

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniera en
Electrónica y Telecomunicaciones

TRABAJO DE TITULACIÓN

Título del proyecto

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED WDM INDUCIDA AL EFECTO
NO LINEAL DE LA FIBRA DENOMINADO CROSS PHASE
MODULATION**

Autor:

Karina Lizeth Samaniego Macas

Tutor:

Ing. Deysi Inca Balseca

Riobamba - Ecuador
Año 2019

Los miembros del tribunal de graduación del proyecto de investigación de título: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED WDM INDUCIDA AL EFECTO NO LINEAL DE LA FIBRA DENOMINADO CROSS PHASE MODULATION**, Presentado por: **Karina Lizeth Samaniego Macas** y dirigida por **Ing. Deysi Vilma Inca Balseca**.

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual consta el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNACH

Para constancia de lo expuesto firman

PhD. Leonardo Rentería
Presidente del Tribunal



Firma

Mgs. José Jinez
Miembro del Tribunal



Firma

Mgs. Marco Nolivos
Miembro del Tribunal



Firma

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo de investigación previo a la obtención del título de Ingeniera en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, con el tema: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED WDM INDUCIDA AL EFECTO NO LINEAL DE LA FIBRA DENOMINADO CROSS PHASE MODULATION**. Ha sido elaborado por, KARINA LIZETH SAMANIEGO MACAS, el mismo que ha sido revisado y analizado en un cien por ciento con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de tutor, por lo que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.



Ing. Deysi Vilma Inca Balseca

C.I. 060381048-2

TUTOR

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad del contenido de este proyecto de graduación, Corresponde exclusivamente a **Karina Samaniego e Ing. Deysi Inca**; y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo



Karina Lizeth Samaniego Macas
C.I: 060467293-1

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por guiarme en el camino correcto de la vida, llenándome de fortaleza y sabiduría para culminar mis estudios universitarios y con ello una hermosa etapa de mi vida.

A Antony mi hijo, por confiar siempre en mí, comprender mi ausencia y motivarme a ser cada día mejor.

A mis padres Benigno y Gloria, los que encaminaron cada paso que he dado en mi vida, de manera especial a mi padre por darme su apoyo incondicional de forma económica y anímicamente.

A mis hermanos quienes desde niños me dieron un gran ejemplo de dedicación y esfuerzo en cada objetivo propuesto.

A la Universidad Nacional de Chimborazo, por su formación académica y por permitirme obtener con orgullo este título académico.

A los docentes de la Carrera en Electrónica y Telecomunicaciones, que me impartieron sus conocimientos dentro y fuera de las aulas durante toda la carrera, de manera especial a la Ing. Deysi Inca, mi tutora de tesis gracias por su confianza y colaboración en la elaboración de este proyecto de investigación.

A mis amigos por brindarme sus consejos y apoyarme en los malos momentos.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación al ser que más amo en este mundo a mi hijo Antony, mi aliento diario para seguir adelante, por ser la fuente de mi inspiración y motivación para superarme cada día más y así conseguir culminar una de mis metas.

A mis Padres, forjadores de mi futuro, guardianes de mi éxito, quien yo soy es gracias a la confianza y sacrificio de ustedes.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	XII
ABSTRACT.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	2
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 PROBLEMATIZACIÓN.....	2
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 OBJETIVOS:	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos:.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Antecedentes	5
2.2 Fibra óptica	5
2.2.1 Fibra monomodo	6
2.2.1.1 Fibra óptica monomodo estándar	7
2.3 Sistema de comunicaciones óptico WDM	7
2.3.1 Aspectos importantes de WDM	8
2.3.2 Parámetros de Transmisión en sistemas WDM.....	10
2.3.2.1 Espaciamiento del canal	10
2.3.2.2 Ancho de banda de la señal	10
2.3.2.3 Potencia de la señal	10
2.3.2.4 Codificación	11
2.3.2.5 Tasa de bit errado (BER).....	11
2.3.2.6 Ruido	11
2.4 Efectos no lineales en la fibra óptica	11
2.4.1 Cross phase modulation (XPM).....	12
2.4.1.1 Limitaciones de transmisión inducidas	12

CAPÍTULO III.....	14
3. METODOLOGÍA.....	14
3.1 Tipo y diseño de Investigación.....	14
3.1.1 Tipo de Investigación.....	14
3.1.2 Diseño de Investigación.....	14
3.1.2.1 Diseño de un Sistema WDM ideal.....	14
3.1.2.2 Diseño de un Sistema WDM inducido al efecto no lineal XPM.....	14
3.1.2.3 Pruebas.....	14
3.2 Unidad de análisis.....	14
3.2.1 Diseño de la red WDM.....	15
3.2.2 Diagrama de bloques del funcionamiento de Optisystem.....	15
3.2.3 Componentes de la red WDM.....	15
3.3 Población de estudio.....	16
3.4 Tamaño de muestra.....	17
3.5 Técnicas de recolección de datos.....	17
3.5.1 Métodos.....	17
3.5.1.1 Método Descriptivo.....	17
3.5.1.2 Método Investigativo Experimental.....	18
3.5.1.3 Método Analítico.....	18
3.5.2 Técnicas.....	18
3.5.2.1 Observación.....	18
3.5.3 Instrumentos.....	18
3.6 Técnicas de Análisis e interpretación de la información.....	18
3.6.1 Hipótesis.....	18
3.6.2 Identificación de variables.....	18
3.6.2.1 Variable independiente.....	18
3.6.2.2 Variable dependiente.....	19

3.6.3	Operacionalización de variables.....	19
CAPÍTULO IV.....		20
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1	Resultados	20
4.1.1	Resultados de la simulación de la red WDM ideal	20
4.1.1.1	Valores de Potencia de transmisión y recepción de la red WDM ideal	20
4.1.1.2	Valores de Amplitud del Espectro Óptico de la red WDM ideal.....	21
4.1.1.3	Tasa de bit errados (BER) de la Red WDM ideal.....	22
4.1.2	Resultados de la simulación de la red WDM con el efecto XPM	23
4.1.2.1	Valores de Potencia de transmisión y recepción de la red WDM con el efecto XPM	24
4.1.2.2	Valores de Amplitud del Espectro Óptico de la red WDM con el efecto XPM	25
4.1.2.3	Tasa de bit errados (BER) de la Red WDM inducida al efecto XPM.....	25
4.1.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	28
4.1.3.1	Demostración de la Hipótesis.....	28
4.2	Discusión.....	29
CONCLUSIONES		31
RECOMENDACIONES.....		32
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		33
ANEXOS		35

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros de la fibra monomodo SSMF.....	16
Tabla 2: Operacionalización de las variables	19
Tabla 3: Valores de la potencia de recepción	20
Tabla 4: Amplitud del espectro óptico en el Sistema de Comunicaciones Ideal.....	21
Tabla 5: Valores de la tasa de bits errados en el Sistema de Comunicaciones Ideal.....	22
Tabla 6: Valores de la potencia de recepción	24
Tabla 7: Amplitud del espectro óptico en el Sistema de Comunicaciones WDM con el efecto XPM.....	25
Tabla 8: Valores de la tasa de bits errados en el Sistema de Comunicaciones WDM inducido al efecto XPM.....	26
Tabla 9: Valores de las variables obtenidas.....	28
Tabla 10: Valores de los datos esperados.....	29
Tabla 11: Parámetros para comprobar la Hipótesis.....	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fundamento de funcionamiento de WDM.....	8
Figura 2: Sistema de comunicaciones óptico para WDM	10
Figura 3: Clasificación de los efectos no lineales en las fibras ópticas	12
Figura 4: Diagrama de bloques del un sistema WDM.....	15
Figura 5: Diseño del sistema WDM en OptiSystem.....	16
Figura 6: Diseño Ideal de la Red WDM	20
Figura 7: Potencia óptica: a) Salida Transmisor. b) Salida tramo ideal. c) Salida tramo Matlab.	21
Figura 8: Amplitud del espectro óptico: a) Salida Transmisor. b) Salida tramo ideal. c)Salida tramo Matlab.....	21
Figura 9: Factor de Calidad a) Tramo ideal. b) Tramo Matlab.	22
Figura 10: Min BER. a) Tramo ideal. b) Tramo Matlab..	22
Figura 11: Umbral a) Tramo ideal. b) Tramo Matlab.....	23
Figura 12: Apertura de ojo a) Tramo ideal. b) Tramo Matlab.....	23
Figura 13: Red WDM inducida al efecto no lineal XPM	24
Figura 14: Potencia óptica: a) Salida Transmisor. b) Salida tramo XPM. c) Salida tramo Matlab XPM.....	24
Figura 15: Amplitud del espectro óptico: a) Salida Transmisor. b) Salida tramo XPM. c)Salida tramo Matlab XPM.	25
Figura 16: Factor de Calidad a) Tramo XPM. b) Tramo Matlab XPM.....	26
Figura 17: Min BER. a) Tramo XPM. b) Tramo Matlab XPM.....	26
Figura 18: Umbral a) Tramo XPM. b) Tramo Matlab XPM..	27
Figura 19: Apertura de ojo a) Tramo XPM. b) Tramo Matlab XPM..	27

RESUMEN

En la actualidad la tecnología ha influenciado en gran medida la actividad humana diaria, tanto a nivel de entretenimiento como comercial, estas particularidades han impulsado la necesidad de aumentar la capacidad de los servicios de telecomunicaciones, el uso de aplicaciones de voz, datos y video, exigen mayores tasas de velocidad y ancho de banda, las empresas que prestan estos servicios con el fin de mejorar la calidad de comunicaciones están obligados a desarrollar mejores sistemas y medios de transmisión, para cubrir estas expectativas los prestadores de servicios han optado por utilizar la fibra óptica.

Para determinar los parámetros que impactan en el desempeño de la transmisión mediante la fibra óptica en un sistema WDM se realizará el diseño y la simulación de una red inducida al efecto no lineal XPM.

En el capítulo 1, se establece el planteamiento del problema y los objetivos planteados para desarrollar el proyecto de investigación.

En el capítulo 2, se desarrollan los antecedentes y el estudio del fenómeno no lineal XPM en fibras monomodo SSMF, se explica el origen y las alteraciones de este fenómeno en los sistemas WDM.

En el capítulo 3, se realiza la metodología necesaria para diseñar y simular una red WDM inducida al efecto no lineal denominado Cross phase modulation (XPM).

En el capítulo 4, se presentan las comparaciones de los resultados obtenidos de las simulaciones en OptiSystem de una red WDM ideal con la de una red WDM inducida al efecto no lineal XPM.

Palabras clave: Modulación de fase cruzada, Sistema WDM, Efectos no lineales, dispersión cromática, separación de canales.

ABSTRACT

Currently, technology is dramatically influencing daily human activity in entertainment and commercial terms.

These particularities have driven the need to increase the capacity of telecommunications services, the use of voice, data, and video applications demanding higher rates of speed and bandwidth.

To improve the quality of communications companies that provide these services are obliged to develop better systems and means of transmission. To meet these expectations, service providers have chosen to use fiber optics.

The design and simulation of a network induced to the non-linear XPM effect will be carried out to determine the parameters that impact the transmission performance using the optical fiber in a WDM system,

In chapter 1, the problem statement and the objectives set to develop the research project are establishing.

In chapter 2, the antecedent and the study of the non-linear XPM phenomenon in single-mode SSMF fibers are developing, the origin and alterations of this phenomenon in WDM systems are explaining.

In Chapter 3, the methodology necessary to design and simulate a non-linear WDM network called Cross pass modulation (XPM) is performing.

In Chapter 4, comparisons of the results obtained from the Opti-System simulations of an ideal WDM network with that of a WDM network induced to the non-linear XPM effect are presenting.

