDM-WDM-PON sin efectos causados por la variación del índice de refracción.

En la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos de la red TDM-WDM-PON sin efectos causados por la variación del índice de refracción y que contienen las siguientes gráficas:

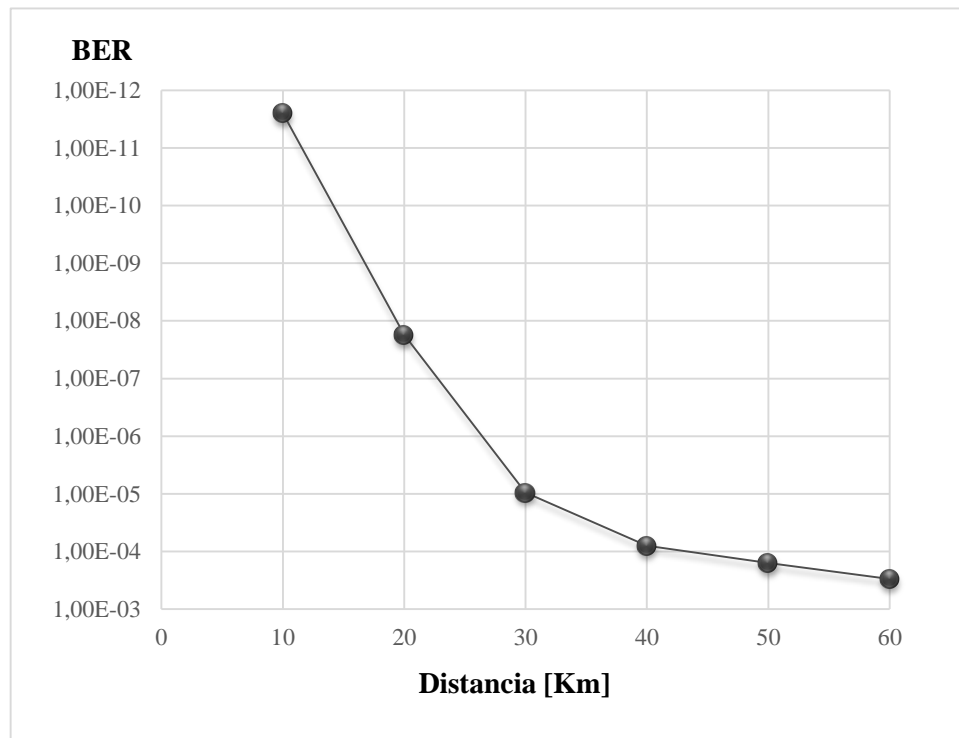
- Potencia recibida vs. BER.
- Distancia vs. BER.
- Velocidad de transmisión vs. Distancia.
- Potencia recibida vs. Distancia.

La figura 23 muestra la relación entre la distancia y el BER que se da en la transmisión de información y muestra que surge un aumento de la tasa de bits errados (BER), con respecto al aumento de la distancia de fibra óptica. Los datos que se presentan fueron simulados a una velocidad de 10Gbps.



La figura 24 muestra la gráfica de distancia vs. BER pero con una velocidad de 20Gbps y de manera similar a la figura 22 se observa que la tasa de bits errados se ve afectada a medida que la distancia del enlace de fibra óptica crece. Esto se debe a que los receptores no consiguen una lectura clara de los datos transmitidos.

### Distancia vs. BER

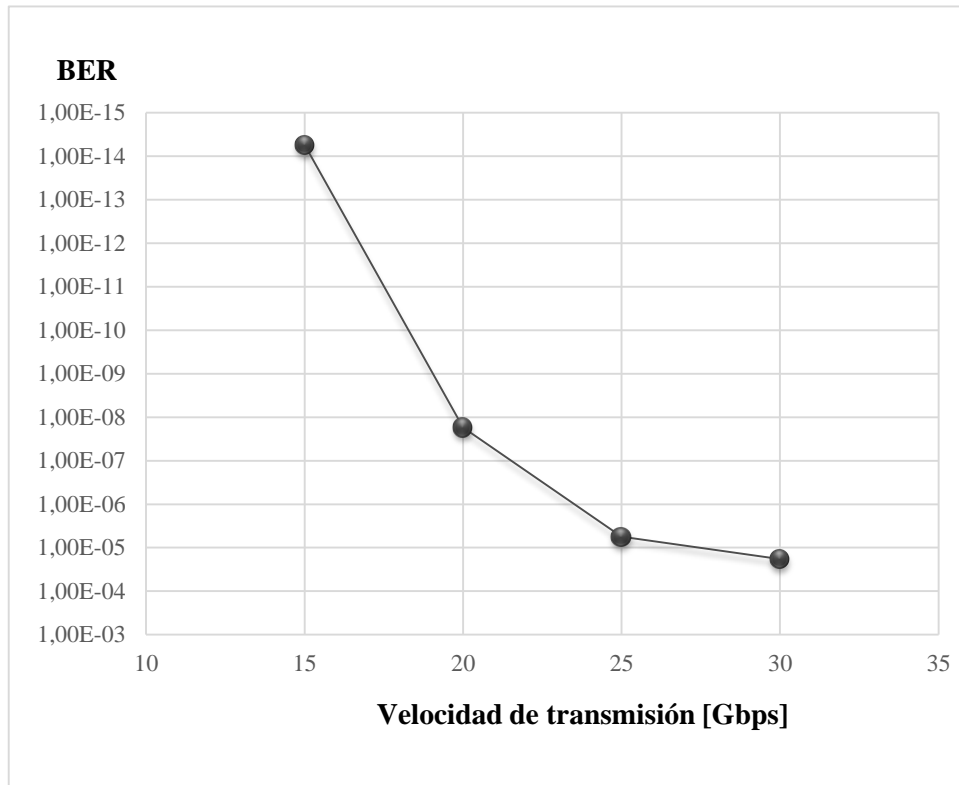


*Figura 24.* Gráfica de distancia vs. BER a una velocidad de transmisión de 20Gbps.

Elaborado por: Daniel Proaño.

La gráfica de velocidad de transmisión vs. BER se observa en la figura 25, con una longitud constante para esta prueba de 20Km y donde la variación en la velocidad de transmisión se fue incrementando desde los 10Gbps hasta los 30Gbps. Se nota que la tasa de bits errados elevó su valor al aumentar la velocidad en la transmisión y es por ello que en el intervalo de 25Gbps hasta los 30Gbps los componentes que se encuentran en el receptor son incapaces de distinguir los datos, lo que ocasiona que la tasa de bits errados aumente hasta un valor no aceptable en redes ópticas el cual es  $1 \times 10^{-7}$ .

### Velocidad de transmisión vs. BER



*Figura 25.* Gráfica de velocidad de transmisión vs. BER a una velocidad de 10Gbps.

Elaborado por: Daniel Proaño.

En la figura 26 se muestra la gráfica de distancia vs. BER en la red TDM-WDM-PON, con una velocidad en la transmisión de 30Gbps. Se observa como el BER (tasa de bits errados) crece en su valor con relación al aumento en la distancia en el enlace de fibra óptica.



### Distancia vs. BER

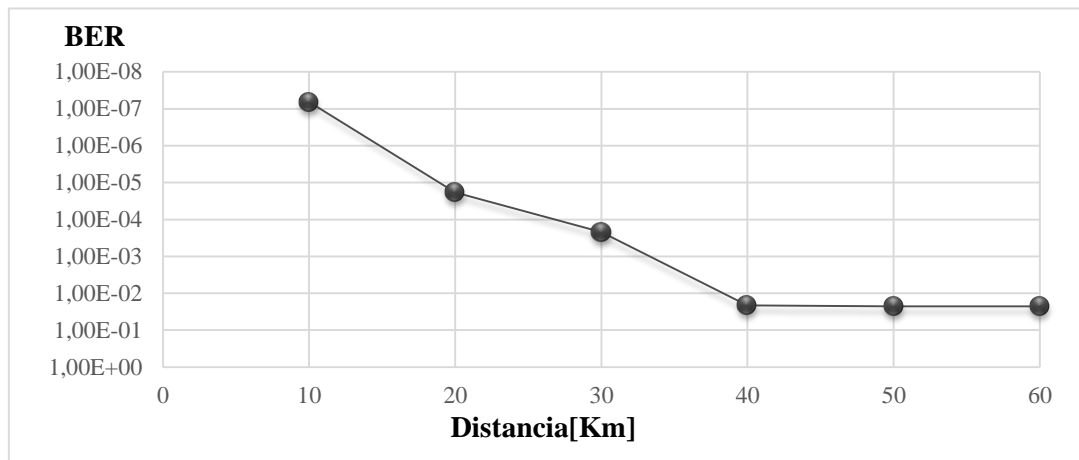


Figura 26. Gráfica de distancia vs. BER a una velocidad de 30Gbps.

Elaborado por: Daniel Proaño.

Por otra parte la figura 27 muestra la potencia recibida.

### Distancia vs. Potencia recibida

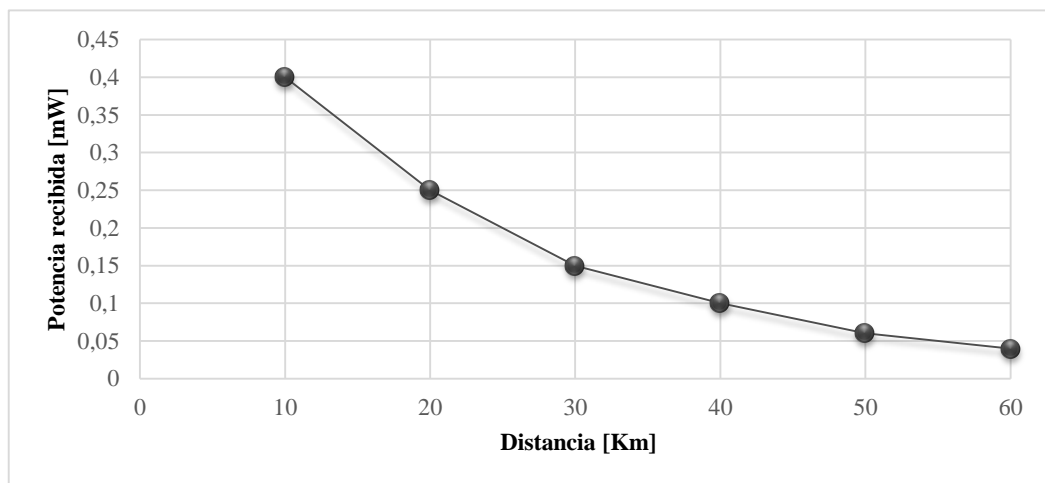
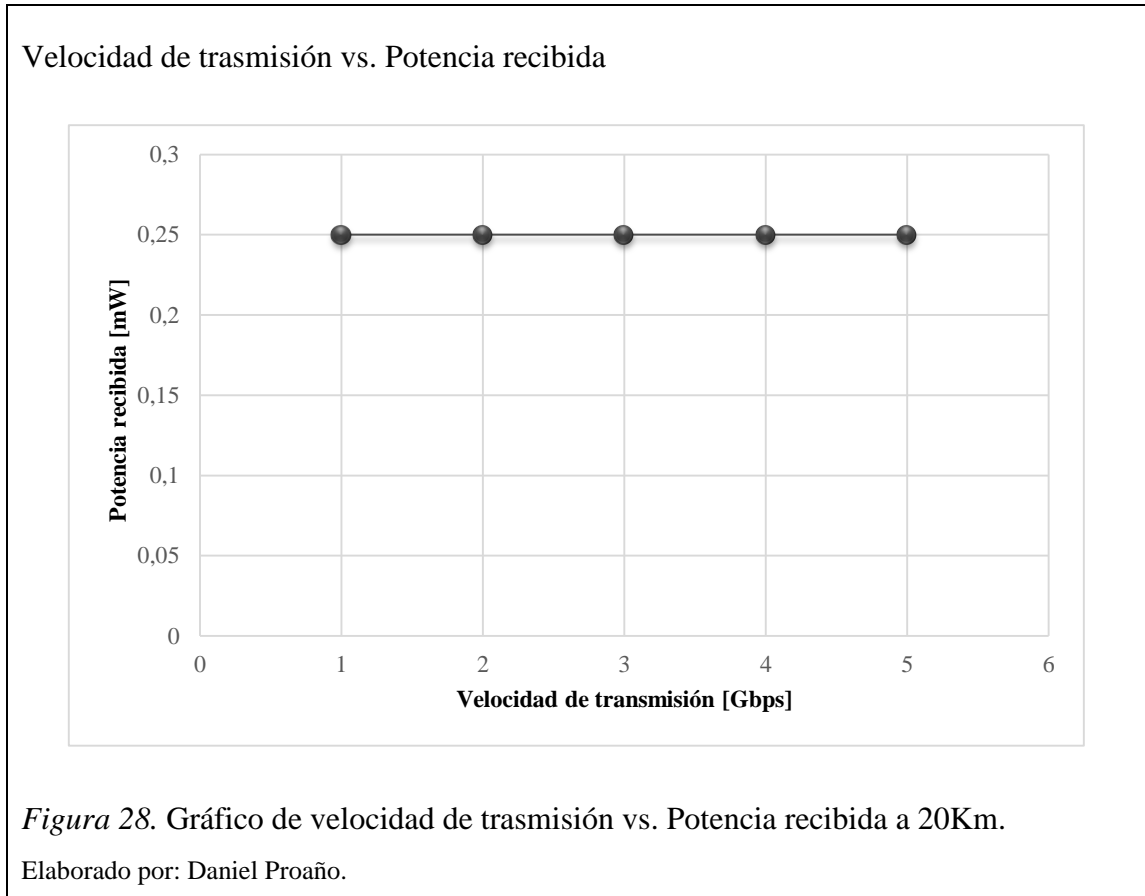


Figura 27. Gráfica de distancia vs. Potencia recibida, con una velocidad de transmisión de 10Gbps.