Keywords: Cross phase modulation, WDM system, non-linear effects, chromatic dispersion, channel separation.



SIGNATURE

Reviewed by: Maldonado, Ana
Language Center Teacher



INTRODUCCIÓN.

La evolución de la capacidad de los sistemas de comunicación óptica ha convertido a la fibra óptica en una de las tecnologías más avanzadas, ya que es uno de los medios de transmisión más utilizados en el mundo debido a las altas prestaciones que posee como son: mayor velocidad de transmisión, gran ancho de banda, baja atenuación, excelente cobertura.

Estos avances tecnológicos requieren que la velocidad y distancia de transmisión utilizadas en este medio sean cada vez mayor, debido a estas nuevas exigencias las señales transmitidas a través de la fibra óptica pueden estar expuestas a efectos no lineales.

Los efectos no lineales se producen en todos los dieléctricos cuando existen potencias ópticas suficientemente grandes es decir campos electromagnéticos muy intensos propagándose por ellos.

Con la aparición de los amplificadores ópticos, que introducen fuertes potencias luminosas en los pequeños núcleos de las fibras y la utilización del multiplexado en longitud de onda (WDM), los efectos no lineales en fibras ópticas son cada vez más importantes.

En este proyecto de investigación se pretende realizar el estudio del fenómeno no lineal CROSS PHASE MODULATION (XPM) que aparece en la fibra óptica al utilizar grandes velocidades de transmisión y potencias elevadas. Lo que se pretende con este estudio es poder realizar una simulación del sistema transmisor y receptor usando el sistema WDM para así determinar el porcentaje de afectación en el rendimiento del sistema al producirse este fenómeno.

Las degradaciones ópticas se analizan en una red WDM, ya que es un modelo de multiplexación que combina dos o más señales ópticas mediante portadoras de diferentes longitudes de onda en una fibra óptica, explotando de esta manera el gran ancho de banda de la fibra. Para llevar a cabo la comunicación desde el transmisor, a través de la fibra y hasta el receptor, el sistema óptico utiliza diferentes elementos: moduladores, codificadores, divisores de canal, regeneradores, amplificadores, decodificadores y foto-receptores. (Perafán López, Tovar Toledo, Ordóñez, & Agredo, 2011)

Para realizar este estudio se ha tomado en cuenta el software de Simulación "OptiSystem" por ser una herramienta que permite la simulación de los efectos no lineales con una interfaz amigable.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 PROBLEMATIZACIÓN.

Gracias al avance de la tecnología, los nuevos servicios que se ofrecen en el área de las telecomunicaciones permiten utilizar sistemas de comunicación ópticos para la transmisión de información, sin embargo, en los últimos años la implementación de sistemas WDM ha aumentado ya que tiene la ventaja de tener grandes tramos sin la necesidad de regenerar la señal óptica para así adquirir velocidades de transmisión altas a distancias largas, pero esta implementación provoca fuentes de deterioro en la calidad de transmisión, entre las que se encuentran los efectos no lineales producidos en los sistemas de transmisión de fibra óptica de alta velocidad.

En la fibra óptica se presentan efectos que perjudican la transmisión de las señales, ya que degradan la calidad de la señal óptica, limitando el desempeño de las redes. Dentro de estos efectos paramétricos se encuentra el efecto no lineal Cross Phase Modulation (XPM) que se genera cuando dos o más canales ópticos son transmitidos simultáneamente a través de la fibra óptica, usando el sistema de comunicación WDM.

1.2 JUSTIFICACIÓN.

Para poder comprender el efecto no lineal XPM en la fibra óptica monomodo, se realizará un análisis de todos los parámetros que influyen en este efecto mediante las simulaciones tomando en cuenta diversas condiciones de transmisión. El efecto no lineal Cross Phase Modulation (XPM) se podrá diseñar y simular un sistema de comunicaciones WDM en la cual se incluirá este fenómeno para determinar la eficiencia del sistema.

Al realizar este proyecto de investigación se realizará el estudio de los parámetros en la eficiencia de una fibra óptica monomodo para determinar cómo se comporta el efecto no lineal XPM en la propagación a través de la fibra óptica a fin de determinar su afectación en la calidad de una transmisión en un sistema WDM, también se determinará el porcentaje de afectación en el rendimiento del sistema al producirse el efecto no lineal XPM.

1.3 OBJETIVOS:

1.3.1 Objetivo General

- Diseñar y simular una red WDM bajo el efecto no lineal de la fibra denominada CROSS PHASE MODULATION (XPM) que permita determinar el rendimiento de un sistema de comunicaciones óptico.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Diseño y simulación de un transmisor y receptor WDM a través de los principios básicos de las comunicaciones ópticas para evaluar el rendimiento del sistema.
- Evaluar el desempeño de un sistema de comunicaciones al inducir la fibra a parámetros críticos para determinar el efecto no lineal CROSS PHASE MODULATION (XPM).

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Las señales que se propagan por la fibra óptica se comportan linealmente cuando trabajan a niveles bajos de potencia y a velocidades de transmisión no son mayores de 2.5 Gbps, pero a velocidades superiores como 10 Gbps o potencias más altas, se generan en las señales ciertos fenómenos que hacen que la fibra óptica se comporte no linealmente (Ramaswami, 2014).

El incremento del ancho de banda requerido por los sistemas de comunicaciones al utilizar redes pasivas con capacidad de Gigabit (Gigabit-capable Passive Optical Network, XGPON) y redes de acceso (Fiber to the Home, FTTH), junto con técnicas de multiplexación más eficientes, como la multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM), ocasionan que las potencias de las señales que se propagan por la fibra se incrementen de manera considerable (>10 mW) y que estos fenómenos no lineales empiecen a jugar un papel importante en el análisis de un sistema de comunicaciones óptico (Ramaswami, 2014).

Los fenómenos no lineales se producen debido a la dependencia del índice de refracción de la fibra óptica, con la potencia del campo eléctrico aplicado; conllevando a la aparición de fenómenos, como el que se analizará en este proyecto de investigación: la modulación de fase cruzada (Cross-phase Modulation, XPM), este fenómeno causa que la señal óptica se degrade, restringiendo el desempeño de la comunicación. (López, 2011)

2.2 Fibra óptica

La fibra óptica, en comparación con otro tipo de medios guiados, posee un gran ancho de banda y baja atenuación, es más confiable ya que no sufre interferencia electromagnética, cuenta con un amplio rango de tolerancia a la temperatura, es más liviana; estas características entre otras la han destacado sobre otros medios de transmisión.

Actualmente la inmensa mayoría de las comunicaciones ópticas se transmiten por fibra óptica. Una fibra óptica consiste en un finísimo hilo de vidrio muy puro (aunque también se construyen de plástico, por economía), con un diámetro de entre cinco o diez micras. Para darle rigidez mecánica, al fabricarlo se rodea de más vidrio o plástico, pero este vidrio o plástico de fuera no es el que conduce la luz. De hecho, las dos partes de la fibra óptica se construyen a propósito con un índice de refracción diferente para que la luz sea

reflejada siempre hacia el interior y así confinar el haz. Externamente se le pone un recubrimiento para su protección frente al exterior.

Desde sus primeras instalaciones, en las líneas que enlazaban las grandes centrales de conmutación, la fibra se está trasladando hoy en día hasta los mismos hogares, extendiéndose su uso a un sin número de aplicaciones.

Este papel destacado de las fibras es debido a sus muchas propiedades favorables, entre las que merecen destacarse:

- Alta capacidad en la transmisión.
- La señal óptica tiene baja atenuación.
- Las interferencias electromagnéticas no afectan el desempeño de la fibra.
- Los cables ópticos tienen mejores características que los cables de conductores
- Bajo coste potencial, a causa de la abundancia del material básico empleado en su fabricación (óxido de silicio). (Boquera, 2005)

La fibra óptica normalmente se comercializa agrupadas en diversos conjuntos (4, 8, 16, 32, ...) que a su vez se reagrupan en diversos cables para facilitar el despliegue masivo, recubiertos de un revestimiento apto para soportar los daños que pueda infligir el entorno, y cuya apariencia externa es la de un cable flexible.

2.2.1 Fibra monomodo

Se encuentra dentro de la clasificación de la fibra óptica de acuerdo con el modo de propagación, este tipo de fibra se caracteriza por permitir el paso de un solo modo de luz por el eje del núcleo, por esta razón el diámetro del núcleo de la fibra debe ser diseñado para permitir la propagación de este único modo y que los otros modos no sean aceptados, esto se realiza tomando en cuenta factores como el índice de refracción y la longitud de onda de la señal incidente, comúnmente existen fibras cuyo diámetro está ente $5\mu\text{m}$ y $10\mu\text{m}$.

Debido a que este tipo de fibra no se produce la dispersión modal, esto permite que su banda de paso alcance, e incluso supere en algunos casos, los 100 GHz/km y se pueda cubrir grandes distancias, éstas van desde cientos a miles de kilómetros, por esta razón son utilizadas en enlaces intercontinentales.

Aunque permite mayores tasas de transmisión con respecto a la fibra óptica multimodo y presenta una atenuación pequeña, además de un tiempo de vida más elevado, tiene mayor

complejidad en su construcción, es importante realizar un análisis costo-beneficio para elegir entre ellas, esto considerando el objetivo principal de la instalación de fibra óptica.

2.2.1.1 Fibra óptica monomodo estándar

La recomendación UIT-T G.652 define a las fibras SSMF (Standard Single Mode Fiber), este tipo de fibras ópticas se encuentran diseñadas con un índice de refracción en forma escalonado, con una diferencia entre los índices del manto y núcleo del 1%, trabaja en la ventana de 1310nm con dispersión nula, aunque puede ser utilizada en 1500nm junto a técnicas de compensación de dispersión cromática. (ITU-TG.652, 2005)

2.3 Sistema de comunicaciones óptico WDM

Uno de los campos fundamentales en el mundo de las telecomunicaciones es el referente al campo de la óptica, donde la modulación de la longitud de onda (definida con la letra griega lambda: λ) permite transmitir señales analógicas o digitales de unos pocos GHz o Gbits sobre una señal portadora de muy alta frecuencia, típicamente de 186 a 196 THz.

Los sistemas WDM resumen todo el potencial que se le suponía a la capacidad de transmisión de la fibra óptica desde hace décadas. Las técnicas de multiplexación por división en longitud de onda, junto con los amplificadores EDFA (*Erbium-Doped Fiber-Amplifier*, amplificadores de fibra dopada con erbio), han demostrado los enormes anchos de banda que pueden soportar estos sistemas, logrando tasas de transmisión de varios terabits por segundo en sistemas a corta distancia y de cientos de gigabit por segundo en sistemas a larga distancia. La actual generación de sistemas de transmisión por cable submarino utiliza técnicas WDM para lograr un mayor incremento de la capacidad y de la flexibilidad de las redes actuales de fibra óptica. El desarrollo de las técnicas de transmisión WDM satisfacen hoy en día la demanda de telecomunicaciones internacionales.

Mediante la Multiplexación por División de Longitudes de Onda (WDM) es posible acoplar fuentes de luz de diferentes longitudes de ondas ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$) en una única fibra óptica. Después de la transmisión sobre la fibra, las señales ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$) pueden ser separadas desde el extremo de la fibra hacia diferentes puntos de recepción.

Es posible explicar la técnica de WDM de una manera sencilla mediante la Figura 1 obtenida de la empresa inglesa “Metrodata”. A cada canal que se desea transmitir se le asigna una longitud de onda, la cual responderá a un color de luz específico, por tanto, si se desea transmitir varios canales, cada uno de ellos dispondrá de un color distinto al de los demás, formando así un “arco iris” que se enviará por una única de fibra.