Elaborado por: Daniel Proaño.

En la figura 28 muestra como al aumentar la velocidad en la transmisión de datos la potencia recibida no se ve afectada y permanece constante en 0.25mW, con una longitud estándar en la fibra de 20Km.



La figura 29 muestra la gráfica donde se observa la relación entre la velocidad de transmisión y la potencia recibida pero esta vez con pruebas realizadas a 30Km en el enlace de fibra. Donde se aprecia que la potencia recibida se conserva en 0.15mW.

Velocidad de trasmisión vs. Potencia recibida

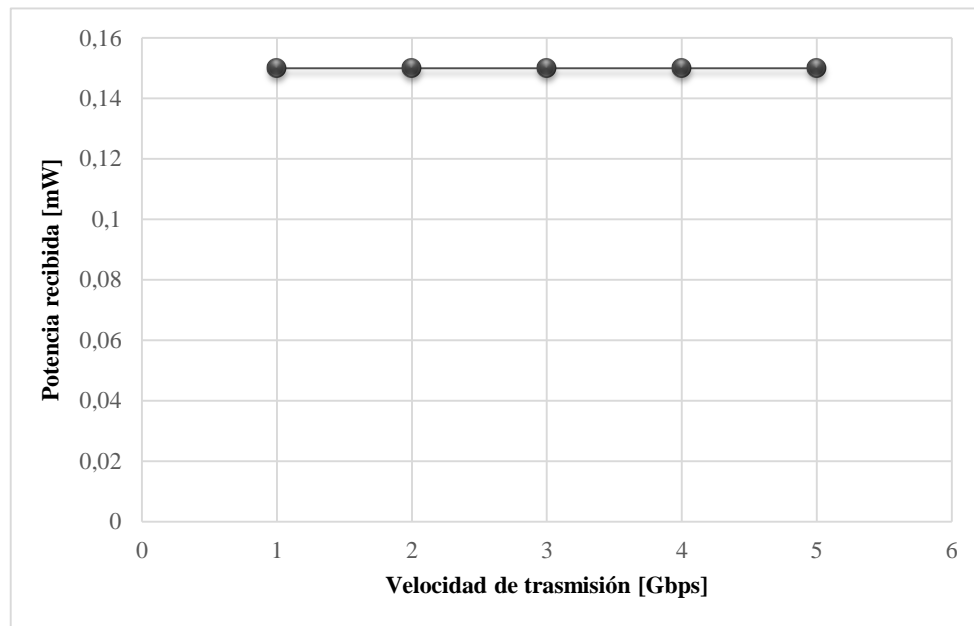


Figura 29. Gráfico de velocidad transmisión vs. Potencia recibida a 30Km.

Elaborado por: Daniel Proaño.

## 4.2 Pruebas de la red TDM-WDM-PON con efectos causados por la variación del índice de refracción.

En este apartado se describen las pruebas realizadas para evidenciar los efectos causados por la variación del índice de refracción sobre la red TDM-WDM-PON.

### 4.2.1 Efecto XPM (Modulación de fase cruzada)

El efecto de la modulación cruzada de fase se simuló realizando la variación de la dispersión cromática. Este fenómeno no lineal, provoca un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso, se presenta cuando existen dos o más canales ópticos transmitiendo de manera simultánea por la fibra óptica. Esta es una de las características que permite modificar el software OptSim dentro del enlace de fibra óptica como se muestra en la figura 30.

## Parámetros de la fibra.

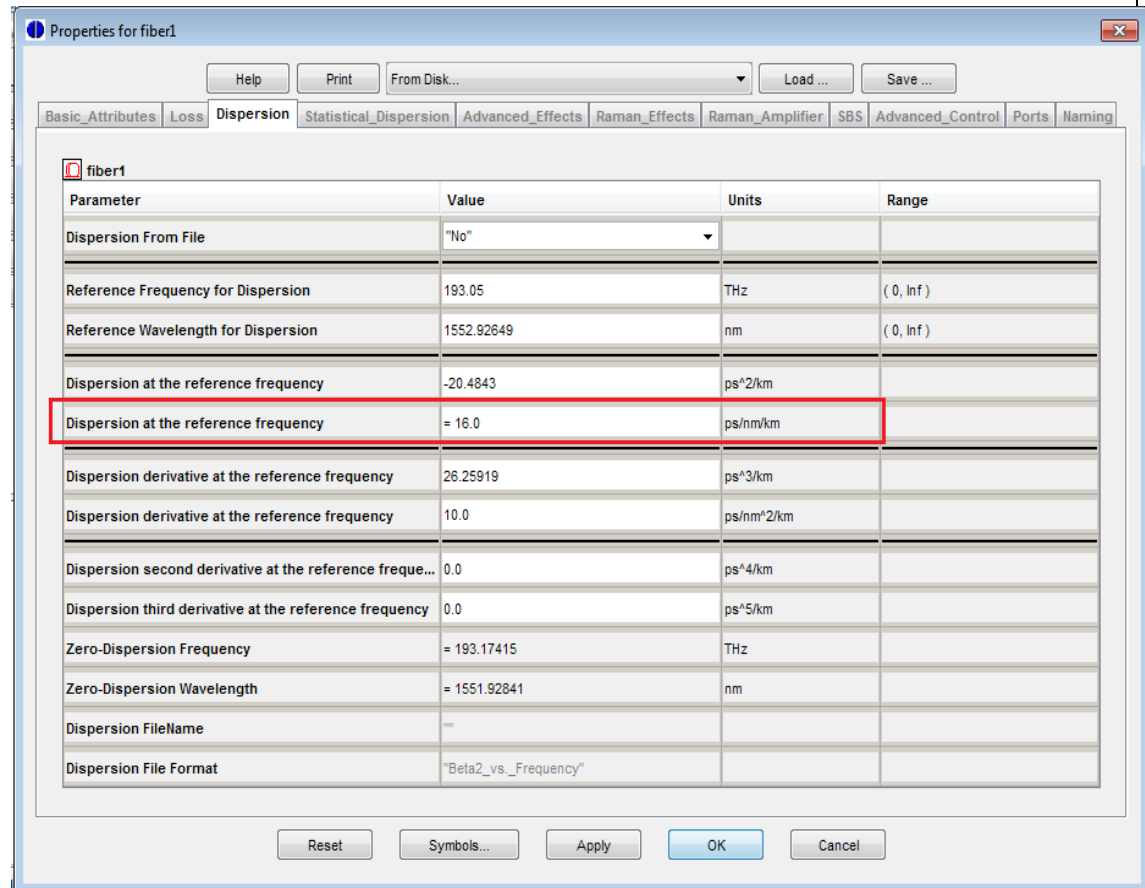


Figura 30. Pestaña dentro del bloque de fibra óptica en el software OptSim.

Elaborado por: Daniel Proaño.

Tomando como base la red TDM-WDM-PON sin efectos y para la simulación del efecto XPM fue necesario aumentar su valor de dispersión cromática desde los 0 ps/nm/km hasta llegar a los 16 ps/nm/km y de esta manera encontrar el punto crítico donde se verifica el límite para la no linealidad de la red TDM-WDM-PON (Pereda, 2004) (Jaen, 2002). Se puede observar en la figura 31, que el valor límite de dispersión con respecto al BER es de 2 ps/nm/Km, y después de este valor es que la no linealidad del efecto XPM empieza a afectar la red.

### Dispersión cromática vs. BER

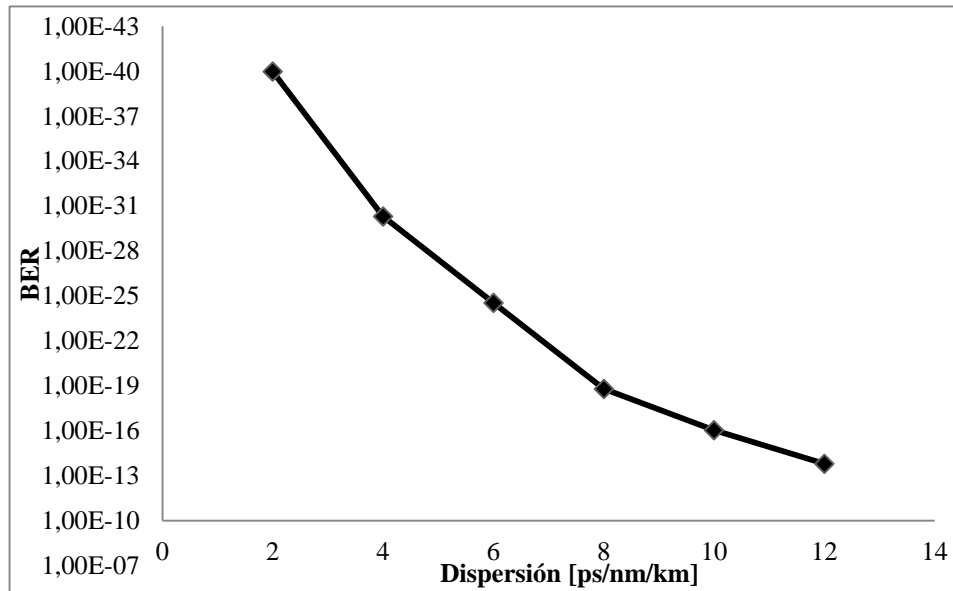


Figura 31. Gráfica de dispersión cromática vs. BER con una distancia de 10 Km y velocidad de transmisión de 10Gbps.

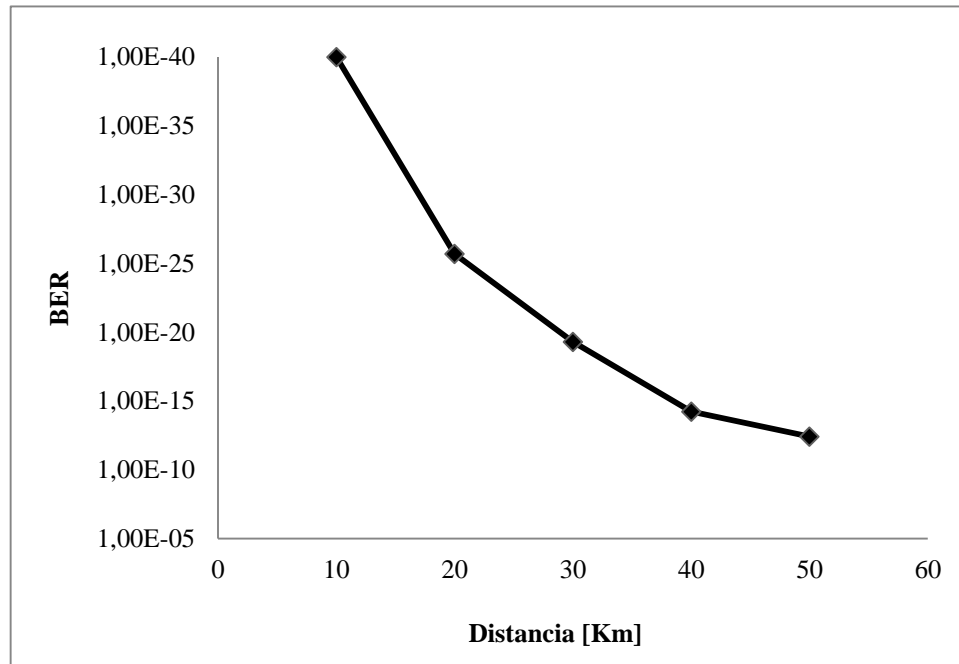
Elaborado por: Daniel Proaño.

#### 4.2.1.1 Resultados del efecto de modulación de fase cruzada (XPM).

A partir del valor de dispersión cromática de 2 ps/nm/km se realizaron las pruebas para analizar el fenómeno de XPM modificando: distancia en la fibra, velocidad de transmisión, potencia en laser de onda continua (ubicado en el bloque transmisor) y se obtuvieron los siguientes datos relevantes.

Para la primera prueba que se muestra en la gráfica distancia vs. BER, figura 32, se utilizó 1mW como potencia de entrada y una velocidad para la transmisión de datos de 10Gbps. Se verifica que al aumentar la distancia del enlace de fibra óptica la tasa de bits errados también tiende a incrementarse, pero se puede verificar que al llegar a la distancia de la fibra de 60km, el BER mantiene un valor aceptable de  $3,73 \times 10^{-13}$  para la transmisión y recepción de información en la red TDM-WDM-PON.

Distancia vs. BER



*Figura 32.* Efecto XPM – Gráfica distancia vs. BER con una velocidad de transmisión de 10Gbps.

Elaborado por: Daniel Proaño.

La figura 33 es similar a la figura anterior con la única diferencia que esta gráfica corresponde a una red TDM-WDM-PON con una velocidad de 20Gbps. Se observa que a una distancia de 60km de la fibra, la tasa de bits errados aumentó hasta los  $9,06 \times 10^{-7}$ , de tal manera que su valor no es aceptable para una transmisión en una red óptica.

Distancia vs. BER

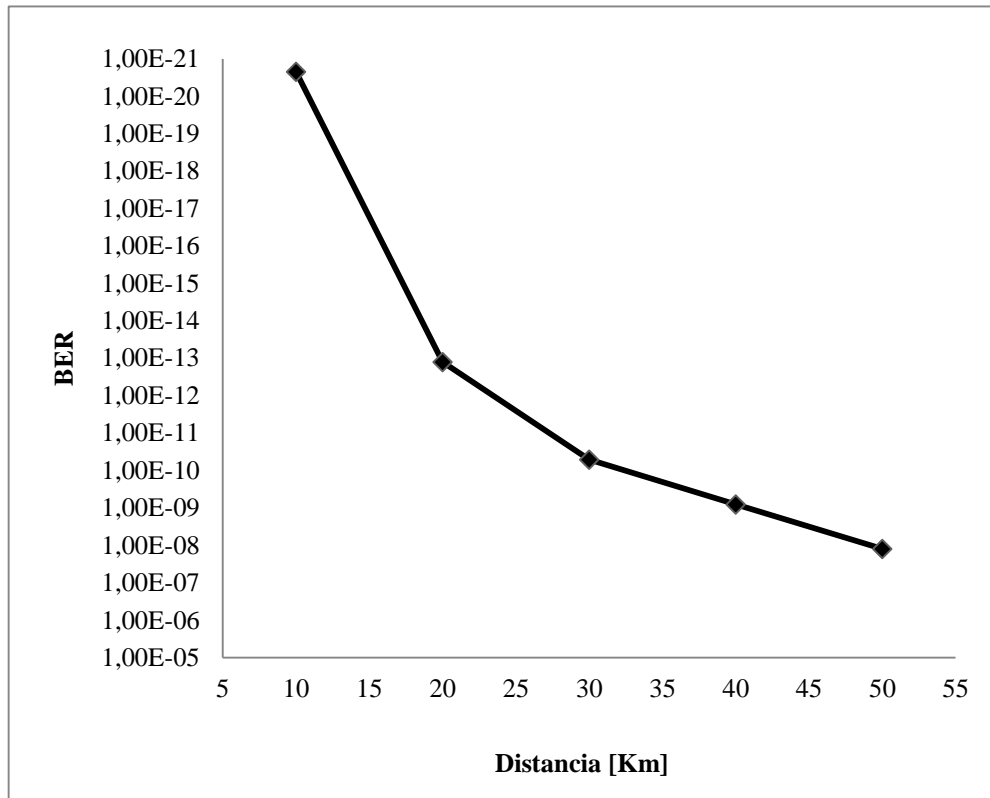


Figura 33. Efecto XPM – Gráfica distancia vs. BER con una velocidad de transmisión de 20Gbps.

Elaborado por: Daniel Proaño.

La figura 34 muestra la gráfica de la velocidad de transmisión vs BER con una distancia de 20km y una potencia de entrada de 1mW. Se puede ver la no linealidad del efecto XPM y se observa que la tasa de bits errados, intensifica su valor cuando la velocidad de transmisión también lo hace.

Velocidad de transmisión vs. BER

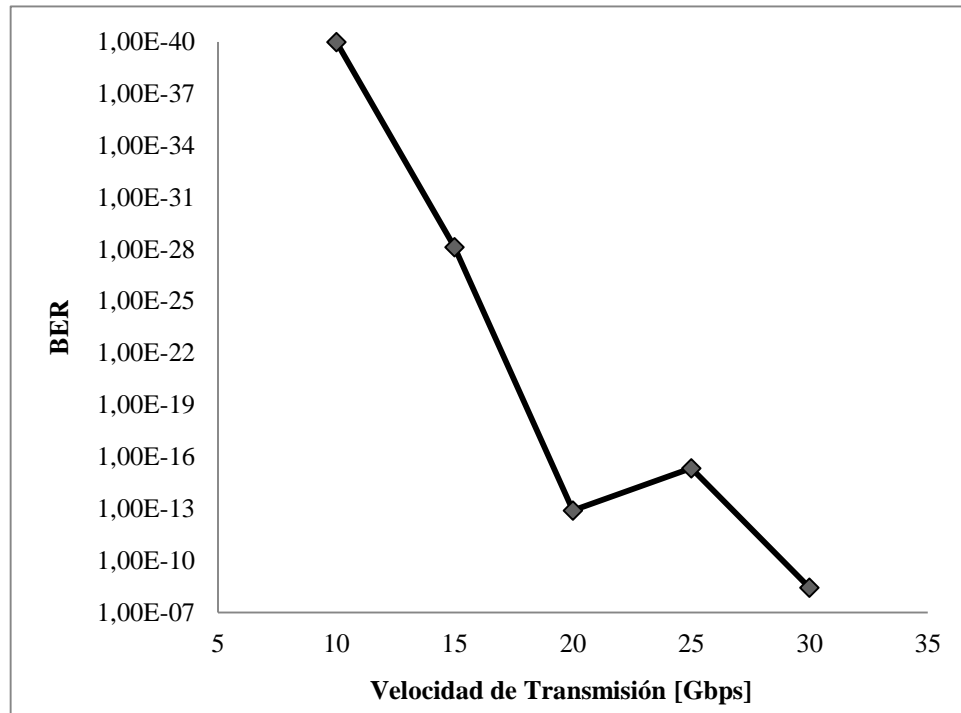


Figura 34. Gráfica de velocidad de transmisión vs. BER con 1mW de potencia de entrada.

Elaborado por: Daniel Proaño.

La figura 35 muestra la gráfica de velocidad de transmisión vs BER a 20km pero esta vez con una potencia de entrada de 30mW. Lo que genera que la tasa de bits errados tenga un comportamiento similar al caso anterior.



Velocidad de transmisión vs. BER

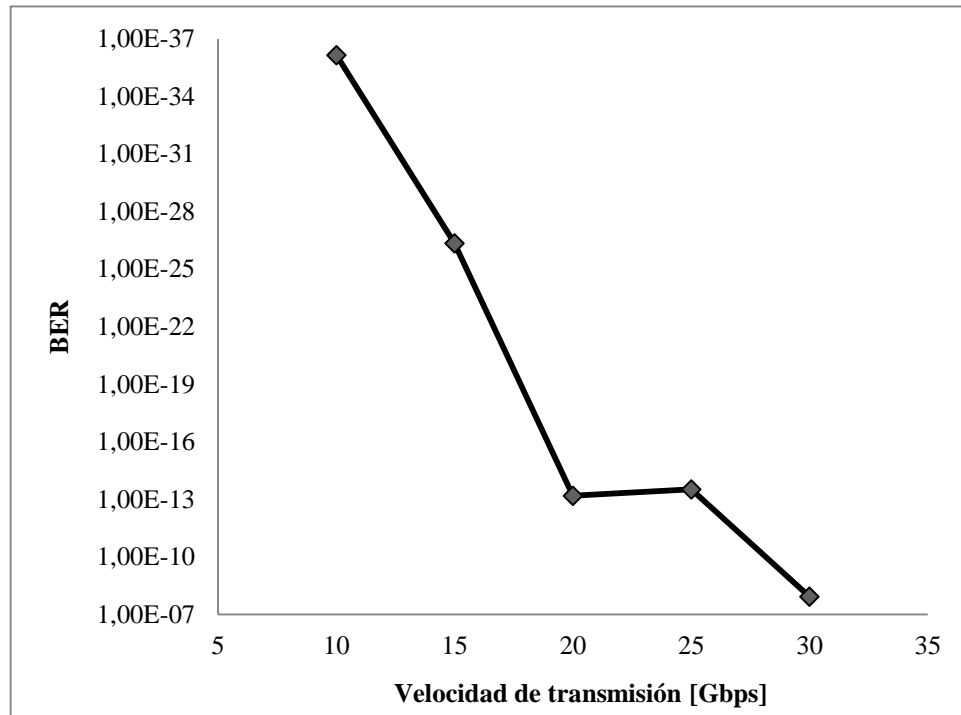


Figura 35. Gráfica de velocidad de transmisión vs. BER con 30mW de potencia de entrada.

Elaborado por: Daniel Proaño.

La figura 36 muestra la gráfica de distancia vs potencia recibida, con potencia de entrada de 1mW y velocidad de 20Gbps. Se observa la tendencia de la potencia recibida a decrecer, cuando la distancia en el enlace de fibra óptica va en aumento.

Distancia vs Potencia recibida

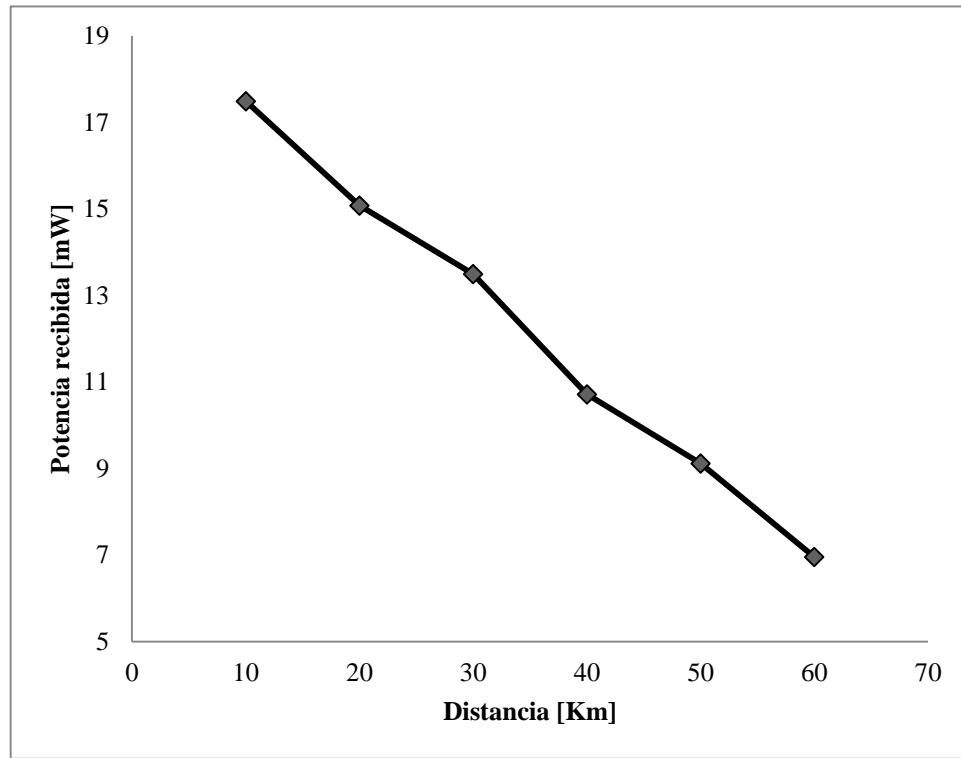


Figura 36. Gráfica de distancia vs. Potencia recibida con 1mW en la potencia de entrada.

Elaborado por: Daniel Proaño.

La gráfica 37 muestra la gráfica de distancia vs potencia recibida, con potencia de entrada de 30mW y velocidad de 20Gbps. Donde se aprecia que la potencia recibida a los 60Km es de aproximadamente 19mW y es mayor con relación a la figura 36.

Distancia vs Potencia recibida

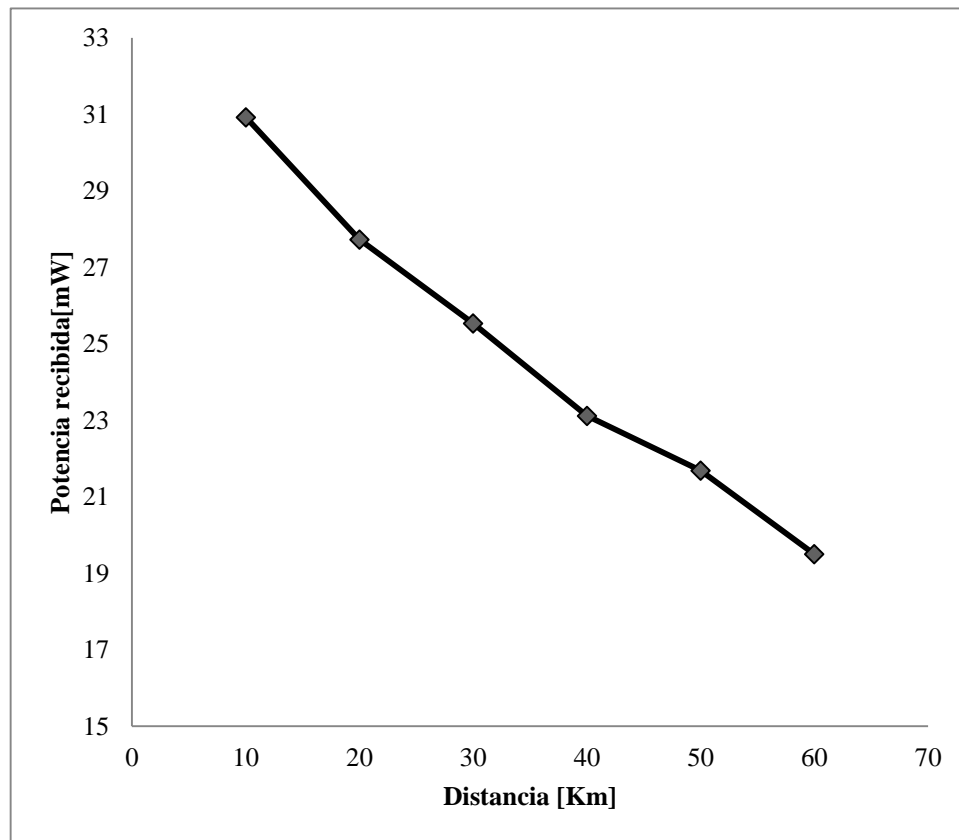


Figura 37. Gráfica de distancia vs. Potencia recibida con 30mW en la potencia de entrada.

Elaborado por: Daniel Proaño.

La figura 38, gráfica de potencia recibida vs. BER con una velocidad en la transmisión de 20Gbps y una potencia de entrada de 1mW, muestra que al tener una potencia mayor en la salida de la red TDM-WDM-PON la tasa de bits errados será menor y mejor para la transmisión.