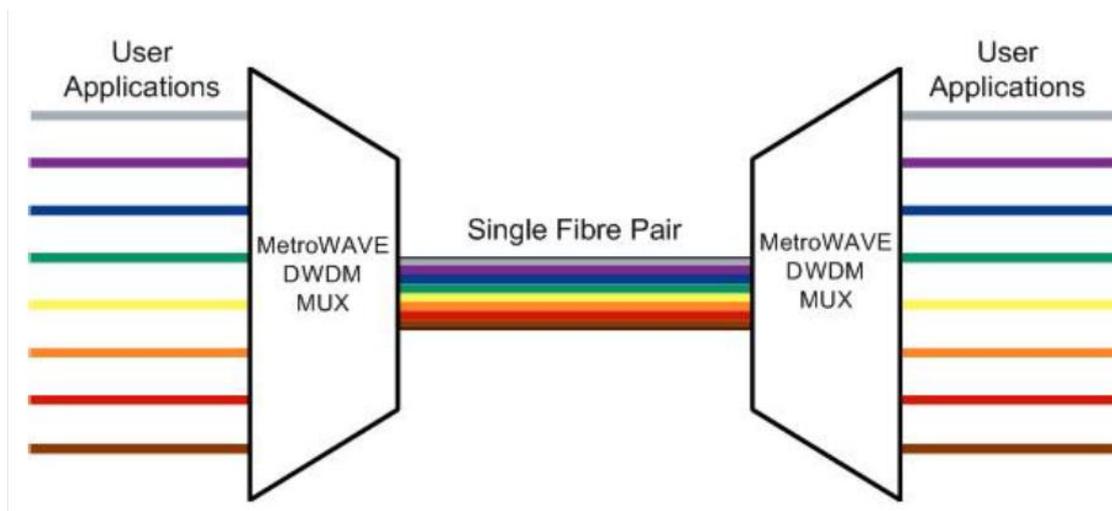


Figura 1: Fundamento de funcionamiento de WDM
Autor: Metrodata

WDM fue capaz de incrementar la capacidad del medio físico desmarcándose de la transmisión mediante Multiplexación por División en el Tiempo (TDM).

En un sistema WDM, cada una de las longitudes de onda es lanzada dentro de la fibra, y la señal es de-multiplexada en la parte final del medio. Así como en TDM la capacidad resultante es una suma de las señales de entrada, WDM transporta cada una de las señales de entrada independientemente de las demás. Esto significa que cada canal tiene su propio ancho de banda dedicado; además, todas las señales llegan en el mismo instante, lo que se hace preferible a que sean divididas y transportadas en distintos “slots” de tiempo, por lo tanto, la única latencia que se encontrará será la propiamente introducida por el medio de transmisión.

2.3.1 Aspectos importantes de WDM

Un aspecto importante de un enlace de comunicaciones ópticas es que se pueden enviar simultáneamente muchas longitudes de onda distintas a través de un mismo cable de fibra óptica en la banda espectral de 1300 a 1600 nm. La técnica de combinar un determinado número de longitudes de onda dentro de la misma fibra recibe el nombre de WDM (Wavelength Division Multiplexing) o múltiplex por división en longitud de onda.

Conceptualmente, el esquema WDM es el mismo que el del múltiplex por división en frecuencia (FDM) utilizado tanto en los enlaces de radio por microondas como en los sistemas vía-satélite. Al igual que en FDM, las longitudes de onda (o frecuencias ópticas) en WDM se deben espaciar para evitar la interferencia intercanal. Las claves de un sistema WDM son las siguientes:

Aumento de la capacidad: la aplicación clásica del WDM ha sido el incremento de la capacidad de los enlaces ópticos punto-a-punto ya existentes. Si cada longitud de onda soporta una señal independiente de unos pocos gigabits por segundo, entonces la capacidad total de una red óptica gracias al WDM aumenta de forma considerable.

Transparencia: un aspecto importante del WDM es que cada canal óptico soporta cualquier formato de transmisión. Por ejemplo, mediante el uso de diferentes longitudes de onda se puede enviar de forma simultánea e independiente tanto información digital síncrona y asíncrona, así como información analógica, sobre el mismo soporte físico sin tener la necesidad de una estructura común para la señal.

Enrutado y encaminamiento óptico: además del uso de múltiples longitudes de onda para incrementar la capacidad y la flexibilidad del enlace, el uso de dispositivos de enrutamiento ópticos sensibles a la longitud de onda, hace posible el uso de la longitud de onda como otra dimensión, además de las ya conocidas de tiempo y espacio, en el diseño de nodos y redes de comunicación. Los componentes básicos para implementar estas arquitecturas incluyen multiplexores y conectores ópticos, así como convertidores de longitud de onda.

WDM es un modelo de Multiplexación que combina dos o más señales ópticas mediante portadoras de diferentes longitudes de onda en una fibra óptica, explotando de esta manera el gran ancho de banda de la fibra. Para llevar a cabo la comunicación desde el transmisor, a través de la fibra y hasta el receptor, el sistema óptico utiliza diferentes elementos: moduladores, codificadores, divisores de canal, regeneradores, amplificadores, decodificadores y foto receptores, como se muestra en la Figura 2, donde se presenta el esquema de una red WDM. (Álvarez, 2007)

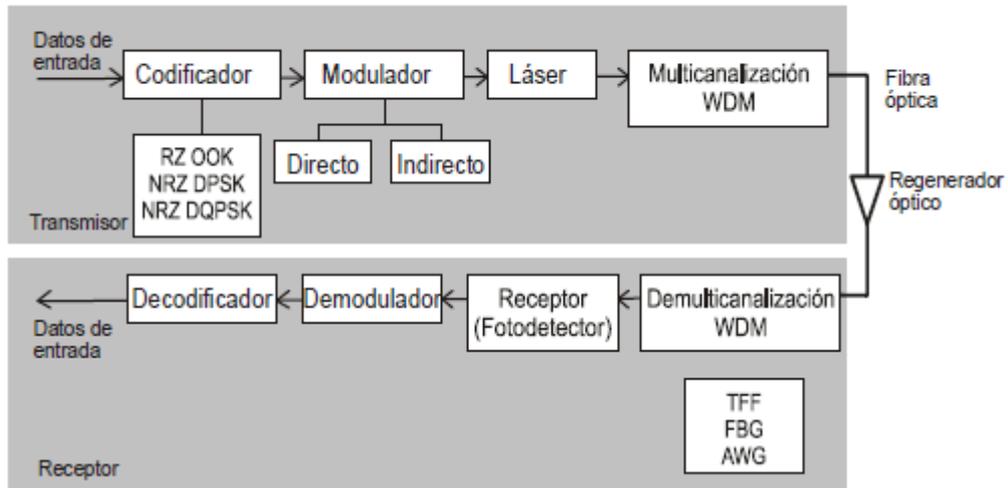


Figura 2:Sistema de comunicaciones óptico para WDM
Fuente: (Viglienzoni, 2010)

2.3.2 Parámetros de Transmisión en sistemas WDM

2.3.2.1 Espaciamiento del canal

Los espaciamientos entre las diferentes señales multiplexadas pueden ser de 200GHz, 100GHz, 50GHz, 25GHz o 12,5GHz, pero los valores de las frecuencias para la separación entre señales que están actualmente estandarizados en la recomendación G.694.1 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) son los de 50, 100 y 200 GHz. (ITU-TG.694.1, 2012)

2.3.2.2 Ancho de banda de la señal

Los sistemas WDM son capaces de transportar señales ópticas con grandes anchos de banda, en un futuro podrán soportar velocidades de 40 Gbps por cada longitud de onda con 300 canales multiplexados.

2.3.2.3 Potencia de la señal

La distancia es uno de los principales factores para que la potencia de la señal decrezca exponencialmente en los sistemas ópticos.

En los sistemas WDM el láser emisor proporciona la potencia de entrada, a lo largo del enlace óptico se presentan varios sucesos que distorsionan la señal como son los efectos no lineales afectando de esta manera la potencia de salida.

2.3.2.4 Codificación

Las portadoras de información contienen señales eléctricas y para ser transmitidas tienen que ser codificadas para convertirse en señales ópticas, el receptor del sistema de comunicaciones ópticas decodifica para que vuelvan a ser señales eléctricas.

En los sistemas de comunicaciones ópticas los tipos de codificación más usados son: no retorno a cero (NRZ) y retorno a cero (RZ).

2.3.2.5 Tasa de bit errado (BER)

La tasa de bits errados (BER) nos indica cuando un paquete de datos tiene un error debe ser retransmitida.

Es un parámetro clave para poder evaluar los sistemas que transmiten información de un lugar a otro.

2.3.2.6 Ruido

En los sistemas ópticos el uso de amplificadores es necesario, pero al amplificar la señal se puede observar la presencia de ruido. Uno de los parámetros para poder determinar la calidad de la comunicación en el extremo de la recepción es la relación señal a ruido óptico (OSNR), que como su nombre lo indica es la relación de la potencia de la señal óptica a la potencia de ruido.

2.4 Efectos no lineales en la fibra óptica

En los sistemas de múltiples canales las características de dispersión de la fibra, el área efectiva, el índice de refracción no lineal, el número y la separación entre canales influyen para que aparezcan los efectos no lineales.

Si las potencias ingresan a la fibra óptica con un nivel intenso, hay efectos no lineales que comienza a aparecer al interior de la fibra óptica. La Figura 3 muestra las dos categorías de la clasificación de las no linealidades.

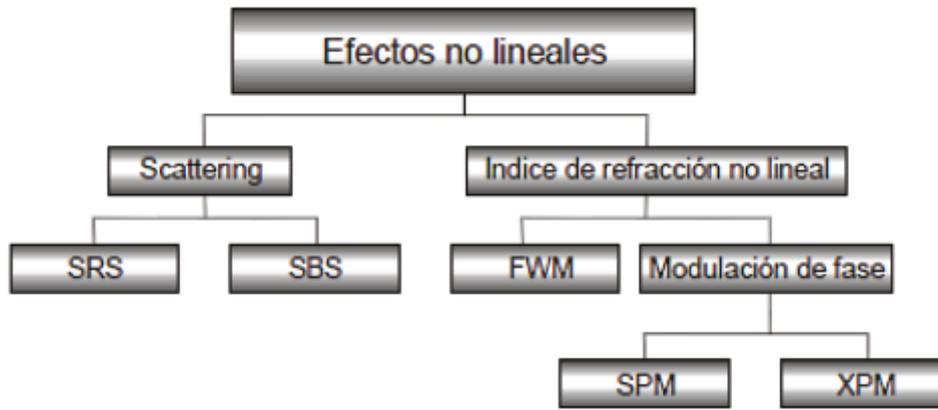


Figura 3: Clasificación de los efectos no lineales en las fibras ópticas
Autor: (López Perafán Jose Giovanni)

2.4.1 Cross phase modulation (XPM)

Cuando se produce un cambio en la intensidad de una onda, que se propaga con una longitud de onda diferente, se genera la XPM, que se trata de un desplazamiento en la fase de la señal transmitida en una longitud de onda dada. XPM puede producir ciertas asimetrías en el pulso óptico, esto puede limitar el desempeño de los sistemas de comunicaciones ópticas. (Pla, 2011)

El efecto no lineal Cross Phase modulation ensancha gradualmente el espectro de la señal porque las variaciones de la intensidad óptica producen cambios de fase producidos por interacción entre canales adyacentes en los sistemas WDM. La separación entre canales y la dispersión cromática están relacionadas con la cantidad de ensanchamiento introducido por la XPM porque las velocidades de grupo diferenciales inducidas por la dispersión tendrán por efecto que los impulsos que interactúan entre sí se separen a medida que se propagan a lo largo de la fibra. Debido al efecto de la dispersión cromática la señal experimenta un mayor ensanchamiento temporal a medida que se propaga a lo largo de la fibra (ITU-TG.663, 2000)

2.4.1.1 Limitaciones de transmisión inducidas

Según la (ITU-TG.663, 2000) el efecto no lineal XPM afecta al sistema de comunicaciones WDM por las siguientes razones:

- La separación entre canales es baja.