Potencia recibida vs. BER

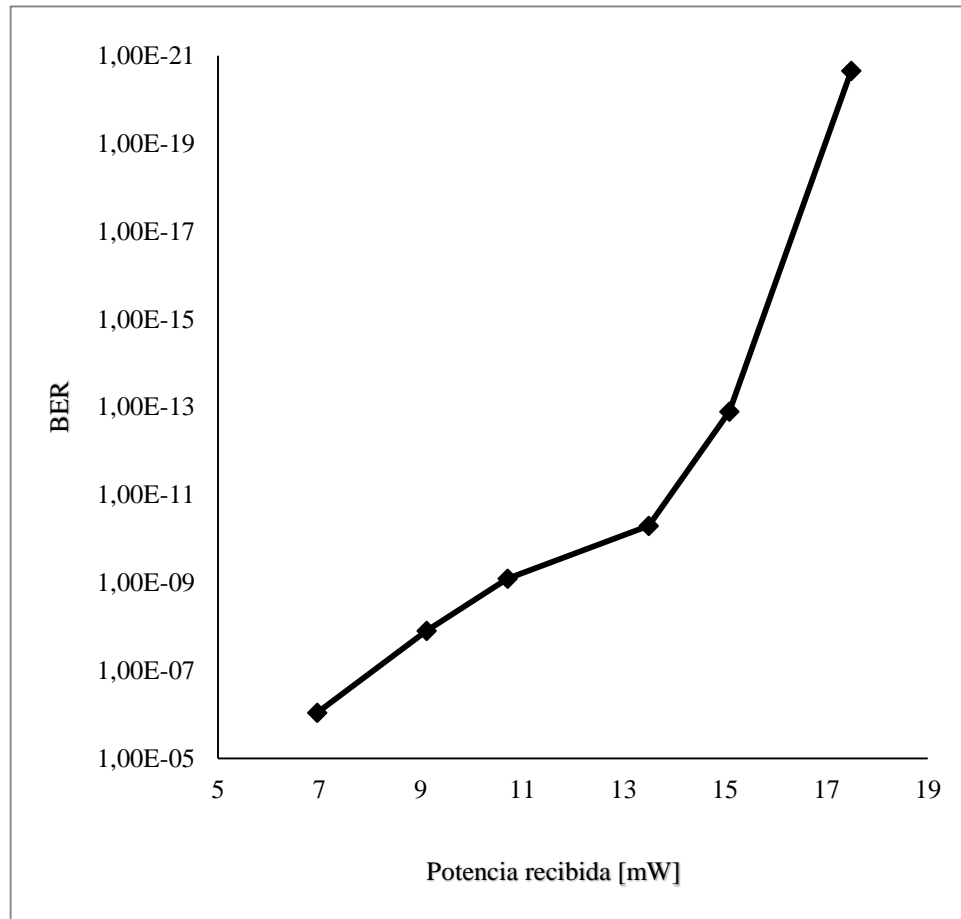


Figura 38. Gráfica de potencia recibida vs. BER con velocidad de transmisión de 20Gbps y potencia de entrada de 1mW.

Elaborado por: Daniel Proaño.

En la figura 39 se muestra el mismo tipo de fenómeno de la figura anterior, pero en este caso la simulación se realizó con una potencia en los transmisores de 20mW.

Potencia recibida vs. BER

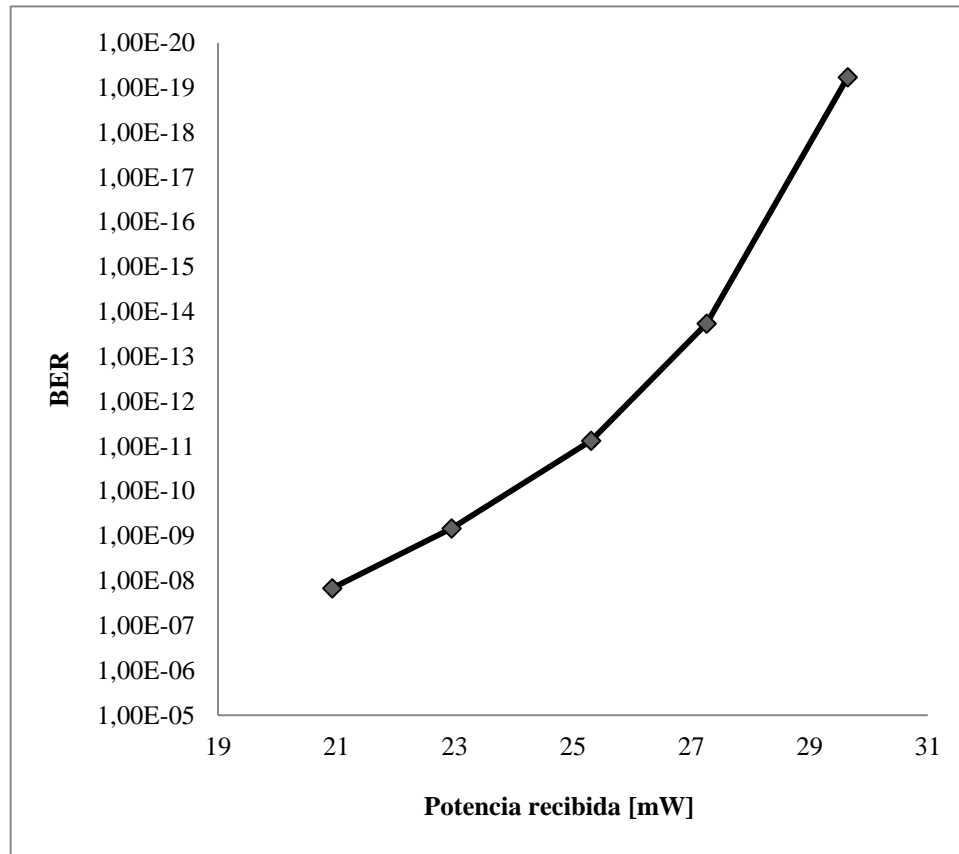


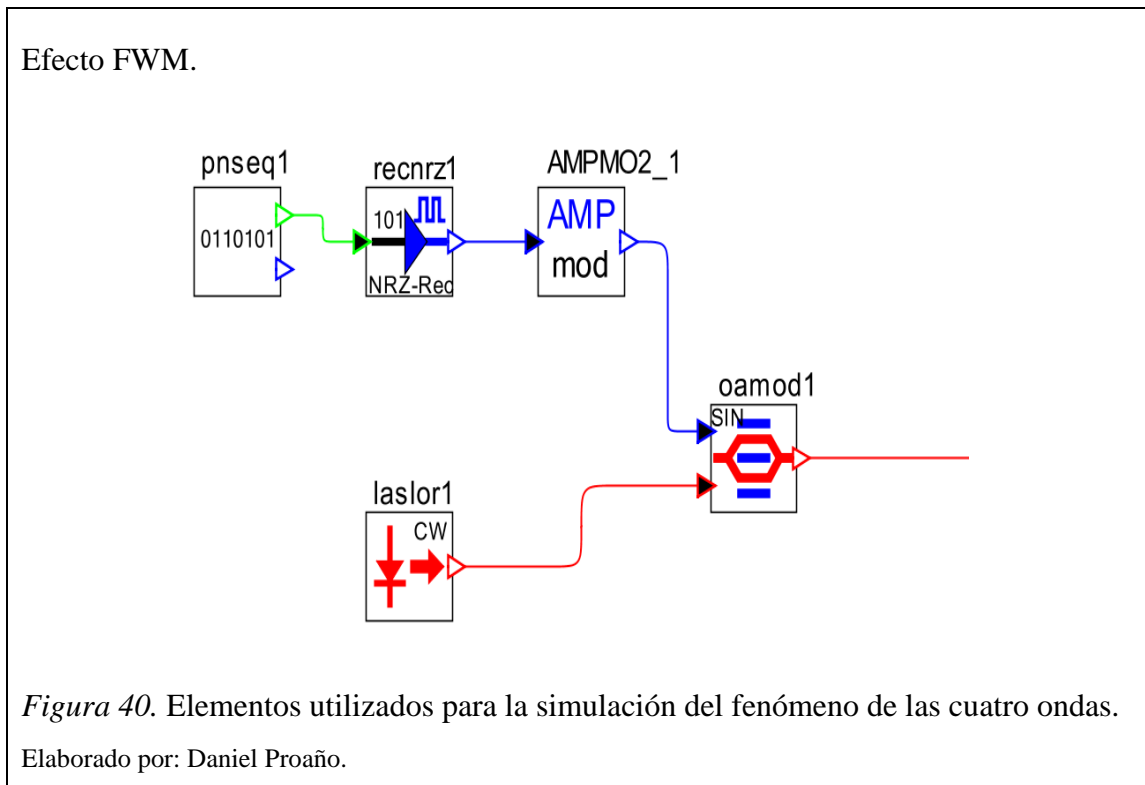
Figura 39. Gráfica de potencia recibida vs. BER con velocidad de transmisión de 20Gbps y potencia de entrada de 20mW.

Elaborado por: Daniel Proaño.

#### 4.2.2 Efecto FWM (Mezclado de cuatro ondas)

En la presente sección se describen las pruebas realizadas sobre la red TDM-WDM-PON como resultado de la simulación del efecto del mezclado de cuatro ondas (FWM). Para realizar esta simulación se procedió a utilizar una fuente óptica y un modulador externo que es accionado por la señal de RF modulada en amplitud como se muestra en la figura 40. En la salida del modulador hay dos ondas ópticas con el doble de la separación de

frecuencia de modulación debido a características de la señal de AM. (A. Supe, 2011, pág. 39).



Las características internas dentro del modulador AM implementado para la simulación del efecto FWM se muestran en la figura 41. La frecuencia portadora (carrier frequency) es el parámetro que se varió hasta determinar a qué frecuencia empezó a interferir con alguna de las 8 frecuencias que transportan los datos en la red TDM-WDM-PON.

Ventana modulador externo.