- Existen potencias altas en los sistemas WDM produciendo un cambio en la fase de la señal.
- Se produce entre canales adyacentes con el mismo valor de dispersión.
- Las señales de velocidad binaria menores.
- Interferencia entre canales adyacentes en sistemas de múltiples canales.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de Investigación

3.1.1 Tipo de Investigación

El presente proyecto de investigación reúne las condiciones metodológicas de una investigación aplicada, en razón, que se utilizaron conocimientos adquiridos en Comunicaciones Ópticas, a fin de aplicarlas en el diseño y simulación de una red WDM bajo el efecto no lineal Cross Phase Modulation (XPM), a la vez se adquieren parámetros que permiten conocer la realidad del rendimiento de un sistema de comunicaciones óptico.

3.1.2 Diseño de Investigación

Para realizar el diseño y simulación de un sistema WDM y medir el efecto no lineal de la fibra denominada CROSS PHASE MODULATION (XPM), se efectuará el siguiente procedimiento:

3.1.2.1 Diseño de un Sistema WDM ideal

- Obtener parámetros de la fibra (Datasheet).
- Diseño en el simulador.

3.1.2.2 Diseño de un Sistema WDM inducido al efecto no lineal XPM

- Obtener parámetros de la fibra (Datasheet).
- Parámetros causantes del efecto XPM
- Diseño en el simulador.

3.1.2.3 Pruebas

- Pruebas del simulador
- Establecer un escenario de simulación.
- Realizar mediciones de potencia y BER con ayuda del software OptiSystem, para el análisis del rendimiento del sistema de comunicaciones WDM.

3.2 Unidad de análisis

Al investigar la causante del efecto no lineal de la fibra denominada Cross phase modulation (XPM) sobre un sistema de comunicaciones WDM, se analizan los parámetros críticos para determinar como afecta al rendimiento del sistema de comunicaciones ópticas.

3.2.1 Diseño de la red WDM.

Según (Buelvas, Tellez, & Mateus, 2010) los equipos que se escogen para el diseño deben ir de acuerdo con los requerimientos de la norma EIA/TIA 569, ya que estos estandarizan los parámetros con la finalidad de que las simulaciones se asemejen a la implementación física y se tenga una idea clara de los factores que influirán en su funcionamiento.

Para simular los fenómenos no lineales de dispersión en una fibra óptica, es posible emplear diferentes tipos de software, cuyo principio se fundamenten en la solución de la NLSE mediante el método SSFM. Dentro de las alternativas de software analizadas se escogió OptiSystem por ser una herramienta versátil que se ajusta a los requerimientos tanto para la simulación del sistema de comunicaciones como también la capacidad de interactuar con el software Matlab que proporciona la ayuda necesaria para el posterior modelamiento del efecto no lineal XPM.

3.2.2 Diagrama de bloques del funcionamiento de Optisystem

El diagrama de bloques mostrado en la Figura 4 representa de manera abstracta el funcionamiento del simulador Optisystem, los datos que se obtendrán en el receptor son la respuesta del enlace de fibra óptica y el canal óptico del simulador en donde se representa las operaciones que realiza Matlab en base a la programación elaborada con el fin de simular el efecto no lineal XPM.

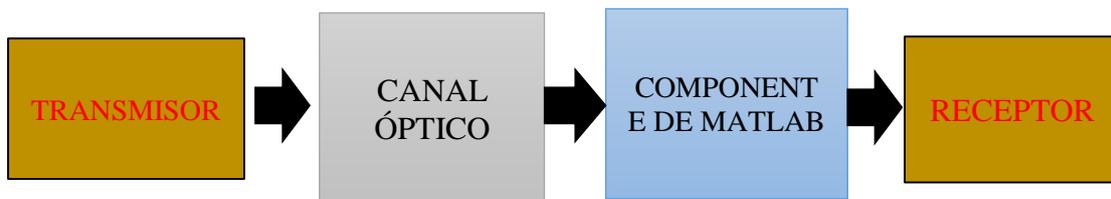


Figura 4: Diagrama de bloques del un sistema WDM
Fuente: Autor

3.2.3 Componentes de la red WDM

Los valores de la Tabla 1 se utilizarán en la simulación del efecto no lineal XPM, estos valores se encuentran detallados en el ANEXO 2.

Parámetros de la Fibra SSMF G.652	
Atenuación	0.275 dB/km
Dispersión	17 ps/nm.km
Pendiente de Dispersión	0.056 ps/nm ² .km
Área Efectiva	86.6 μm ²
n₂	18x10 ⁻²¹ m ² /W

Tabla 1: Parámetros de la fibra monomodo SSMF
Autor: (ITU-TG.652, 2005)

Para el desarrollo del diseño de comunicaciones WDM se toman los parámetros reales de los componentes ópticos que constituyen un enlace de fibra óptica, estos parámetros han sido tomados de fabricantes de componentes ópticos existentes en el mercado. Los datos están detallados en el apartado Anexos 3

- Sistema de Comunicaciones WDM.
- Bit Rate: 40 Gbps.
- Número de canales: 2.
- Polarización: NRZ.

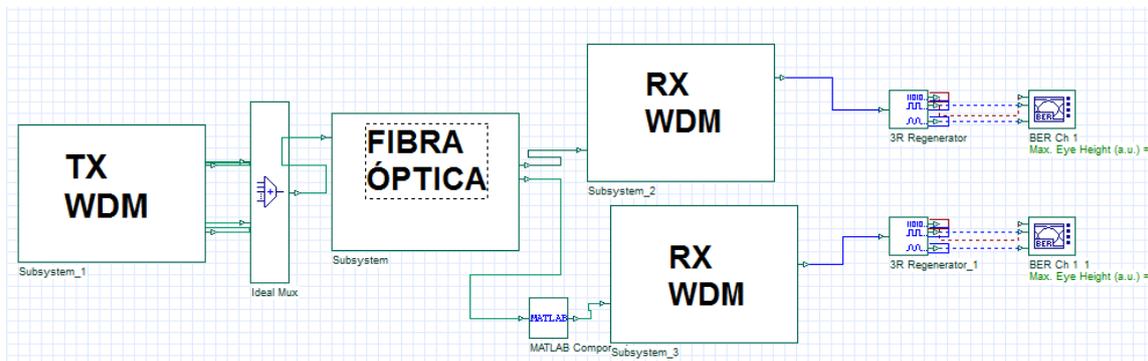


Figura 5: Diseño del sistema WDM en OptiSystem
Fuente: Autor.

3.3 Población de estudio

La población, es determinada por los datos obtenidos en un sin número de pruebas aleatorias de acuerdo con distintas causas de atenuación a diversas distancias, estableciendo de esta manera la efectividad de la fibra óptica.

3.4 Tamaño de muestra

El número de pruebas puede ser infinito ya que la población carece de un registro finito, la muestra se obtendrá a partir de la fórmula de la Ecuación 1.

$$n = \frac{Z_{\infty}^2 * p * q}{i^2} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Z_{∞} =Distribución de Gauss y tiene los siguientes valores $Z_{\infty}=0.05= 1.96$

p = prevalencia esperada de parámetro a evaluar, el valor tomado es un porcentaje alto de prevalencia $p=0.95$ es decir el 95 %.

$q= 1-p$

i = error considerado que se prevé cometer es del 5%, $i=0.05$

$$n = \frac{1.96^2 * 0.95 * (1 - 0.95)}{0.05^2}$$

$$n = \frac{3,8416 * 0.95 * 0.05}{0.0025}$$

$$n = \frac{0.1825}{0.0025}$$

$$n = 72.99$$

$$n=73$$

3.5 Técnicas de recolección de datos

3.5.1 Métodos

3.5.1.1 Método Descriptivo.

Es un método cuantitativo que tiene como objeto analizar el estado y/o comportamiento de una serie de parámetros establecidos y comparar los datos obtenidos a través de cálculos estadísticos para reflejar una tendencia.

- Diseño de un sistema de comunicaciones óptico WDM.
- Estudio del efecto no lineal de la fibra denominado Cross Phase Modulation (XPM).

3.5.1.2 Método Investigativo Experimental.

- Simulación de un sistema de comunicaciones óptico WDM ideal
- Simulación de un sistema de comunicaciones óptico WDM con el efecto XPM
- Realizar pruebas de la Red WDM

3.5.1.3 Método Analítico.

- Comprobación de las hipótesis a través de las variables y mediciones establecidas.
- Análisis del rendimiento del sistema de comunicaciones óptico.

3.5.2 Técnicas

3.5.2.1 Observación

Para este proyecto de investigación se utilizó la técnica de observación de tipo estructurada porque se utilizan métodos cuantitativos, de esta manera se realiza un estudio más preciso de los parámetros que se van a medir.

3.5.3 Instrumentos

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se utilizarán los siguientes instrumentos: para el análisis teórico libros, revistas, paper, tesis, páginas web, y para realizar la simulación se utilizará el software Optysystem, para simular la red WDM inducida al fenómeno no lineal Cross Phase Modulation (XPM).

3.6 Técnicas de Análisis e interpretación de la información

3.6.1 Hipótesis

El diseño y simulación de una red WDM inducida al efecto no lineal de la fibra Cross Phase Modulation (XPM) permitirá determinar el rendimiento de un sistema de comunicaciones óptico.

3.6.2 Identificación de variables

3.6.2.1 Variable independiente

El diseño y simulación de una red WDM inducida al efecto no lineal de la fibra denominado Cross Phase Modulation (XPM).

3.6.2.2 Variable dependiente

Permitirá determinar el rendimiento de un sistema de comunicaciones óptico.

3.6.3 Operacionalización de variables

VARIABLES	CONCEPTO	INDICADORES	INSTRUMENTO
INDEPENDIENTE			
Diseño y simulación de una red WDM inducida al efecto no lineal de la fibra denominada CROSS PHASE MODULATION	El efecto no lineal XPM surge debido a que el índice de refracción para una onda depende no sólo de la potencia de esa onda sino también de la potencia de cualquier otra onda que se propague junto a ella	<ul style="list-style-type: none"> -Diseño de la red Simulación de la red. -Simulación del efecto no lineal XPM. -Observar el efecto XPM causando alteraciones. 	<ul style="list-style-type: none"> -Cálculos -Software de simulación. -Características de los equipos.
DEPENDIENTE	CONCEPTO	INDICADORES	INSTRUMENTO
Permitirá determinar el rendimiento de un sistema de comunicaciones óptico.	Generalmente la gran cantidad de equipos transmite información de forma unidireccional a través de la fibra permitiendo conocer el rendimiento del sistema.	<ul style="list-style-type: none"> -Velocidad de transmisión. -Ancho de banda. -Sincronismo -Potencia en el Tx. -Potencia en el Rx. 	<ul style="list-style-type: none"> -Espectrómetro -Diagrama de Ojo

Tabla 2: Operacionalización de las variables

Fuente: Autor

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

Utilizando el software OptiSystem se realizan 2 escenarios de simulación para visualizar y analizar el rendimiento de un sistema de comunicaciones ópticas WDM ideal al inducir el efecto no lineal XPM.

4.1.1 Resultados de la simulación de la red WDM ideal

Para el análisis de la red WDM ideal del escenario de la Figura 6 se tomaron en cuenta los siguientes parámetros que ofrece el software OptiSystem:

- Analizador de espectro
- Medidor de potencia
- Analizador WDM
- Analizador BER
- Analizador del diagrama de ojo.