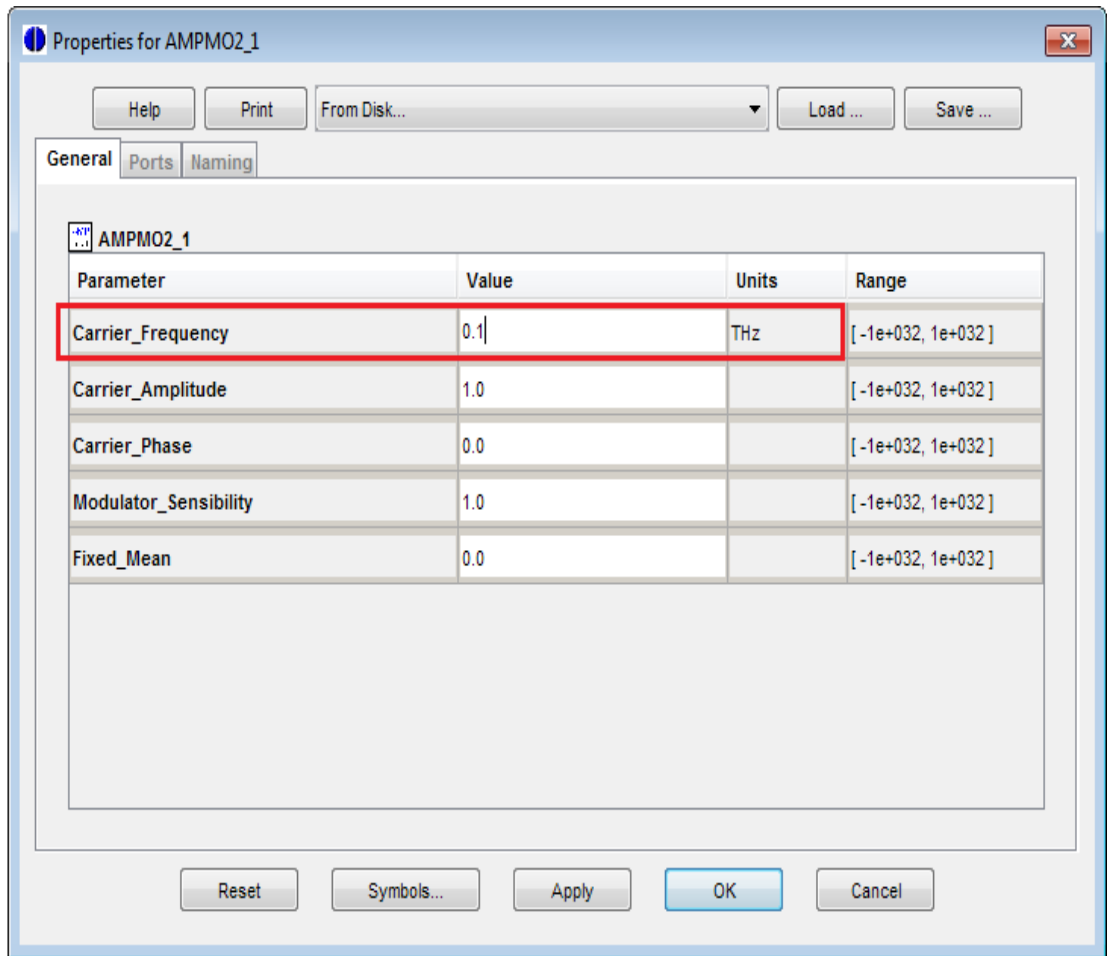
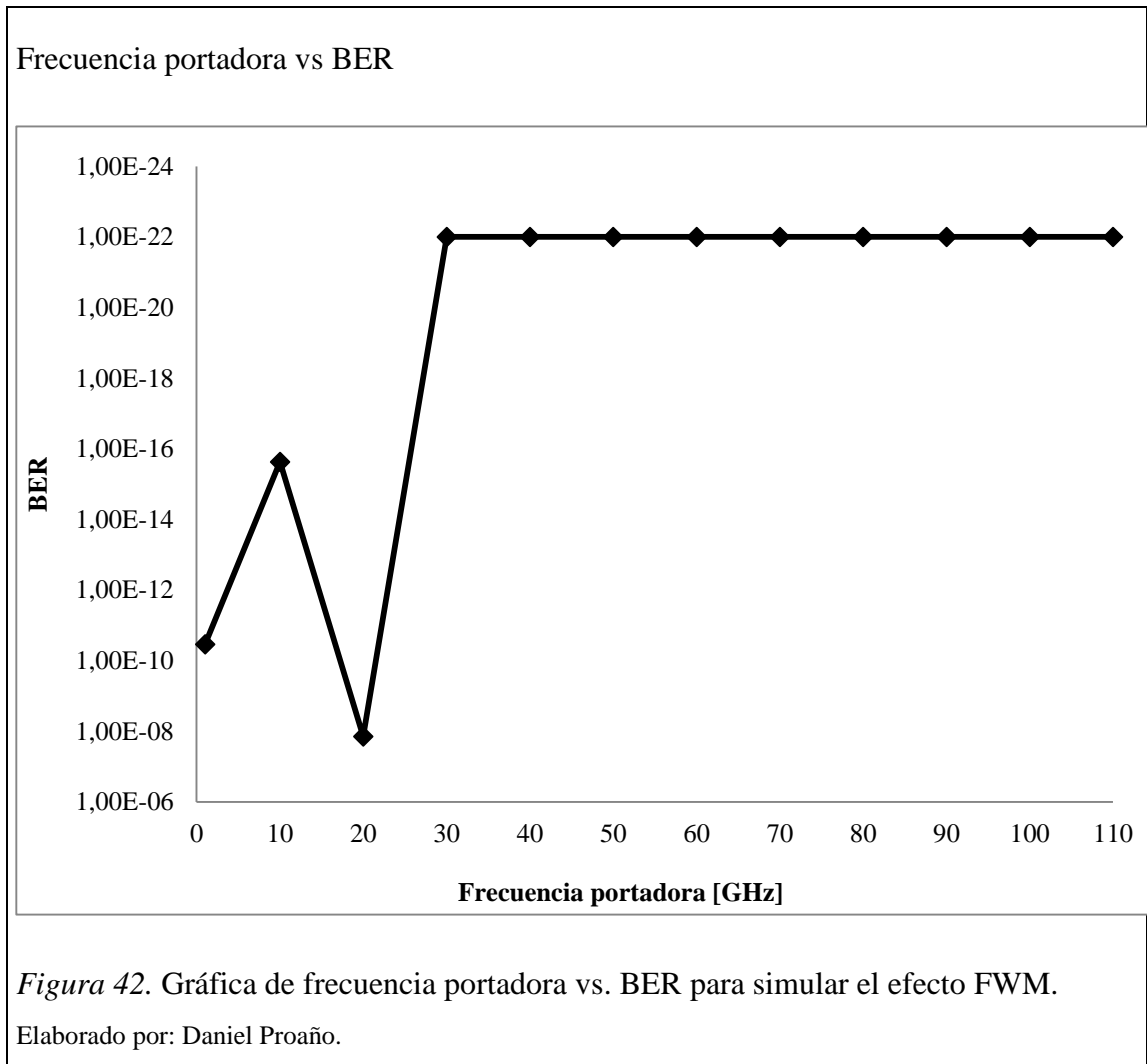


Figura 41. Ventana para el cambio de características dentro del modulador externo.

Elaborado por: Daniel Proaño.

Para poder realizar la simulación del mezclado de cuatro ondas el parámetro de la frecuencia portadora fue variando desde el valor de 1GHz hasta llegar a los 110GHz como se muestra en la figura 42. Dando como resultado que en el valor de 30GHz se empieza a deteriorar la transmisión de datos sobre la red TDM-WDM-PON y esto se ve reflejado en la tasa de bits errados (BER), con valores no tolerables para redes ópticas. Y es con este valor de 30GHz en el modulador externo que se realizaron varias pruebas con distintos valores en velocidad de transmisión, potencias de entrada en el láser de onda continua y distancias en el enlace de fibra óptica.



#### 4.2.2.1 Resultados del efecto de mezclado de cuatro ondas (FWM).

La figura 43 muestra cómo reacciona de manera no lineal la tasa de bits errados ante el aumento de la distancia en el enlace de fibra óptica. El aumento en la distancia de la longitud del enlace hace que el BER reduzca en valor. Esta red TDM-WDM-PON tiene la característica de tener una velocidad transmisión de 10Gbps con una potencia de entrada en el láser de onda continua de 1mW.



Distancia vs. BER

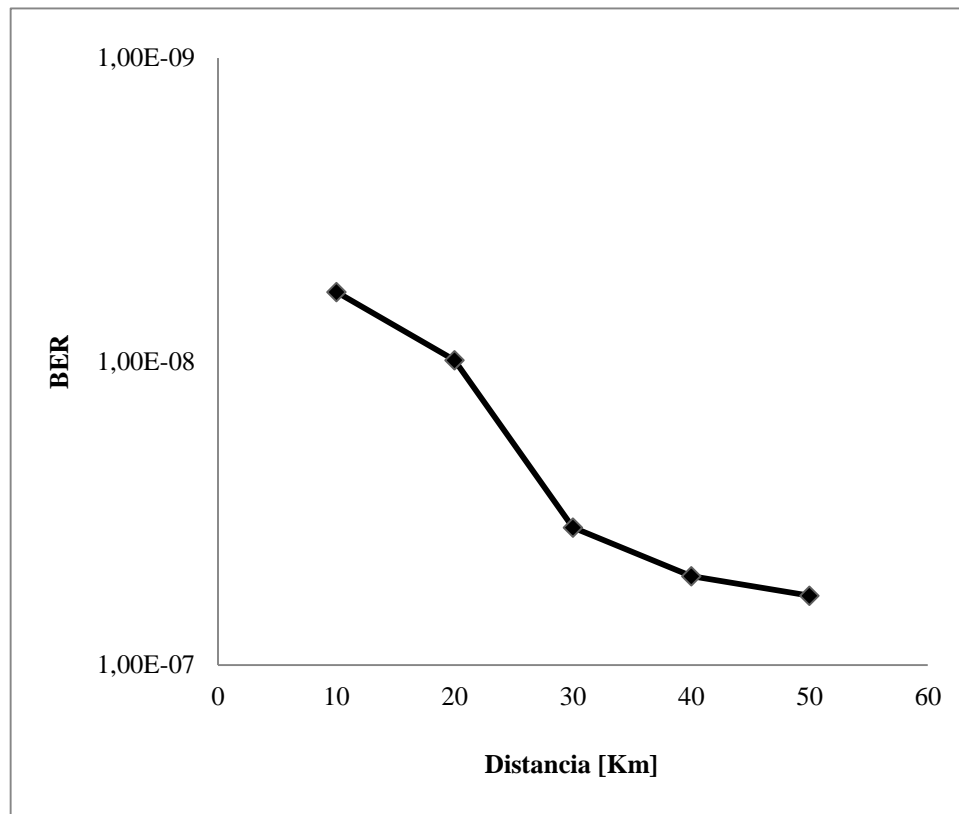


Figura 43. Gráfica de la distancia vs. BER.

Elaborado por: Daniel Proaño.

En la figura 44 se observa como la tasa de bits errados crece mientras la velocidad de transmisión va en aumento en una red TDM-WDM-PON a 20km y 1mW en su emisor. Esto hace que a mayor velocidad en la propagación de datos los receptores no capten de manera adecuada los datos y el BER exceda al valor permitido para redes que utilizan fibra óptica como medio de transmisión.

Velocidad de transmisión vs. BER

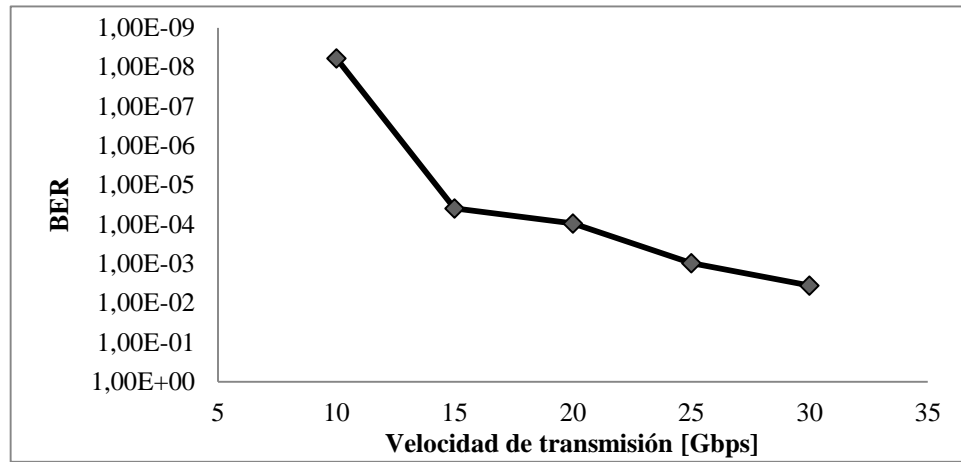


Figura 44. Gráfica de la velocidad de trasmisión vs. BER con potencia de entrada de 1mW.

Elaborado por: Daniel Proaño.

De manera semejante la figura 45 muestra los resultados para una red TDM-WDM-PON con una distancia de 20km pero con una potencia de entrada en los transmisores de 30mW. Esta potencia hace más perjudicial el efecto no lineal sobre la transmisión.

Velocidad de transmisión vs. BER

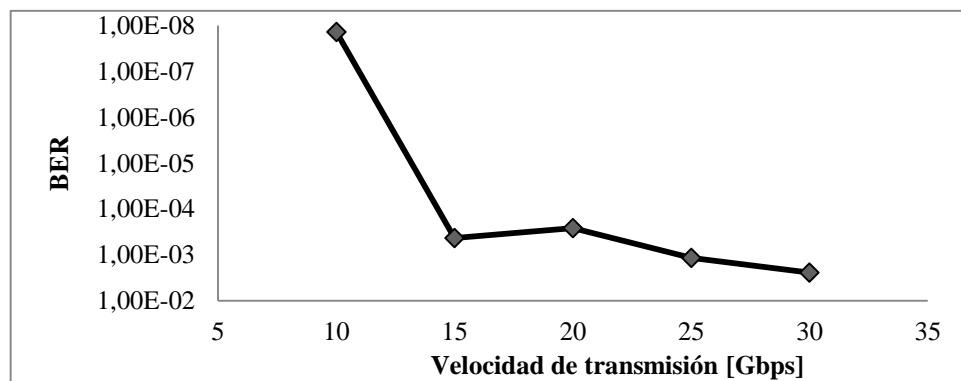
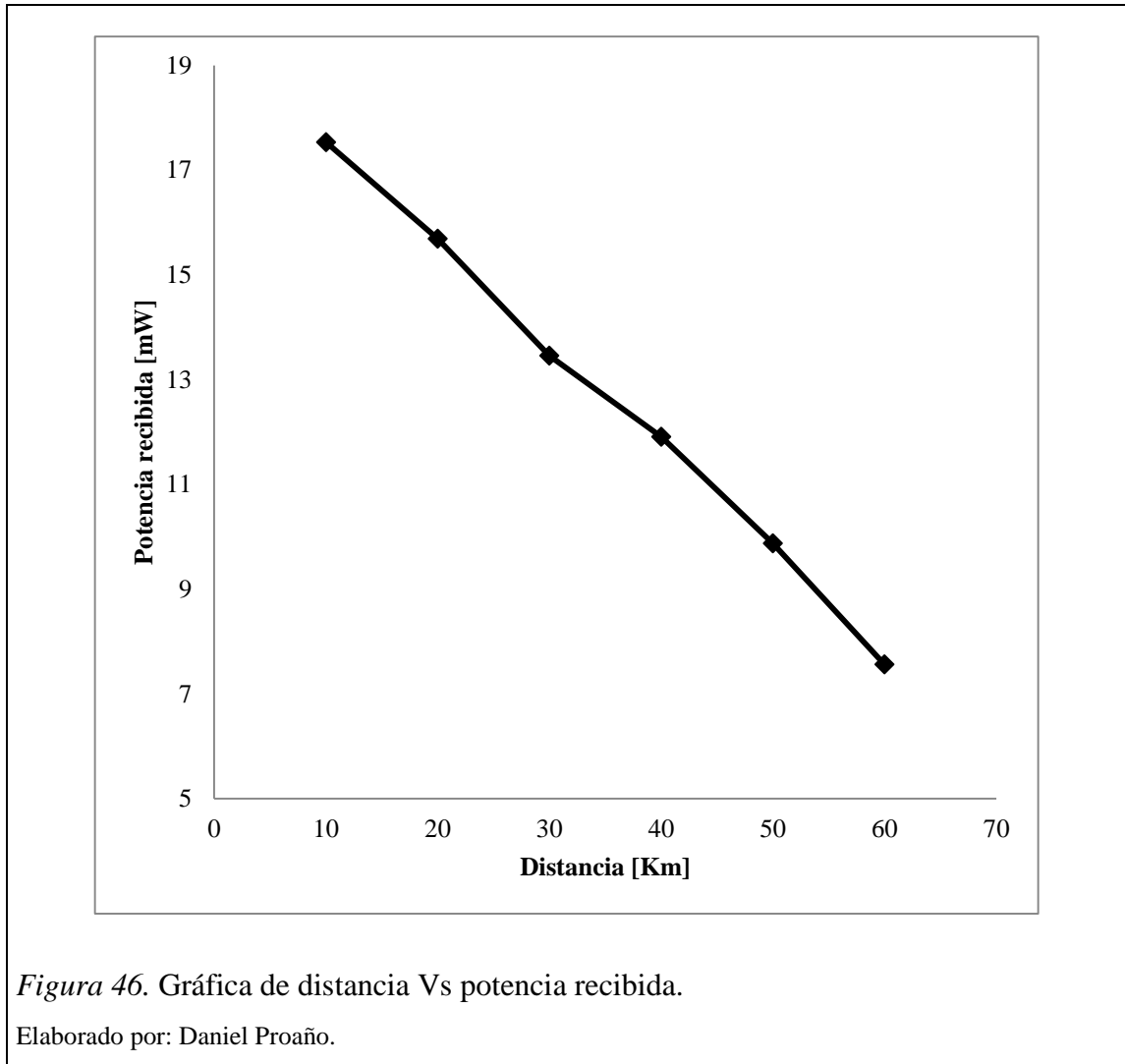


Figura 45. Gráfica de la velocidad de transmisión vs. BER con potencia de entrada de 30mW.