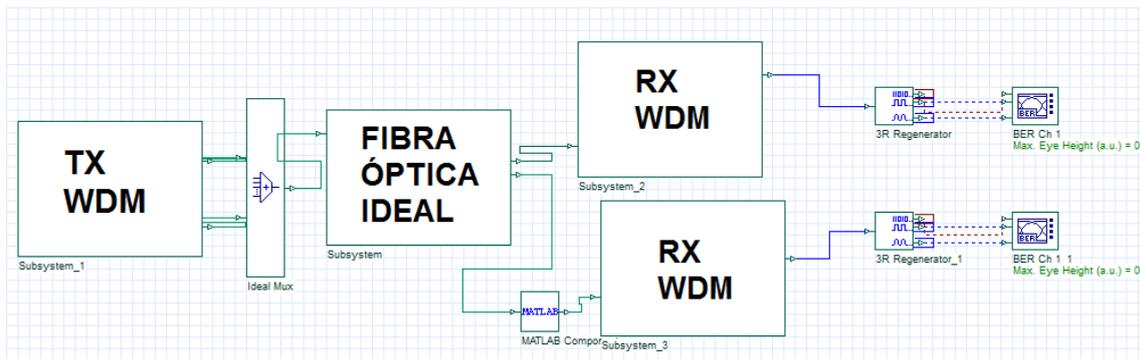


Figura 6: Diseño Ideal de la Red WDM
Fuente: Autor

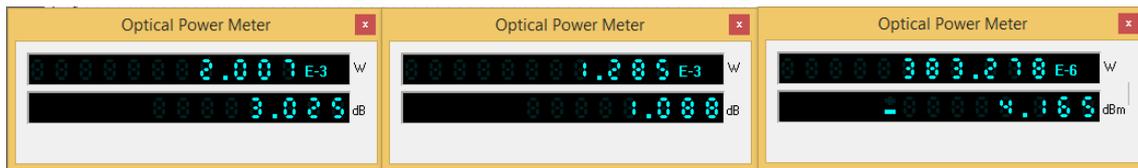
4.1.1.1 Valores de Potencia de transmisión y recepción de la red WDM ideal

Utilizando la herramienta de OptiSystem WDM Analyzer de Optisystem se obtienen los valores de la Tabla 3.

Canal Óptico Ideal	Frecuencia (THz)	Potencia de la señal (dBm)	Potencia de Ruido (dBm)	SNR (dB)	Potencia de Ruido: 0.1nm (dBm)	OSNR (dB)
Tramo Optisystem	191.5	0.2051189	-46.016871	46.22199	-48.058071	48.26319
Tramo Matlab	191.5	-5.0490522	-46.016871	40.967819	-48.058071	38.517402

Tabla 3: Valores de la potencia de recepción
Fuente: Autor.

En la Figura 7, se expone las medidas de la potencia óptica en a la salida del transmisor y en las salidas de los receptores del sistema WDM ideal.



a)

b)

c)

Figura 7: Potencia óptica: a) Salida Transmisor. b) Salida tramo ideal. c) Salida tramo Matlab.

Fuente: Autor.

4.1.1.2 Valores de Amplitud del Espectro Óptico de la red WDM ideal

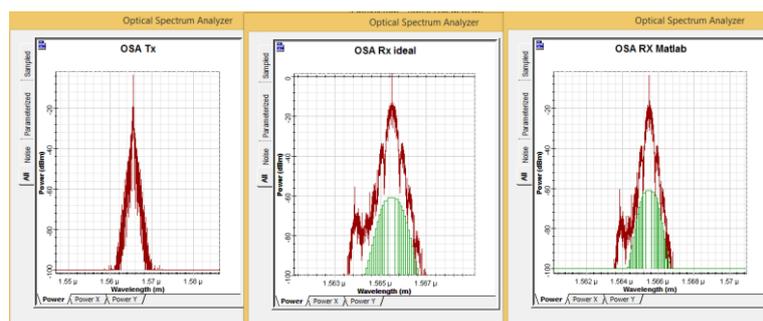
Los valores de la Tabla 4 se obtuvieron de la herramienta Optical Spectrum Analyzer de Optisystem.

Canal Óptico	Amplitud Máxima (dBm)	Amplitud Mínima(dBm)
Total Transmitida	2.1364446450	-104,8636402
Tramo Ideal	1.8814622482	-104,8514982
Tramo Matlab	-3.635417377	-104.5887896

Tabla 4: Amplitud del espectro óptico en el Sistema de Comunicaciones Ideal.

Fuente: Autor.

En la Figura 8, se muestra de manera gráfica las amplitudes del espectro óptico del sistema WDM ideal, a pesar de ser ideal se evidencia la presencia de ruido y distorsión en las señales de salida, esto se debe a que ha pasado por un proceso de amplificación y esto provoca la aparición de los efectos no lineales.



a)

b)

c)

Figura 8: Amplitud del espectro óptico: a) Salida Transmisor. b) Salida tramo ideal. c) Salida tramo Matlab.

Fuente: Autor

4.1.1.3 Tasa de bit errados (BER) de la Red WDM ideal

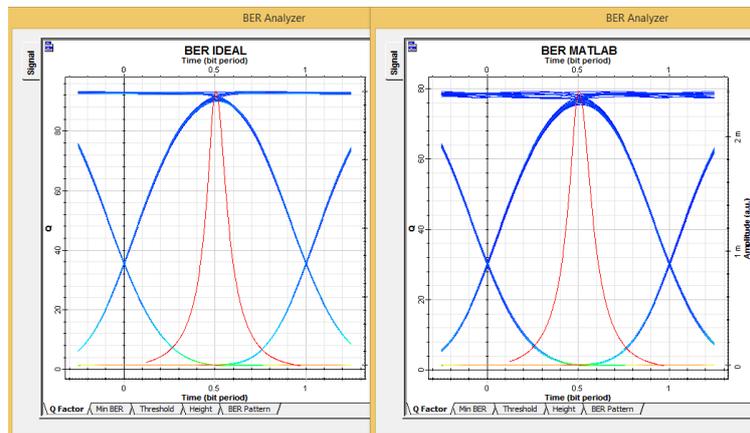
Los valores que se observan en la Tabla 5 hacen referencia a la herramienta BER Analyzer de Optisystem, se puede observar

Canal Óptico	Factor Q Máx.	Mín. BER	Apertura de Ojo	Umbral	Decisión Inst.
Tramo Ideal	93.3638	0.00755754	0.00755754	0.000527069	0.550781
Tramo Matlab	79.2313	0.00224035	0.00224035	0.000159325	0,550781

Tabla 5: Valores de la tasa de bits errados en el Sistema de Comunicaciones Ideal.

Fuente: Autor.

La Figura 9, corresponde al factor de calidad obtenido en un enlace óptico ideal, es decir a tasa de transmisión bajas, debido a que no se consideran las pérdidas por atenuación.



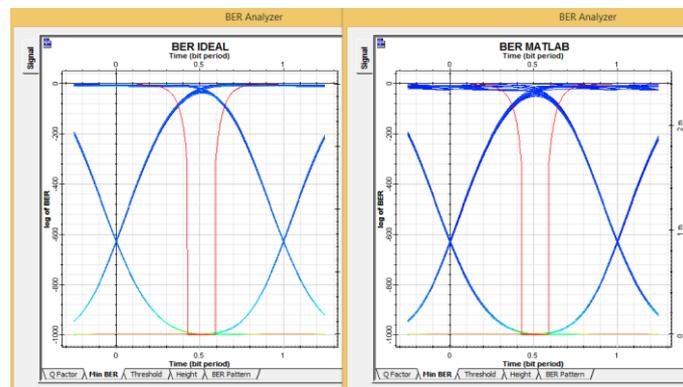
a)

b)

Figura 9: Factor de Calidad a) Tramo ideal. b) Tramo Matlab.

Fuente: Autor

La Figura 10, corresponde al Min BER obtenido en un enlace óptico ideal.



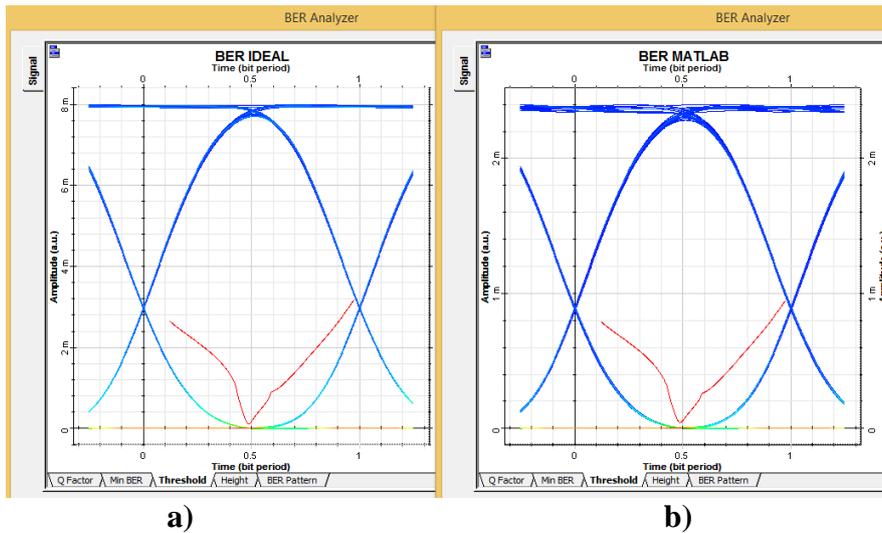
a)

b)

Figura 10: Min BER. a) Tramo ideal. b) Tramo Matlab..

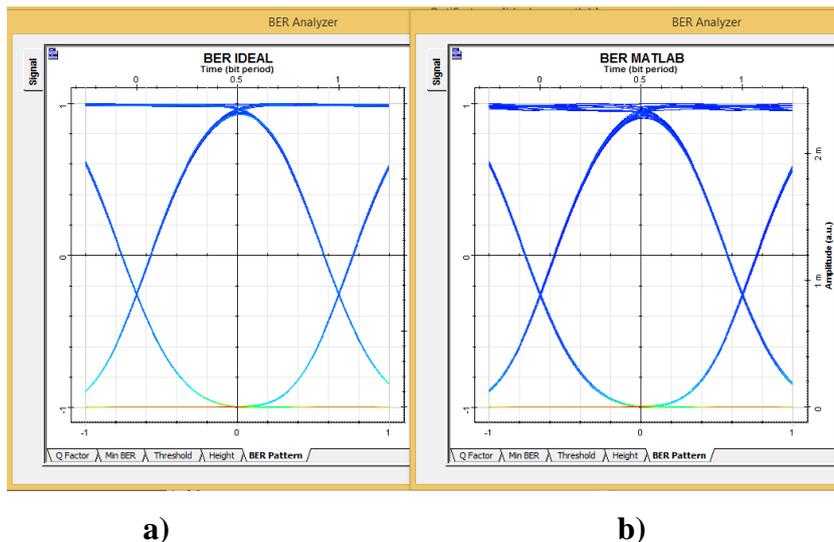
Fuente: Autor.

La Figura 11, corresponde al Umbral obtenido en un enlace óptico ideal.



a) b)
Figura 11: Umbral a) Tramo ideal. b) Tramo Matlab..
Fuente: Autor.

La Figura 12, corresponde a la apertura de ojo obtenido en un enlace óptico ideal.



a) b)
Figura 12: Apertura de ojo a) Tramo ideal. b) Tramo Matlab..
Fuente: Autor.

4.1.2 Resultados de la simulación de la red WDM con el efecto XPM

Para facilitar análisis de los resultados obtenidos del rendimiento del sistema de comunicaciones WDM, se examina los datos en el canal 1 y en el canal 2, ya que el efecto no lineal XPM está presente en los canales adyacentes.

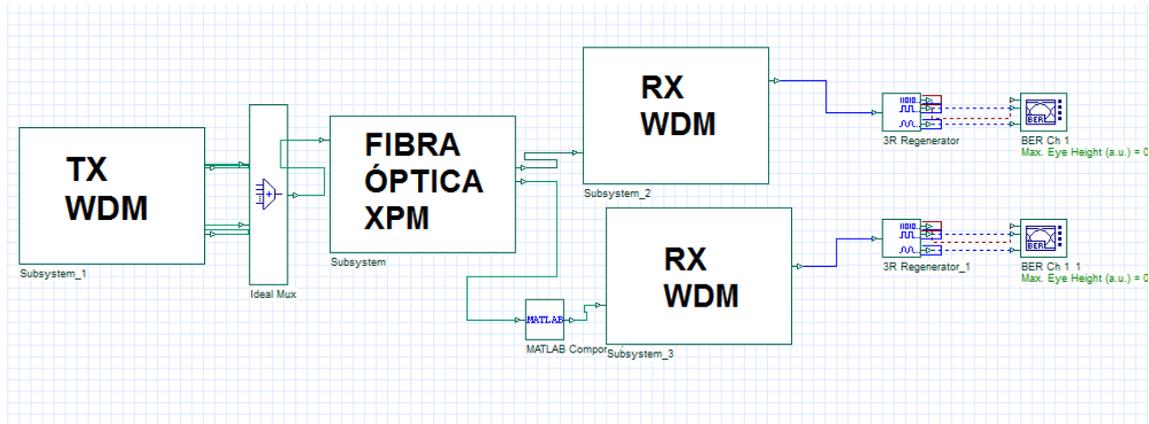


Figura 13: Red WDM inducida al efecto no lineal XPM

Fuente: Autor

4.1.2.1 Valores de Potencia de transmisión y recepción de la red WDM con el efecto XPM

Los valores de la Tabla 3, corresponden a la potencia de recepción utilizando la herramienta WDM Analyzer de Optisystem,

Canal Óptico Ideal	Frecuencia (THz)	Potencia de la señal (dBm)	Potencia de Ruido (dBm)	SNR (dB)	Potencia de Ruido: 0.1nm (dBm)	OSNR (dB)
Tramo Optisystem	191.5	-1.8598605	-46.016871	44.157011	-48.058071	46.19821
Tramo Matlab	191.5	-7.1140316	-46.016871	38.90284	-48.058071	40.944039

Tabla 6: Valores de la potencia de recepción

Fuente: Autor.

En la Figura 14, se expone las medidas de la potencia óptica en la salida del transmisor y en las salidas de los receptores del sistema WDM, comparando con los valores del sistema ideal de la Figura 7 se puede observar que los niveles de potencia de salida son muchos menores a los obtenidos en el sistema ideal.

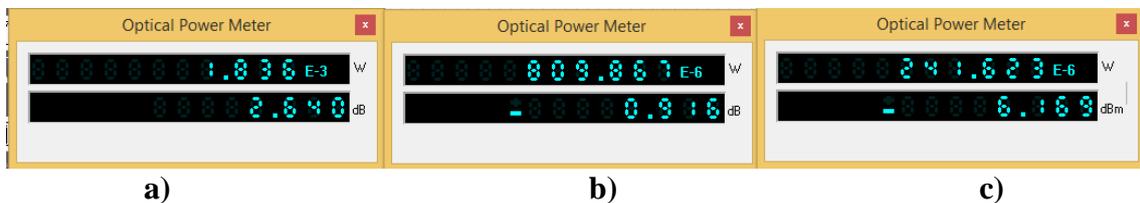


Figura 14: Potencia óptica: a) Salida Transmisor. b) Salida tramo XPM. c) Salida tramo Matlab XPM

Fuente: Autor.

4.1.2.2 Valores de Amplitud del Espectro Óptico de la red WDM con el efecto XPM

Los valores de la Tabla 4 muestran las amplitudes del espectro óptico del sistema WDM inducida al efecto no lineal XPM.

Canal Óptico	Amplitud Máxima (dBm)	Amplitud Mínima(dBm)
Total Transmitida	1.18191747	-104,818186
Tramo XPM	0.6682250	-104,793725
Tramo Matlab	-4.8486545	-104.531016

Tabla 7: Amplitud del espectro óptico en el Sistema de Comunicaciones WDM con el efecto XPM.

Fuente: Autor.

Las gráficas de las señales de la Figura 15, muestran las medidas de la amplitud del espectro óptico a la salida del transmisor y en las salidas de los receptores del sistema WDM con el efecto no lineal XPM, tomando en cuenta las gráficas de las señales del sistema WDM ideal de la Figura 8, se puede decir que al aplicar el efecto XPM las amplitudes del espectro óptico no se encuentran afectadas de manera significativa.

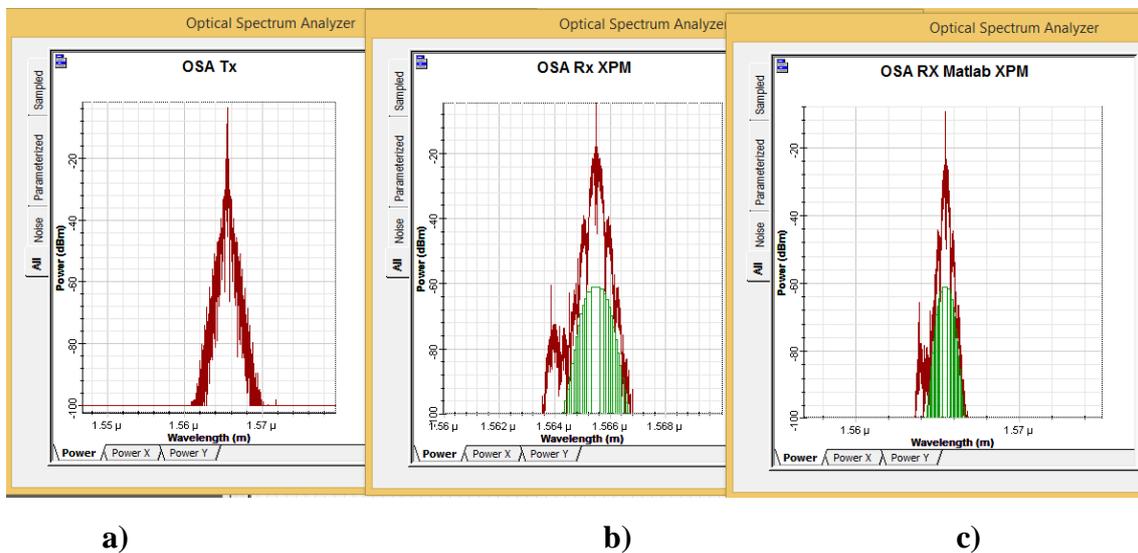


Figura 15: Amplitud del espectro óptico: a) Salida Transmisor. b) Salida tramo XPM. c) Salida tramo Matlab XPM.

Fuente: Autor

4.1.2.3 Tasa de bit errados (BER) de la Red WDM inducida al efecto XPM

Los valores que se observan en la Tabla 5 son los obtenidos de la herramienta BER Analyzer de Optisystem al simular la red WDM inducida al efecto XPM.

Canal Óptico	Factor Q Máx.	Mín. BER	Apertura de Ojo	Umbral	Decisión Inst.
Tramo XPM	1.31892	0.064141421	-0.00181135	0.000801893	0.533203
Tramo Matlab	1.30539	0.0656136	-0.00054364	0.000238783	0,529297

Tabla 8: Valores de la tasa de bits errados en el Sistema de Comunicaciones WDM inducido al efecto XPM.

Fuente: Autor.

La Figura 16, corresponde al factor de calidad obtenido en un sistema WDM inducido al efecto no lineal XPM, se puede visualizar la clara degradación debido a que se introdujo en la simulación los parámetros que provocan el efecto no lineal XPM descritos en la Tabla 1, comparando con los diagramas del sistema WDM ideal de la Figura 9, se puede evidenciar la incapacidad por parte del receptor para recuperar las señal transmitida.

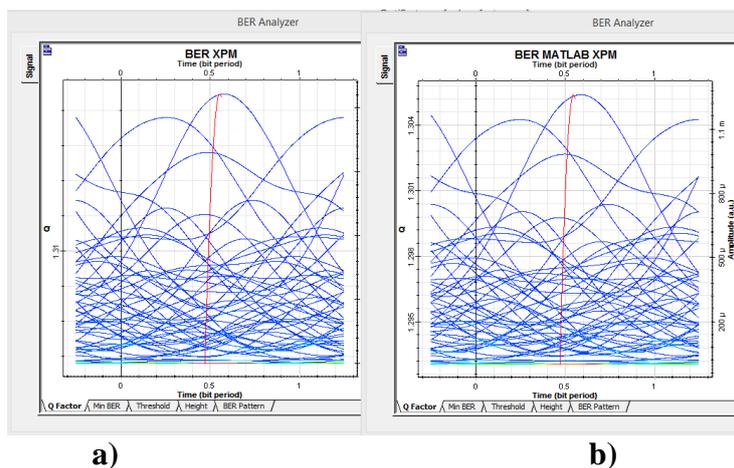


Figura 16: Factor de Calidad a) Tramo XPM. b) Tramo Matlab XPM.

Fuente: Autor

La Figura 17, corresponde al Min BER obtenido en el sistema WDM con el efecto XPM.

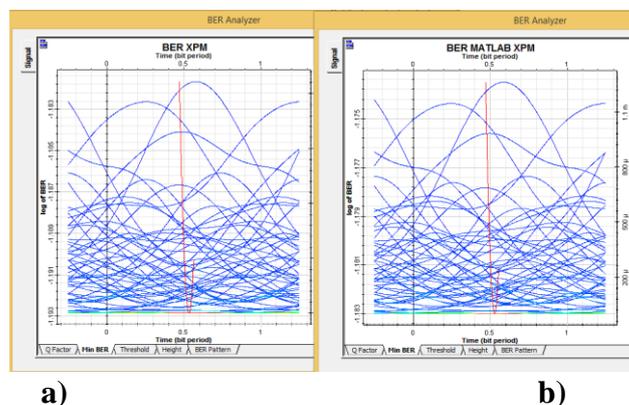
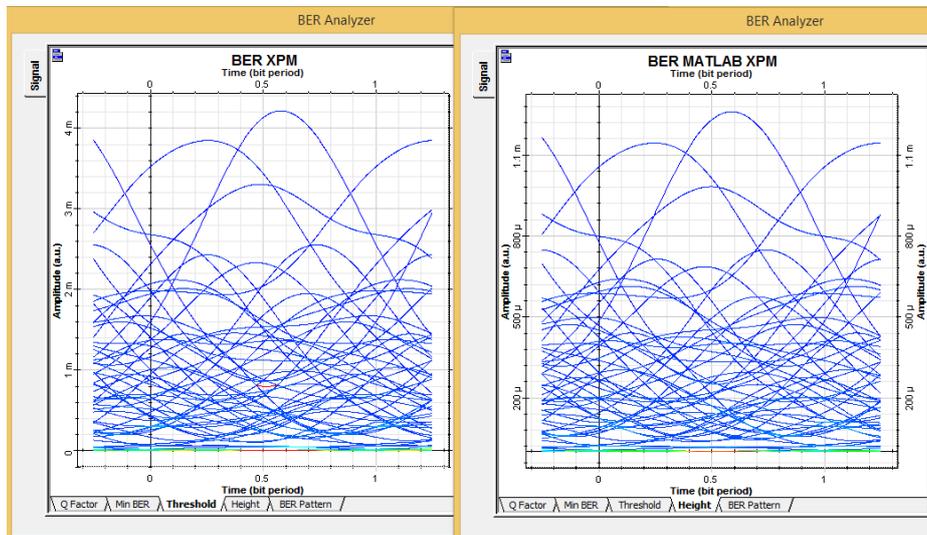