Elaborado por: Daniel Proaño.

En la figura 46 se muestra la relación entre la distancia y la potencia recibida. Con una potencia de entrada de 1mW y una velocidad en la transmisión de 10Gbps, como se muestra en la figura 45. Se evidencia que al aumentar la distancia de la fibra óptica, la potencia recibida tiende a decrecer.



La figura 47 muestra la gráfica entre la potencia recibida y la tasa de bits errados, donde el comportamiento de la red TDM-WDM-PON es no lineal y presenta valores en el BER muy altos. Los parámetros con los que se realizó esta simulación fueron: una velocidad de 10Gbps con una potencia de entrada de 1mW.

Potencia recibida vs. BER

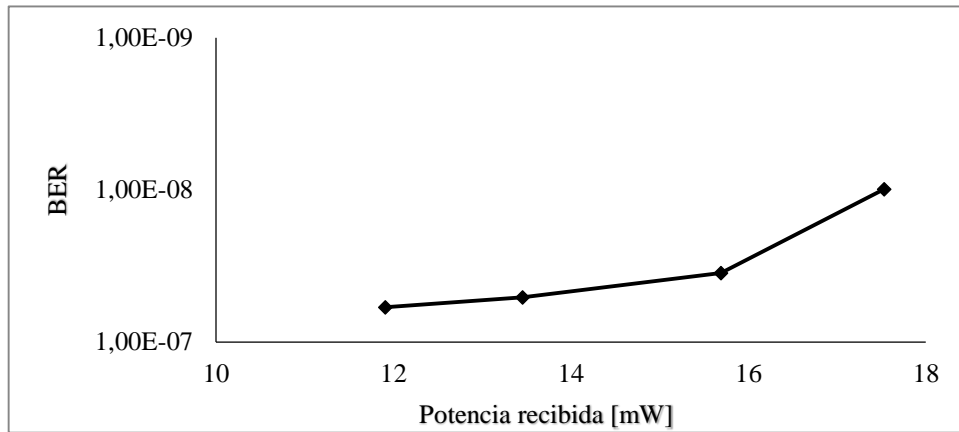


Figura 47. Gráfica de la potencia recibida vs. BER con una potencia de entrada de 1mW.

Elaborado por: Daniel Proaño.

En la figura 48 se muestra como la no linealidad del efecto se incrementa cuando la potencia de entrada se encuentra en los 20mW, 10Gbps en la transmisión.

Potencia recibida vs. BER

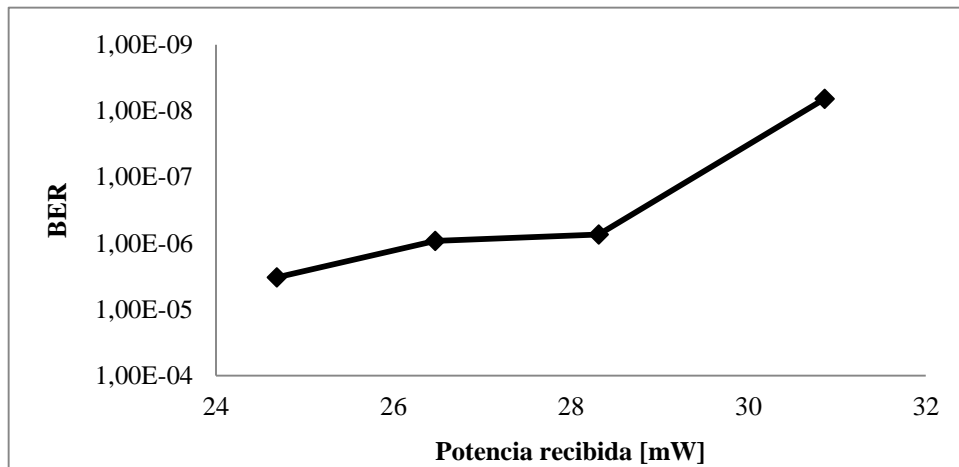
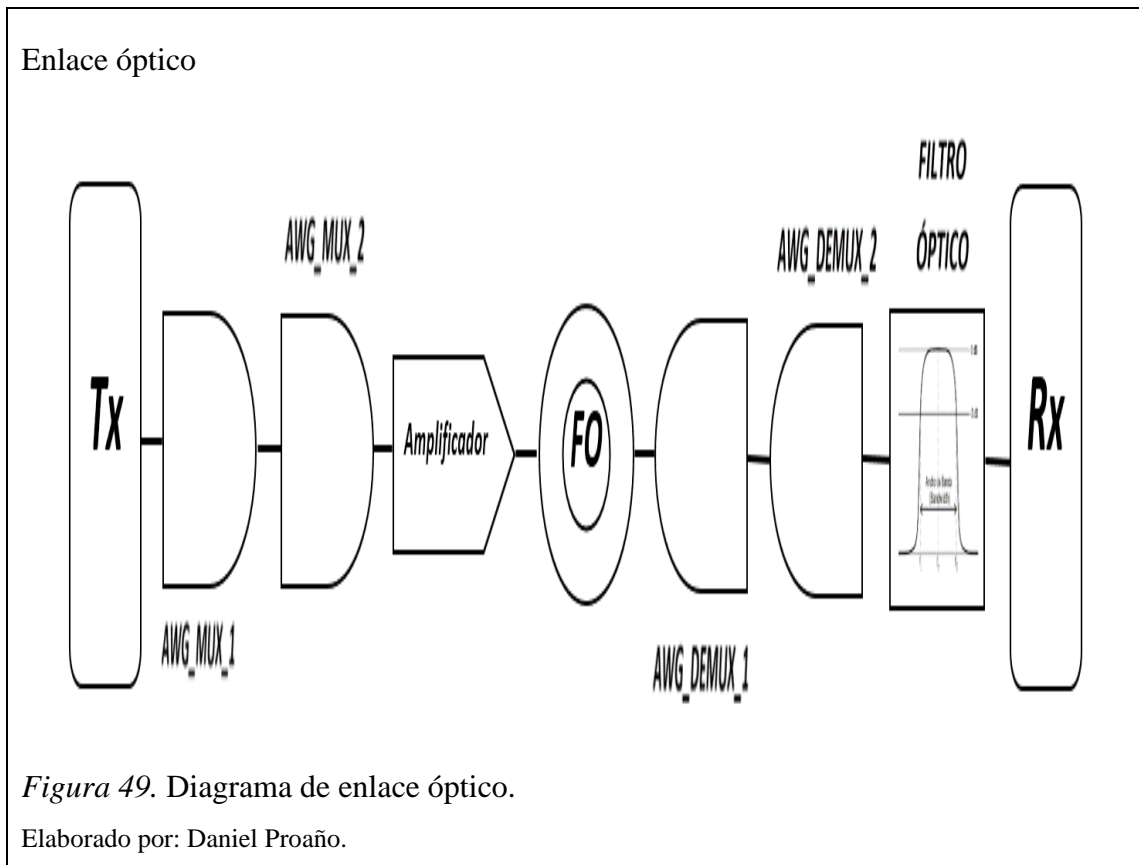


Figura 48. Gráfica de la potencia recibida vs. BER con una potencia de inserción de 20mW.

Elaborado por: Daniel Proaño.

### 4.3 Cálculos de potencia en la red TDM-WDM-PON

El diagrama del enlace óptico que se presenta en la figura 49, es el que se utiliza en los cálculos de las pérdidas de potencia que se generan en la red TDM-WDM-PON.



La potencia que se pierde o gana en cada elemento del enlace óptico se muestra en la tabla 3.

Tabla 3.

*Elementos que quitan o aportan potencia en la red.*

<i>Componente</i>	<b>Unidad</b>
<i>Transmisor</i>	0 dBm
<i>AWG_MUX1</i>	-3 dB
<i>AWG_MUX2</i>	-3 dB
<i>AMPLIFICADOR</i>	+10 dB
<i>FIBRA</i>	-4 dB
<i>AWG_DEMUX1</i>	-3 dB
<i>AWG_DEMUX2</i>	-3 dB
<i>FILTRO ÓPTICO</i>	-3 dB

Nota. Elaborado por: Daniel Proaño.

Utilizando la ecuación 5, se reemplazarán los valores de los componentes que forman la red TDM-WDM-PON como se observa en la ecuación 6, para de esta manera obtener el valor de la potencia en el receptor.

Ecuación 5. Cálculo de la pérdida de potencia durante la transmisión de información.

$$P_{TRANSMISOR} - P_{AWG-MUX1} - P_{AWG_{MUX2}} + P_{AMPLIFICADOR} - P_{FIBRA} - P_{AWG_{DEMUX1}} - P_{AWG_{DEMUX2}} - P_{FILTRO \text{ ÓPTICO}} = P_{RECEPTOR}$$

Ecuación 6. Cálculo de la pérdida de potencia.

$$P_{RECEPTOR} = 0 - 3 - 3 + 10 - 4 - 3 - 3 - 3 = -9 \text{ dBm}$$

La figura 50 muestra la potencia medida a la salida del filtro óptico con un valor próximo a los -8.747dBm el cual es semejante al valor obtenido en la ecuación 6.

Medidor de potencia.

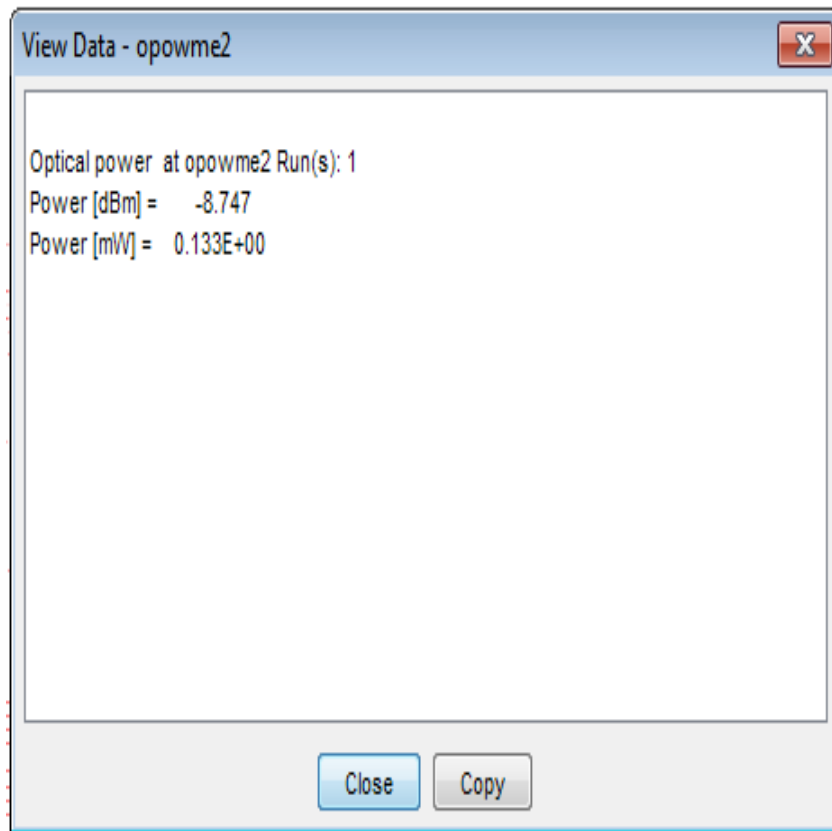


Figura 50. Potencia medida a la salida del filtro óptico.

Elaborado por: Daniel Proaño.

#### 4.4 Cálculo de potencia en la red TDM-WDM con el efecto XPM.

En la ecuación 7 se observa la potencia que consume o genera cada elemento en el enlace óptico de la red TDM-WDM-PON.

Ecuación 7. Cálculo de la pérdida de potencia en la red TDM-WDM-PON con influencia del efecto XPM.

$$P_{TRANSMISOR} - P_{AWG-MUX1} - P_{AWG_{MUX2}} + P_{AMPLIFICADOR} - P_{FIBRA} - P_{AWG_{DEMUX1}} - P_{AWG_{DEMUX2}} - P_{FILTRO \text{ ÓPTICO}} = P_{RECEPTOR}$$

La tabla 4 permite notar la potencia de cada uno de los elementos.

Tabla 4.