Figura 17: Min BER. a) Tramo XPM. b) Tramo Matlab XPM

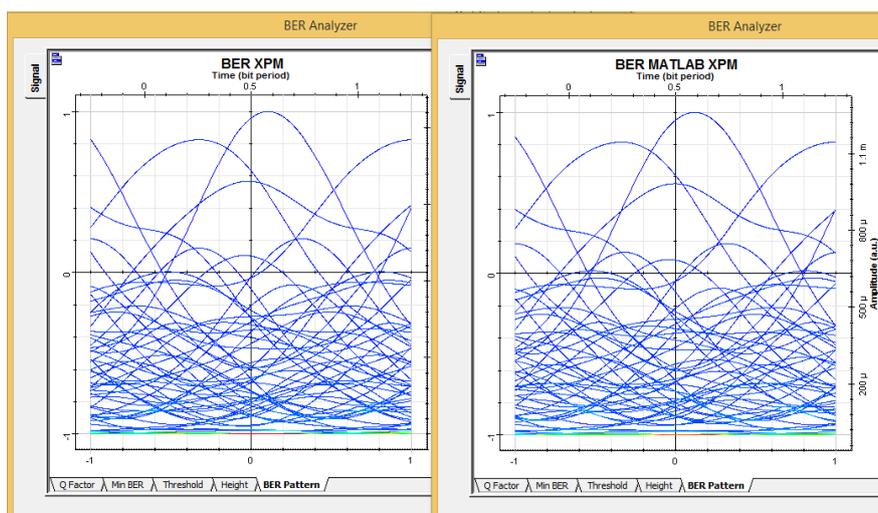
Fuente: Autor.

La Figura 18, corresponde al Umbral obtenido en la simulación del sistema WDM inducido al efecto no lineal XPM.



a) b)
Figura 18: Umbral a) Tramo XPM. b) Tramo Matlab XPM..
Fuente: Autor.

En la Figura 19, del sistema WDM con el efecto XPM se observa en la apertura de ojo la interferencia intersimbólica, esto se produce por el desplazamiento de fase por parte de los pulsos que se transmiten por el canal óptico, tomando como referencia la apertura de ojo de la Figura 12 del sistema WDM ideal, se puede decir que al inducir el efecto XPM a la fibra óptica las señales adquiridas se transforma en un hecho completamente indeseable.



a) b)
Figura 19: Apertura de ojo a) Tramo XPM. b) Tramo Matlab XPM..
Fuente: Autor.

4.1.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Se utiliza el método de la prueba del Chi- Cuadrado para ver si existe o no dependencia de las variables que se van a mencionar. Se analiza los valores de potencia de la señal, el factor de calidad, la apertura de ojo, umbral y decisión inst, obtenidos con la ayuda de las herramientas de visualización del Optisystem.

Los valores de los parámetros que se van a analizar se obtuvieron de:

- Resultados de la simulación de la red WDM ideal.
- Resultados de la simulación de la red WDM con el efecto XPM

4.1.3.1 Demostración de la Hipótesis

Para realizar la demostración de la hipótesis se utiliza los datos obtenidos en las simulaciones de la red WDM ideal y con el efecto XPM.

	Potencia	Factor Q	Apertura de ojo	Umbral	Decisión Inst.	TOTAL
T. Ideal	0.205	93.364	0.008	0.001	0.551	94.128
T. Matlab Ideal	-5.049	79.231	0.002	0.000	0.551	74.735
T. XPM	-1.860	1.319	-0.002	0.001	0.533	-0.009
T. Matlab XPM	-7.114	1.305	-0.001	0.000	0.529	-5.280
Total	-13.818	175.219	0.007	0.002	2.164	163.575

Tabla 9: Valores de las variables obtenidas.

Fuente: Autor

En la Tabla 9 se observan los valores de las variables obtenidas en las simulaciones realizadas, las mismas que serán utilizadas para realizar el cálculo de los valores esperados que se pueden ver en la Tabla 10.

	Potencia	Factor Q	Apertura de ojo	Umbral	Decisión Inst.
T. Ideal	-7.951	100.829	0.004	0.001	1.245
T. Matlab Ideal	-6.313	80.056	0.003	0.001	0.989
T. XPM	0.001	-0.009	0.000	0.000	0.000
T. Matlab XPM	0.446	-5.655	0.000	0.000	-0.070

Tabla 10: Valores de los datos esperados.

Fuente: Autor

En la Tabla 11 se pueden apreciar los valores calculados (grados de libertad), valores de la tabla chi cuadrado, nivel de significación para comprobar la hipótesis.

	r	4
	k	5
Grados de Libertad	$(r-1)(k-1)$	12
Nivel de significación	α	0.005
Chi Cuadrado X^2 Tabla	X^2_{TABLA}	28.3
X^2 Prueba	X^2_{PRUEBA}	2130.741

Tabla 11: Parámetros para comprobar la Hipótesis.

Fuente: Autor.

De los datos que se aprecian en la Tabla 11, sí, el valor X^2_{Prueba} es mayor a chi cuadrado X^2_{Tabla} , se aceptada la hipótesis, es decir que el efecto no lineal XPM influye en el rendimiento del sistema de comunicaciones diseñado, caso contrario no tiene sentido el desarrollo de la investigación.

Entonces según la Tabla 11 se tiene: $2130.741 > 28.3$ como si es mayor la hipótesis es válida.

4.2 Discusión

El desarrollo que se ha logrado en la capacidad de los dispositivos para WDM, ha permitido el aumento en la capacidad de los sistemas de comunicación por fibra óptica, permitiendo de esta manera aumentar el número de canales de comunicación por una sola fibra óptica, dando lugar a la aparición de los efectos no lineales dentro de la fibra óptica,

estos se generan por los niveles excesivos de potencias provocando que aparezcan intensos campos electromagnéticos. Al ser la fibra óptica un medio necesario para transmitir gran cantidad de información está expuesta a que las grandes potencias ópticas produzcan estos efectos no lineales.

Este estudio analiza en diferentes etapas de transmisión el comportamiento del Sistema de Comunicaciones WDM, de esta manera se puede relacionar los efectos producidos por los fenómenos no lineales, algunos de los parámetros que provocan estas distorsiones son longitud de la fibra óptica, el tipo de fibra usada, tipo de láser o de foto diodo, los cuales aportan de cierta manera a la generación de efectos que degradan la calidad de la señal y provocan un mal rendimiento del sistema.

CONCLUSIONES

- Se diseñó y simuló una red WDM, tomando en cuenta tanto las recomendaciones de las normas ITU, EIA/TIA, como los parámetros de fabricantes de componentes ópticos, con la finalidad que la simulación se aproxime a un escenario real.
- El rendimiento del sistema de comunicaciones óptico se determinó a través de las simulaciones analizando los parámetros (la separación entre canales, la dispersión cromática, el área y la longitud efectiva) que inciden directamente para que se produzca el efecto no lineal XPM en los canales ópticos.
- Al evaluar el desempeño del sistema de comunicaciones ópticas induciendo a la fibra a parámetros críticos en las simulaciones, se observa el ensanchamiento del espectro de la señal debido a la interacción entre canales adyacentes.
- Al simular el sistema WDM inducido al efecto no lineal XPM se pudo observar que las medidas obtenidas en el analizador BER (tasa de error de bit), fueron resultado de la interferencia intersimbólica que aparece cuando hay desplazamiento de fase por parte de los pulsos que se transmiten por el canal.

RECOMENDACIONES

- Para utilizar adecuadamente el simulador y poder interpretar los resultados, se sugiere conocer el correcto funcionamiento del programa y tener conocimiento de los efectos producidos en las transmisiones por el efecto no lineal XPM.
- Se debe tomar en cuenta los parámetros establecidos por la UIT para realizar el diseño y la simulación de un sistema de comunicaciones ópticas.
- De acuerdo con los requerimientos previos del diseño se recomienda implementarlos seleccionando materiales de características adecuadas, para evitar la incidencia de fenómenos no lineales u otros inconvenientes.
- Se debe trabajar a velocidades de transmisión superiores a los 10GHz, para poder visualizar los efectos no lineales en un sistema de comunicación.
- Si se intenta evitar los efectos del fenómeno no lineal XPM, la selección del espaciamiento entre canales debe ser adecuada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Álvarez, J. A. (2007). Análisis de Atenuación, Dispersión y Auto-modulación de Fase en Sistemas de Comunicaciones de Único Canal por Fibra Óptica a 10 Gb/s. *Centro de investigaciones en óptica*.
- Beijing SWT Optical Communication Technology Co., Ltd. (2015). InGaAs PIN Photodiode PDS123-CFA-B0202. Obtenido de http://www.hikari-trading.com/opt/swt/file/0009_pds123_cfa_b0202_e.pdf
- Boquera, M. C. (2005). *Comunicaciones Ópticas*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Buelvas, D., Tellez, I., & Mateus, E. (2010). REDES ÓPTICAS DWDM: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN. *Visión Electrónica*, 70-80.
- Grandway Electronics. (s.f.). CATV 1550nm Optical Amplifier EDFA. China. Obtenido de <https://grandwayel.en.made-in-china.com/product/aopmZrjMZqRS/China-CATV-1550nm-Optical-Amplifier-EDFA-.html>
- ITU-TG.652, R. (06 de 2005). Características de las fibras y cables ópticos.
- ITU-TG.663, R. (04 de 2000). Aspectos relacionados con la aplicación de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos.
- ITU-TG.694.1, R. (2012). Spectral grids for WDM applications: WDM frequency grid.
- López Perafán Jose Giovanni, A. T. (s.f.). Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM.
- López, G. J. (2011). Efectos no lineales y su relación con los parámetros de no linealidad. *Revista Facultad de Ingeniería*.

- Perafán López, J. G., Tovar Toledo, A., Ordóñez, H., & Agredo, J. P. (2011). Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, 20(3), 23-35.
- Pla, J. S. (2011). *Design of Passive Optical Networl*. Valencia.
- Ramaswami, R. (2014). *Optical Network*. San Diego California: Academic Press.
- Viglienzoni, A. (2010). Relevance of Optical. *eMobility General Assembly 6*.

ANEXOS

ANEXO 1

Coefficiente de atenuación	Región de longitud de onda	Valor típico del enlace
(Nota)	1260 nm – 1360 nm	0,5 dB/km
	1530 nm – 1565 nm	0,275 dB/km
	1565 nm – 1625 nm	0,35 dB/km
Coeficiente de dispersión cromática	D_{1550}	$17 \text{ ps/nm} \times \text{km}$
	S_{1550}	$0,056 \text{ ps/nm}^2 \times \text{km}$
NOTA – El valor típico del enlace corresponde al coeficiente de atenuación del enlace utilizado en las Recs. UIT-T G.957 y G.691.		