*Valores de cada uno de los elementos en la red óptica con efecto XPM.*

<b><i>Componente</i></b>	<b>Unidad</b>
<i>Transmisor</i>	14.77121 dBm
<i>AWG_MUX1</i>	-3 dB
<i>AWG_MUX2</i>	-3 dB
<i>AMPLIFICADOR</i>	+10 dB
<i>FIBRA</i>	-4 dB
<i>AWG_DEMUX1</i>	-3 dB
<i>AWG_DEMUX2</i>	-3 dB
<i>FILTRO ÓPTICO</i>	-3 dB

Nota. Elaborado por: Daniel Proaño.

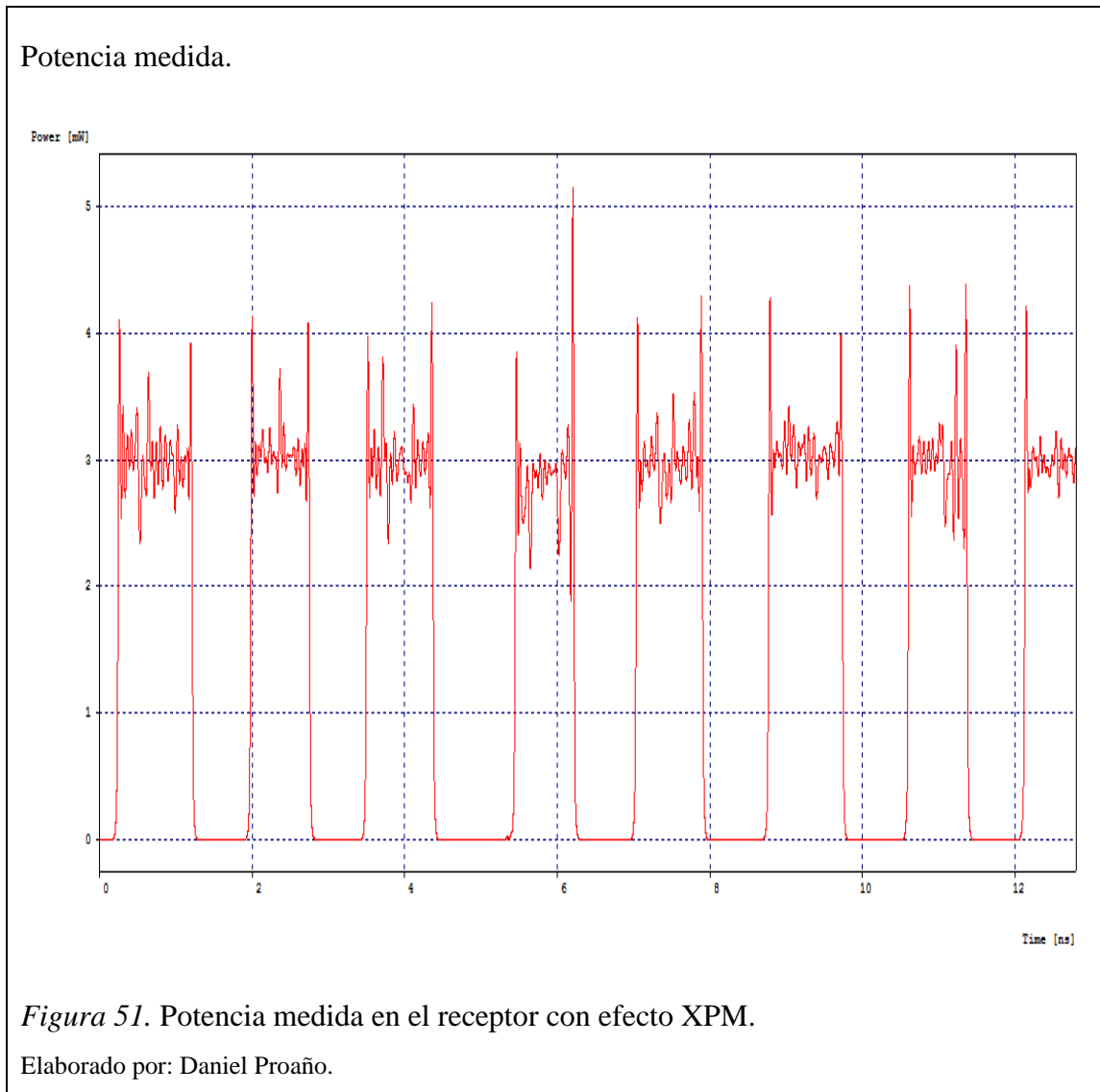
Se procede a reemplazar los valores de la tabla en la ecuación 7 para obtener el valor de la potencia en el receptor, como lo expresa la ecuación 8.

Ecuación 8. Cálculo numérico de las pérdidas de potencia.

$$P_{RECEPTOR} = 14.77121 - 3 - 3 + 10 - 4 - 3 - 3 - 3 = 5.77121 \text{ dBm}$$

La figura 51 muestra el valor tomado del software y de esta manera compararlo con el valor teórico del XPM calculado en la ecuación 8.





#### 4.5 Cálculo de potencia en la red TDM-WDM con el efecto FWM.

En la ecuación 9 se observa la potencia que consume o genera cada elemento en el enlace óptico de la red TDM-WDM-PON.

Ecuación 9. Cálculo de la pérdida de potencia en la red TDM-WDM-PON con influencia del efecto FWM.

$$P_{TRANSMISOR} - P_{AWG-MUX1} - P_{AWG_{MUX2}} + P_{AMPLIFICADOR} - P_{FIBRA} - P_{AWG_{DEMUX1}} - P_{AWG_{DEMUX2}} - P_{FILTRO \text{ ÓPTICO}} = P_{RECEPTOR}$$

La tabla 5 permite notar la potencia, la ganancia o pérdida de cada uno de los elementos.

Tabla 5.

*Valores de cada uno de los elementos en la red óptica con efecto FWM.*

<i>Componente</i>	<b>Unidades</b>
<i>Transmisor</i>	10 dBm
<i>AWG_MUX1</i>	-3 dB
<i>AWG_MUX2</i>	-3 dB
<i>AMPLIFICADOR</i>	+10 dB
<i>FIBRA</i>	-4 dB
<i>AWG_DEMUX1</i>	-3 dB
<i>AWG_DEMUX2</i>	-3 dB
<i>FILTRO ÓPTICO</i>	-3 dB

Nota. Elaborado por: Daniel Proaño.

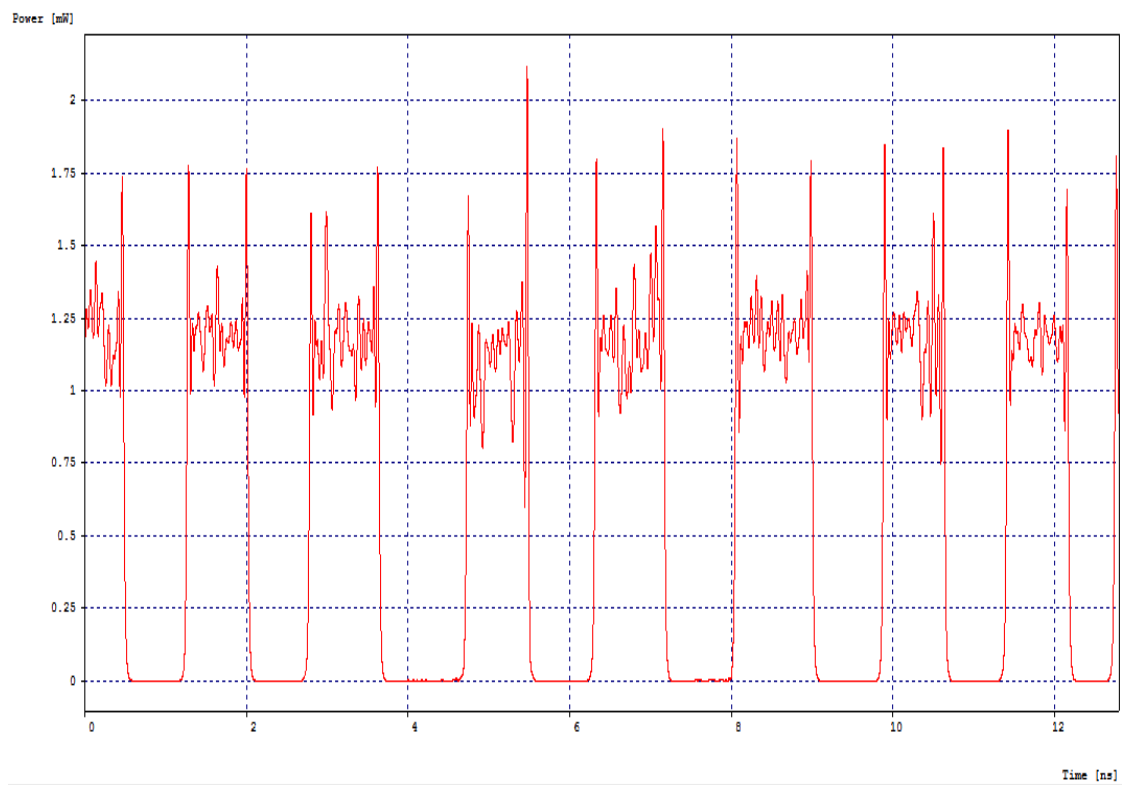
Se procede a reemplazar los valores de la tabla en la ecuación 10 para obtener el valor de la potencia en el receptor, como lo expresa la ecuación 10.

Ecuación 10. Cálculo numérico de las pérdidas de potencia.

$$P_{RECEPTOR} = 10 - 3 - 3 + 10 - 4 - 3 - 3 - 3 = 1 \text{ dBm}$$

La figura 52 muestra el valor tomado del software y así poder compararlo con el valor teórico del FWM de la ecuación 10.

## Potencia medida.



*Figura 52.* Potencia medida en el receptor con efecto XPM.

Elaborado por: Daniel Proaño.

## **CAPÍTULO 5**

### **ANÁLISIS DE COSTOS**

En el presente capítulo se realiza un análisis de los costos de implementación para la red TDM-WDM-PON de este trabajo de titulación.

#### **5.1 Costos de equipos de la red TDM-WDM-PON**

La tabla 6 muestra una descripción detallada de los equipos necesarios para la implementación de la red híbrida TDM-WDM-PON, así como el precio total de los equipos y el fabricante de cada uno de los equipos.

Tabla 6.

*Costo y detalle de equipos para su implementación.*

<b>Cantidad</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio Unitario \$</b>	<b>Precio Total \$</b>
1	Telnet	SmartOLT	OLT	2190	2452
64	Huawei	HG-810	ONU	77,28	4945,92
9	Oplink	AAWG SERIES	Awg-Mux de 8 a 1	996	8964
9	Oplink	AAWG SERIES	Awg-Demux de 8 a 1	996	8964
8	HTD	SM 1310/1490/ 1550	Filtro óptico	70	560
1	Eric - Communication	EDFA1500	Amplificador óptico	1792	1792
20000	Furukawa	Powerguide TTH	Cable de fibra monomodo	1,792	35840
200	Panduit	LC	Conectores de fibra óptica	3,64	728
				<b>TOTAL \$ 64245,92</b>	

Nota. Elaborado por: Daniel Proaño.

La tabla 7 Indica los costos de instalación que tendrá la red TDM-WDM-PON.

Tabla 7.

*Costo de la instalación de la red óptica.*

<b>Equipos a instalar</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Distancia[m]</b>	<b>Precio Unitario. \$</b>	<b>Precio Total. \$</b>
<b>Fibra óptica</b>	Instalación, tendido, fusión de la fibra óptica	1	20.000	1,6	32000
<b>Equipos pasivos</b>	Instalación y configuración de las OLT	1		1800	1800
				<b>TOTAL \$</b>	<b>33800</b>

Nota. Elaborado por: Daniel Proaño.

El costo total de equipos e instalación para la implementación se muestra en la tabla 8.

Tabla 8.

*Costo total para la implementación del proyecto.*

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>COSTO \$</b>
EQUIPOS	64245,92,4
INSTALACIÓN	33800
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 98045,92</b>

Nota. Elaborado por: Daniel Proaño.

## CONCLUSIONES

- Para este trabajo de titulación se realizó la simulación de una red TDM-WDM-PON compuesta de 64 usuarios, correspondiendo su máxima velocidad de transmisión en 10Gbps, y 40Km para su distancia en el enlace de fibra, sin la intervención de los efectos no lineales, ya que se obtuvo una tasa de bit errado de  $4.06 \times 10^{-9}$ . La máxima velocidad de transmisión a la se propagan los datos en la red TDM-WDM-PON es de 15Gbps con una distancia en la fibra óptica de 10Km al presentar como resultado de las simulaciones un BER de  $2.52 \times 10^{-12}$ .
- La potencia máxima que se puede aplicar al láser de onda continua con la intervención del efecto de la modulación cruzada de fase es de 130mW ya que se obtuvo una tasa de bits errados de  $1.60229 \times 10^{-7}$ . La mayor velocidad de transmisión que se alcanzó en la red TDM-WDM-PON es de 30Gbps con una potencia de inserción en el láser de 30mW y una longitud en el enlace de fibra de 20Km al obtener un BER de  $1,174151.17415 \times 10^{-8}$ . El tope en distancia con la que se puede propagar la información es de 60Km con una velocidad en la transmisión de 20Gbps y una potencia de entrada de 1mW al conseguir una tasa de bits errados de  $9.06387 \times 10^{-7}$ .
- Para el efecto del mezclado de cuatro ondas, la potencia máxima de inserción en los láser de onda continua en la red TDM-WDM-PON es de 50mW al alcanzar una tasa de bits errados de  $2.23013 \times 10^{-7}$ . La velocidad máxima con la que se puede transmitir la información es de 10Gbps con una distancia en el enlace de fibra óptica de 20Km y potencia en el láser de onda continua de 1mW al adquirir un BER de  $5.89407 \times 10^{-9}$ . El límite para el enlace de fibra óptica son los 60Km con una velocidad de transmisión de 10Gbps y una potencia de inserción de 1mW al conseguir una tasa de bits errados con un valor de  $5.90171 \times 10^{-8}$ .
- El efecto del mezclado de las cuatro ondas es predominante con respecto al efecto de modulación de fase cruzada en la red TDM-WDM-PON. Ya que la potencia máxima es de 50mW para el FWM en relación a los 130mW que soporta el efecto XPM, afectando de manera no lineal tanto al espectro de frecuencia como también a la tasa de bits errados.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda para futuros trabajos realizar simulaciones con un número mayor a los 64 usuarios o implementar un grupo WDM adicional a la red original. Además de examinar el comportamiento de la red a velocidades mayores a los 30Gbps para el XPM y los 15Gbps para el FWM.
- En posteriores trabajos de investigación se podría simular el comportamiento de la red TDM-WDM-PON con la influencia adicional de los efectos no lineales causados por el fenómeno de dispersión inelástico y analizar el comportamiento de la red.
- Se recomienda realizar simulaciones con un espaciamiento entre canales de transmisión mayores a los 100GHz y poder determinar si de esta manera se puede disminuir el impacto de los efectos no lineales sobre la red TDM-WDM-PON.

## LISTA DE REFERENCIAS

- A. Supe, J. P. (2011). *Comparison of Different FWM Realization Methods in Optical Fibre*. Riga.



- Agrawal, G. P. (2002). *FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS* . New York: John Wiley & Sons.
- Alex Vukovic, Khaled Maamoun, Heng Hua, Michel Savoie. (2007). *Performance Characterization of PON Technologies*. Ottawa: Broadband Applications and Optical Networks, Communications Research Centre (CRC).
- Beeram, N. K. (2010). *ANALYSIS OF NONLINEAR DISPERSIONS IN OPTICAL SYSTEM*. California.
- ITU-T Recommendation Y.2001 (12/2004) - General overview of NGN. (12 de 2004). *ITU*. Obtenido de ITU: <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2001-200412-I/en>
- Jaen, C. A. (2002). *Estudio de limitaciones en sistemas WDM*. Madrid.
- Kimura, S. (2010). *WDM/TDM-PON Technologies for Future*. Japón.
- Įašuks, I. (2010). *The Effect of Stimulated Brillouin Scattering on WDM-PON*. Lituania: Riga Technical University.
- Md. Shamim Ahsan, Man Seop Lee, S. H. Shah Newaz And Syed Md. Asif. (2011). *Migration to the Next Generation Optical Access*. JOURNAL OF NETWORKS.
- Pereda, J. A. (2004). *Sistemas y Redes ópticas de Comunicaciones*. Madrid: Pearson Educación.
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. México: Pearson Educación .
- Viviana S. Gutierrez, D. M. (2011). *Impacto y Masificación del Uso De Las Redes GPON en Colombia Frente a otras Tecnologías*. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”.

**ANEXOS**  
**Anexo 1. OLT - SmartOLT**

### Características generales

Equipo de central para redes GPON

100% auto-gestionada y autónoma

Evita la necesidad de utilizar equipos de agregación de red

Doble posibilidad del interfaz de transporte: 10G o 4x1000Base-T

Reducción de los costes por puerto GPON

Reducción de la barrera de entrada de inversión en un sistema GPON

### Características Ethernet/GPON

Control de acceso de red por usuario

DBA adaptativo, orientado a QoS

Capacidad para asignar ancho de banda para cada TCONT

Traffic granularity: Por segundo/milisegundo

Balaneo del tráfico "sobrante"

Provisionamiento OMCI de cada ONT

802.1ad, 802.1Q, 802.1p soporta diferentes escenarios VLAN

Proxy Multicast IGMPv3

Codificación FEC

Encriptación AES-128 estándar

### Interfases

4x Puertos SFP GPON

1x Puerto SFP+ 10G de transporte

4x Puertos GbE eléctrico 1000Base-T de transporte (1 por puerto GPON)

1x Puerto de gestión Ethernet

Ópticas B+ y C+ disponibles.

### Características técnicas

Dimensiones: 1UA x 19"

Alimentación: directa con 220V ó -48V



### Sistema completo de gestión CLI

Perfiles VLAN extremo a extremo

Perfiles de servicio

Perfiles de ancho de banda

Perfiles de cliente con servicios

Asignación de perfil a nuevo cliente en solo 2 comandos

Gestión de parámetros SIP de cada usuario

### Telnet GPON Management System

Acceso y gestión vía web a todas las OLTs, PONs y ONTs del operador

Interfaz visual fácil e intuitivo para la gestión de las ONTs del operador

Gestión gráfica e intuitiva de las altas y perfiles de los abonados

Perfiles VLAN extremo a extremo

Perfiles de servicio

Perfiles de ancho de banda

Perfiles de cliente con servicios

Gestión de parámetros SIP de cada usuario

## Anexo 2. ONU HG-8010

## Key Features

### GPON features

- Class B+ optical module
- Security authentication mode: SN, password or SN+password
- Upstream/downstream FEC
- GEM port mapping mode: VLAN, 802.1p, VLAN+ 802.1p, IPToS, physical port

### Multicast features

- IGMP V2&V3 snooping

### Ethernet features

- VLAN filtering and VLAN transparent transmission
- VLAN N:1 aggregation and VLAN 1:1 translation

### Maintenance features

- Local management using Web and remote management using OMCI
- Optical power monitoring
- 802.1ag Ethernet OAM

### Reliability features

- Dual systems for software Protection
- Type B protection and rogue ONT detection

### Green energy-saving features

- Dynamic power consumption adjustment

## Product Specifications



Dimensions(W x D x H)	143 mm x 115 mm x 30 mm
Port	1GE
Average power consumption	5.5 W
Operating environment	Temperature: 0°C ~ +40°C; Humidity: 5%~95%, non-condensing
Power supply	Adapter input: 100~240 V AC, 50~60Hz; Adapter output: 11~14 V DC, 1 A
Weight	About 400g (including the power adapter)

## Anexo 3. Amplificador EDFA1500

### Descripción:

Serie EDFA1500 es un amplificador óptico de CATV, ancho de banda de 1530 ~ 1560 nm. Con poco ruido y alta potencia de salida saturada.

### Características

1. Trabajar mucho tiempo.
2. Aprueba JDSU, Fitel y Láser Bomba Bookham.
3. Buena estabilidad.
4. Fuente de alimentación, 90V ~ 265V AC o 48 V DC.

### Parámetros

Artículos de parámetros	Parameter									
	1500-14	1500-15	1500-16	1500-17	1500-18	1500-19	1500-20	1500-21	1500-22~27	
De salida (dBm)	14	15	16	17	18	19	20	21	22~27	
De salida (mW)	25	32	40	50	63	80	100	125	160~500	
De entrada (dBm)	-3 ~ 10									
Longitud de onda (nm)	1530 ~ 1565									
Estabilidad de salida (dB)	±0.2									
Polarización Sensibilidad	<0.2 dB									
Polarización Dispersión	<0.5 PS									
Pérdida de retorno óptica	≥45 dB									
Conector de fibra	FC/APC or SC/APC									
Figura de ruido (dB)	<4.5(0dBm Optical Input)									
Interfaz de red	RJ45(SNMP) / RS232 / RS486									
Consumo de energía50 W	50 W									
Fuente de alimentación (V)	220VAC(110 ~240) or -48VDC									
Temp de trabajo (° C)	-20 ~ +85									
Tamaño (")	19"* 15"* 1.75"									
Peso (Kg)	5									

## Anexo 4. Filtro óptico - HTD

### Características

Especialmente diseñados para cumplir los requerimientos del mercado FTTH.

Aplicaciones: amplificadores, redes de fibra óptica FTTH/Metro/ Acceso, y CATV.

Excelentes características ópticas: bajas pérdidas de inserción y alto aislamiento, reducida PDL. Óptima fiabilidad.

Filtra WDM de 3 puertos SM 1310/1490/1550.

Tamaño compacto. Posibilidad de suministro con salidas en fibra a 250 o 900  $\mu\text{m}$  y terminaciones en conectores: SC/PC, SC/APC, ST/PC, FC/PC, FC/APC, LC/PC.

Cumplimiento del estándar RoHS.  $\emptyset$

### Filtro WDM

Tamaño	$\emptyset 5,5 \times 55 \text{ mm}$		
	Parámetros	Tipo A	Tipo B
Banda operación	1310 nm	1260—1360 nm	
	1490 nm	1480—1500 nm	
	1550 nm	1540—1560 nm	
Operación filtrado		Pasa 1550 y refleja 1310 & 1490	Pasan 1310 & 1490 y refleja 1550
Pérdidas inserción	Com->Ref	$\leq 0,6 \text{ dB}$	$\leq 0,6 \text{ dB}$
	Com-> Pass	$\leq 0,8 \text{ dB}$	$\leq 0,8 \text{ dB}$
Aislamiento	Com->Ref	$\geq 15 \text{ dB}$	$\geq 15 \text{ dB}$
	Com-[]Pass	$\geq 30 \text{ dB}$	$\geq 30 \text{ dB}$
PDL		$\leq 0,1 \text{ dB}$	$\leq 0,1 \text{ dB}$
Pérdida de retorno		$\geq 50 \text{ dB}$	$\geq 50 \text{ dB}$
Directividad		$\geq 50 \text{ dB}$	$\geq 50 \text{ dB}$
Temperatura operación		- 40 / +85 °C	
Temperatura almacenamiento		- 40 / +85 °C	
Potencia máxima		$\leq 300 \text{ mW}$	

### Anexo 5. AWG Mux/DeMux Module – AAWG SERIES

Parameters							
<b>Channel Space (GHz)</b>		<b>100 (standard)</b>			<b>200</b>		
<b>Channel Number</b>		<b>1*4</b>	<b>1*8&amp;16</b>	<b>1*40</b>	<b>1*4</b>	<b>1*8</b>	<b>1*16</b>
<b>Center Wavelength (nm)</b>		<b>ITU Grid</b>					
<b>Center Wavelength Accuracy (nm)</b>		<b>± 0.05</b>			<b>± 0.1</b>		
<b>Channel Passband (@-0.5dB) (nm)</b>		<b>0.22</b>			<b>0.5</b>		
<b>Fiber Type</b>		<b>SMF-28e with 900um loose tube or customer specified</b>					
<b>IL (dB)</b>		<b>1.8</b>	<b>3.0</b>	<b>3.5</b>	<b>1.7</b>	<b>2.9</b>	<b>3.4</b>
<b>Passband Ripple (dB)</b>		<b>0.35</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>	<b>0.35</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>
<b>Isolation (dB)</b>	<b>Adjacent Channel</b>	<b>25</b>			<b>28</b>		
	<b>Non-Adjacent Channel</b>	<b>40</b>					
<b>PDL (dB)</b>		<b>0.2</b>					
<b>PMD (ps)</b>		<b>0.1</b>					
<b>RL (dB)</b>		<b>45</b>					
<b>Directivity (dB)</b>		<b>50</b>					
<b>Maximum Optical Power (mw)</b>		<b>300</b>					

<b>Operating Temperature (°C)</b>	<b>-40~85</b>
<b>Storage Temperature (°C)</b>	<b>-40~85</b>
<b>BOX Package (mm)</b>	<b>100*80*10 or 140*115*18</b>
<b>LGX Package</b>	<b>1U,2U</b>
<b>19'' Rack mount Package</b>	<b>1U</b>

**Anexo 6. Cable de fibra óptica monomodo – Powerguide TTH**



## Características ópticas y geométricas

Parámetros ópticos	Fibra no cableada	Fibra cableada	Parámetros geométricos	
Atenuación a 1310 nm	$\leq 0,35$ dB/Km	$\leq 0,37$ dB/Km	Diámetro de campo modal 1310 nm	$9,20 \pm 0,40$ $\mu$ m
Atenuación a 1550 nm	$\leq 0,21$ dB/Km	$\leq 0,24$ dB/Km	Diámetro de campo modal 1550 nm	$10,50 \pm 0,80$ $\mu$ m
Atenuación en 1285-1330 nm	$\leq 0,40$ dB/Km		Error concentricidad núcleo/cladding	$\leq 0,4$ $\mu$ m
Atenuación en 1525 -1575 nm	$\leq 0,25$ dB/Km		Diámetro cladding	$125,0 \pm 1,0$ $\mu$ m
Punto de discontinuidad máxima en 1310 y 1550 nm	$\leq 0,05$ dB		Error concentricidad coating/ cladding	$\leq 12$ $\mu$ m
Longitud de onda de corte	1100 - 1300 nm	$\leq 1260$ nm	No circularidad coating	$\leq 10$ %
Punto de dispersión cero	1300-1324 nm		Diámetro coating (coloreado)	$250 \pm 15$ $\mu$ m
Pendiente de dispersión cero	$\leq 0,092$ ps/nm <sup>2</sup> .Km			
Dispersión cromática en 1285 -1330 nm	$\leq 3,5$ ps/nm.Km			
Dispersión cromática en 1270 - 1350 nm	$\leq 5,3$ ps/nm.Km			
Dispersión cromática en 1550 nm	$\leq 18,0$ ps/nm.Km			
PMD fibra individual	$\leq 0,15$ ps/ $\sqrt$ Km			
PMDq (Q=0,01%, N=20)	$\leq 0,10$ ps/ $\sqrt$ Km			