Valor representativo de enlaces e fibra óptica concatenados
Fuente: (ITU-TG.652, 2005)

Atributos de la fibra		
Atributo	Dato	Valor
Diámetro de campo modal	Longitud de onda	1310 nm
	Gama de valores nominales	8,6-9,5 μm
	Tolerancia	$\pm 0,6 \mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	Nominal	125,0 μm
	Tolerancia	$\pm 1 \mu\text{m}$
Error de concentricidad del núcleo	Máximo	0,6 μm
No circularidad del revestimiento	Máximo	1,0%
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1260
Pérdida de macroflexión	Radio	30 mm
	Número de vueltas	100
	Máximo a 1550 nm	0,1 dB
Prueba de tensión	Mínimo	0,69 GPa
Coeficiente de dispersión cromática	$\lambda_{0\text{mín}}$	1300 nm
	$\lambda_{0\text{máx}}$	1324 nm
	$S_{0\text{máx}}$	$0,092 \text{ ps/nm}^2 \times \text{km}$
Atributos del cable		
Atributo	Dato	Valor
Coeficiente de atenuación	Máximo a 1310 nm	0,5 dB/km
	Máximo a 1550 nm	0,4 dB/km
Coeficiente de PMD	M	20 cables
	Q	0,01%
	PDM_Q máximo	$0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$
NOTA – De conformidad con 6.2, se especifica un valor máximo del parámetro PMD_Q para la fibra no cableada, con el fin de soportar el requisito primario impuesto al cable PMD_Q .		

Atributos G.652
Fuente: (ITU-TG.652, 2005)

ANEXO 2

TIPO DE TRANSMISOR	POTENCIA DEL TRANSMISOR [μ W] / [dBm]	LONGITUD DE ONDA [nm]	ANCHO ESPECTRAL DE LA FUENTE [nm]	TIEMPO DE SUBIDA [ns]	FABRICANTE
MIC-L93_D	135 / -8.70	530	50	16	ESKA
MIC-L96_D	300 / -5.23	660	20	100	ESKA
MIC-L97_D	425 / -3.72	660	40	500	ESKA
MIC-L98_D	425 / -3.72	650	20	8	ESKA
PS85K020SC22-Q-0_D	20 / -16.99	850	35	6	LASER COMPONENTES
PS85K035300A-0-0-01_D	35 / -14.56	850	35	6	LASER COMPONENTES
PS85K020ST72-Q-0_D	20 / -16.99	850	35	6	LASER COMPONENTES
PS13L030300A-0-0-01_D	30 / -15.23	1310	160	3	LASER COMPONENTES
PS13L020SC22-Q-0_D	20 / -16.99	1310	160	3	LASER COMPONENTES
PS13T020ST72-Q-0_D	20 / 16.99	1310	160	3	LASER COMPONENTES
ML7701_L	3000 / 4.7	1300	3	0.7	MITSUBISHI LASER DIODES
NDL5003_L	8000 / 9.03	1300	4	1	NEC
STM81004X_L	1200 / 0.79	1550	5	1	SIEMENS
STH810027_L	6000 / 7.78	1550	5	1	SIEMENS
STH91004X_L	2400 / 3.80	1550	0.1	0.5	SIEMENS

Características de los transmisores de fibra óptica comerciales.

TIPO DE FIBRAS ÓPTICAS	LONGITUD DE ONDA [nm]	LONGITUD DE ONDA PARA LA ATENUACIÓN [nm]	ATENUACIÓN [dB/Km]	DISPERSIÓN DEL MATERIAL [ps/nm.Km]	RADIO DEL NÚCLEO [μm]
CORNING-ZBL-1300_nm	1300	1260	0.35	0.00	8.2
CORNING-ZBL-1500_nm	1550	1260	0.20	18.0	8.2
RENKA/OFC/SM-DI/AR-1310_nm	1310	1260	0.38	3.2	8.3
RENKA/OFC/SM-DI/AR-1550_nm	1550	1260	0.25	18.0	8.3
COMMSCOPE/TeraSPEED-1310_nm	1310	1260	0.34	3.2	3.0
COMMSCOPE/TeraSPEED-1310_nm	1385	1260	0.31	18.0	3.0
COMMSCOPE/TeraSPEED-1310_nm	1550	1260	0.22	18.0	3.0
PRYSMIAN/CasaLightTM-1310_nm	1310	1260	0.35	3.5	8.3
PRYSMIAN/CasaLightTM-1550_nm	1550	1260	0.21	18.0	8.3

TIPO DE FOTODETECTOR	LONGITUD DE ONDA OPERATIVA [nm]	RESPONSIVIDAD [A/W] A CIERTA LONGITUD DE ONDA							CORRIENTE OSCURA [nA]	TIEMPO DE SUBIDA [ns]	FABRICANTE
		650 [nm]	800 [nm]	850 [nm]	900 [nm]	1000 [nm]	1300 [nm]	1350 [nm]			
MIC-D91	880	0.220	0.344	0.388	0.346	0.320	0.000	0.000	60.00	5.00	ESKA
MIC-D92	880	60.00	90.00	100.0	98.00	62.00	0.000	0.000	100.00	20e-3	ESKA
MIC-D93	880	200.0	380.0	400.0	384.0	200.0	0.000	0.000	100.00	5.00e-6	ESKA
IFD91	880	0.300	0.450	0.490	0.500	0.425	0.000	0.000	10.00	5.00	INDUSTRIAL_FIBER_OPTICS
IFD92	880	50.00	90.00	100.00	98.00	65.00	0.000	0.000	100.00	20e-3	INDUSTRIAL_FIBER_OPTICS
IFD93	880	208.0	388.00	380.00	200.00	0.000	0.000	0.000	100.00	5.00e-6	INDUSTRIAL_FIBER_OPTICS
PDS123_CFA_B0202	1550	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.95	0.200	0.88	SWT-OC
PDS123_CFA_C0202	1550	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.95	0.200	0.88	SWT-OC
SAE230Nx	905	0.00	0.00	0.00	50.0	0.00	0.00	0.00	0.001	0.50	LASER_COMPONENTS
SAE500Nx	905	0.00	0.00	0.00	50.0	0.00	0.00	0.00	1.500	0.50	LASER_COMPONENTS
SAE500Vx	650	38.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1,0.00	0.45	LASER_COMPONENTS
IAE080x	1550	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	12.00	0.35	LASER_COMPONENTS
IAE200x	1550	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	40.00	0.70	LASER_COMPONENTS
SAR500x	905	0.00	0.00	0.00	60.0	0.00	0.00	0.00	1.500	0.45	LASER_COMPONENTS
SARPS00x	905	0.00	0.00	0.00	60.0	0.00	0.00	0.00	0.500	0.45	LASER_COMPONENTS
SARPS00T6	905	0.00	0.00	0.00	60.0	0.00	0.00	0.00	0.500	0.45	LASER_COMPONENTS
SARF500F2	905	0.00	0.00	0.00	10.0	0.00	0.00	0.00	1,00	3.00	LASER_COMPONENTS
SAR1500x	905	0.00	0.00	0.00	60.0	0.00	0.00	0.00	0.750	0.50	LASER_COMPONENTS
SAR3000x	905	0.00	0.00	0.00	60.0	0.00	0.00	0.00	1.00	0.50	LASER_COMPONENTS
SAT3000x	980	0.00	0.00	0.00	34.0	0.00	0.00	0.00	1.00	3.00	LASER_COMPONENTS
SRD00224x	1310	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.9	0.9	5.00	0.30	INFINEON
OED-PPD1075G-B	1310	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.8	0.00	0.300	0.30	LUMEX

Características de los receptores comerciales.

THORLABS

Dispersion Compensating Fiber



Description

Thorlabs' dispersion compensating bare fiber delivers high performance across a broad spectral range in the telecom region. These fibers have both high mechanical reliability and high optical stability. The DCF38 fiber has dispersion designed specifically to match and compensate Corning L1000 or SMF-28e+ fiber.

DCF38

Specifications

Dispersion Specifications	
Dispersion @ 1550 nm	-89.00 to -70.00 ps/nm*km
Dispersion Slope @ 1550 nm	-0.555 to -0.075 ps/nm ² *km
Typical Effective Area	≥21.8 μm ²
Polarization Mode Dispersion	≤0.05 ps//km



General Specifications	
Mode Field Diameter @ 1550 nm	5.72 to 6.30 μm
Cladding Diameter	125.0 ± 1.0 μm
Coating Diameter	250 ± 5 μm
Coating-Cladding Concentricity	<12 μm
Core-Clad Concentricity	≤0.5 μm
Cutoff Wavelength	≤1520 nm
Attenuation @ 1550 nm	≤0.265 dB/km
Attenuation Slope from 1530 to 1565 nm	-0.00040 ≤ to ≤ -0.00011 dB/nm*km
Point Discontinuity	≤0.10 dB @ 1550 nm
Optical Return Loss	≥60 dB
Typical Splice Loss @ 1550 nm (Splice DCF38/DCF38)	≤0.15 dB

Datasheet fibra DCF 38.

Nominal optical output	(dBm)	≥ 13	≥ 14	≥ 15	≥ 16	≥ 17	≥ 18	≥ 19	≥ 20	≥ 21	≥ 22	≥ 23	≥ 24	≥ 25	≥ 26	≥ 27	
	(mW)	≥ 20	≥ 25	≥ 32	≥ 40	≥ 50	≥ 63	≥ 80	≥ 100	≥ 125	≥ 160	≥ 200	≥ 250	≥ 320	≥ 400	≥ 500	
Optical Input	Range (dBm)	-12 ~ +10															
	@ Nominal output (dBm)	2					3										
Wavelength (nm)	1530 ~ 1560																
Output Stability (dB)	<± 0.2																
Noise Figure	0dBm Input (dB)	≤ 4.5				≤ 5.0						≤ 5.3					
	+6dBm Input (dB)	≤ 5.5				≤ 6.0						≤ 6.5					
Polarization sensitivity (dB)	<0.2																
Optical return losses (dB)	>40																
Connector	FC/APC .SC/APC																
Interface	RS232 .RS485																
Power Consumption (W)	<40																
Operating Voltage (V)	220V (110 ~ 240V)																
Operating temperature	0 ~ 65																
Storage temperature	-40 ~ +85																
Dimensions (mm)	483 × 385 × 44 (19" × 15" × 1.75")																

Datasheet EDFA Grandway
Fuente: (Grandway Electronics).



北京世维通光通讯技术有限公司
Beijing SWT Optical Communication Technology Co., Ltd.

InGaAs PIN Photodiode

Type: PDS123-CFA-B0202

FEATURES:

- ◆ Planar semiconductor design and dielectric passivation
- ◆ 3-pin coaxial streamline packaging ,SM pigtail with FC/APC connector
- ◆ Superior noise and photoelectric performance
- ◆ Hermetical packaging and 100% purge burn-in
- ◆ Applied for optical fiber communication system, analog CATV application.

ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS(T=25°C):

PARAMETERS	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
Wavelength	λ		1000		1650	nm
Dark Current	I_D	$E_e=0, V_R=5V$		0.2	0.5	nA
Responsivity	R_e	$V_R=5V, \lambda=1310nm$	0.85	0.90		A/W
Responsivity	R_e	$V_R=5V, \lambda=1550nm$	0.90	0.95		A/W
Capacitance	C	$f=1MHz, case grounded V_R=5V, E_e=0$		0.45	0.65	pF
Operating voltage	V_{opr}			-5	-15	V
Back Reflection	RL				-40	dB
Frequency Responsibility	BW	$V_R=5V, 50\Omega$ load with lead length=6mm, case open	2.5			GHz

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS(T=25°C):

PARAMETERS	MIN	MAX	UNIT
Reverse Voltage		25	V
Input optical power		10	dBm
Reverse Current		5	mA
Forward Current		10	mA
Operating Temperature	-40	+85	°C
Storage Temperature	-40	+85	°C
Lead Solder Temperature		260	°C
Lead soldering duration		10	s
Fiber yield strength		1	kgf
Fiber bend radius	30		mm
Length of pigtail	1.0		m

Datasheet Fotodiodo PDS123-CFA-B0202
Fuente: (Beijing SWT Optical Communication Technology Co., Ltd., 2015)