



# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

### **CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

“Trabajo de grado previo a la obtención del Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones”

#### **TRABAJO DE TITULACIÓN**

#### **PORTADA**

#### **TÍTULO DEL PROYECTO:**

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED WDM INDUCIDA AL EFECTO NO LINEAL DE LA FIBRA DENOMINADO STIMULATED BRILLOUIN SCATTERING.

#### **AUTOR:**

Erwin Andrés Calucho Cabrera

#### **DIRECTORA:**

Mgs. Deysi Vilma Inca Balseca

Riobamba-Ecuador  
AÑO 2018

## RESOLUCIÓN DEL TRIBUNAL

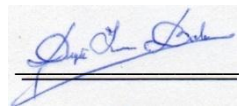
Los miembros del tribunal de graduación del proyecto de investigación de título: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED WDM INDUCIDA AL EFECTO NO LINEAL DE LA FIBRA DENOMINADO STIMULATED BRILLOUIN SCATTERING (SBS)**,  
Presentado por: Erwin Andrés Calucho Cabrera y dirigida por Mgs. Deysi Vilma Inca Balseca.

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:

Mgs. Deysi Inca

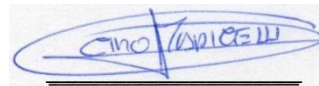
**Directora de Proyecto**



**Firma**

PhD. Ciro Radicelli

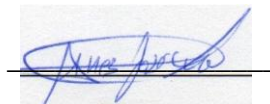
**Miembro de Tribunal**



**Firma**

Mgs. José Jinez

**Miembro de Tribunal**

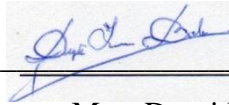


**Firma**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo de investigación previo a la obtención del título de Ingeniero en **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**, con el tema: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED WDM INDUCIDA AL EFECTO NO LINEAL DE LA FIBRA DENOMINADO STIMULATED BRILLOUIN SCATTERING**. Ha sido elaborado por, **ERWIN ANDRÉS CALUCHO CABRERA**, 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.



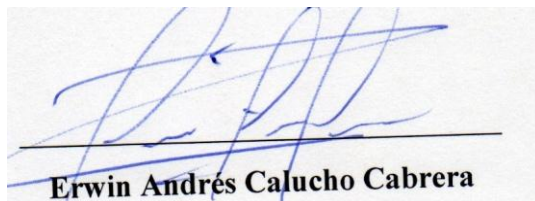
---

Mgs. Deysi Inca

**Directora de Tesis**

## **AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

La responsabilidad del contenido de este proyecto de graduación, Corresponde exclusivamente a **Erwin Andrés Calucho Cabrera, Mgs. Deysi Inca Balseca**; y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo



**Erwin Andrés Calucho Cabrera**

**C.I: 0604191940**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por darme la fuerza suficiente para cumplir un objetivo más en mi vida profesional.

A mis Padres y Hermanos que, sin la guía de ellos y el apoyo incondicional en los momentos más difíciles de mi vida estudiantil, me dieron la motivación para poder culminar con éxito mi carrera.

A la Mgs. Deysi Inca Balseca por su colaboración, dedicación, tiempo y conocimientos han ayudado a culminar con éxito mi trabajo de titulación.

A mi familia y amigos, a pesar de las dificultades en el transcurso de mi vida estudiantil estuvieron presentes con su apoyo, amistad y cariño.

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme un día más de vida para poder seguir adelante y no darme por vencido.

A mi Abuelito Juan Calucho Pariapoma por enseñarme que la vida no solo es juego si no también dedicación y que todo lo que se consigue con sacrificio es lo que más se valora.

A mis padres Juan y Sonia por darme su apoyo, amor y comprensión en los momentos difíciles de mi vida.

A mis hermanos Juan, Silvia, Fernando y William por ser un modelo a seguir en mi vida dándome el ejemplo para superarme y no darme por vencido.

A mi novia Viviana por estar junto a mi dándome su apoyo, cariño y motivación.

## ÍNDICE GENERAL

PORTADA .....	I
RESOLUCIÓN DEL TRIBUNAL.....	1
CERTIFICACIÓN.....	2
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
DEDICATORIA.....	5
ÍNDICE GENERAL.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS .....	12
RESUMEN.....	15
ABSTRACT .....	16
INTRODUCCIÓN.....	17
CAPÍTULO I.....	19
1. OBJETIVOS.....	19
1.1. Objetivo General.....	19
1.2. Objetivos específicos.....	19
CAPÍTULO II.....	20
2. MARCO TEÓRICO .....	20
2.1. ANTECEDENTES .....	20
2.2. ENFOQUE TEÓRICO .....	20
2.2.1. SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA.....	20
2.2.2. FIBRA ÓPTICA .....	21
2.2.3. WAVE LENGTH DIVISION MULTIPLEXING (WDM) .....	23
A. PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN.....	23
a) ESPACIAMIENTO DEL CANAL .....	23
b) DIRECCIÓN DE LA SEÑAL .....	24
c) ANCHO DE BANDA DE LA SEÑAL .....	24
d) POTENCIA DE LA SEÑAL .....	24
e) CODIFICACIÓN .....	24

f)	TASA DE ERROR DE BITS(BER) .....	24
g)	RUIDO .....	25
2.2.4.	STIMULATED BRILLOUIN SCATTERING (SBS).....	25
A.	INTRODUCCIÓN A SBS.....	25
B.	CONCEPTOS BÁSICO .....	25
C.	PROCESOS FÍSICOS .....	25
D.	ESPECTRO DE GANANCIA DE BRILLOUIN .....	28
E.	UMBRAL DE BRILLOUIN .....	29
F.	REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA DE SBS.....	30
CAPÍTULO III .....		32
3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	32
3.1.	TIPO DE ESTUDIO.....	32
3.1.1.	INVESTIGACIÓN APLICADA .....	32
3.2.	MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS .....	32
3.2.1.	MÉTODOS .....	32
A.	MÉTODO DESCRIPTIVO .....	32
B.	MÉTODO INVESTIGATIVO EXPERIMENTAL.....	32
C.	MÉTODO ANALÍTICO.....	33
3.2.2.	TÉCNICAS .....	33
A.	OBSERVACIÓN .....	33
3.2.3.	INSTRUMENTOS.....	33
3.3.	HIPÓTESIS .....	34
3.4.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES .....	34
3.4.1.	VARIABLE DEPENDIENTE .....	34
3.4.2.	VARIABLE INDEPENDIENTE.....	34
3.5.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	35
3.6.	POBLACIÓN Y MUESTRA .....	36
3.6.1.	POBLACIÓN.....	36
3.6.2.	MUESTRA .....	36
3.7.	PROCEDIMIENTOS .....	37
3.7.1.	ANÁLISIS TEÓRICO.....	37
3.7.2.	DISEÑO DE UN SISTEMA WDM .....	37



3.7.3.	PRUEBAS .....	37
3.8.	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS .....	37
3.8.1.	MODELAMIENTO DEL CANAL ÓPTICO.....	37
3.8.2.	MODELAMIENTO DE LA ECUACIÓN DE BRILLOUIN.....	41
3.8.3.	DISEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN WDM.....	41
A.	SISTEMA DE COMUNICACIÓN (1 CANAL) .....	42
a)	DISEÑO DEL TRANSMISOR.....	42
b)	DISEÑO DEL MEDIO DE TRANSMISIÓN.....	43
c)	DISEÑO DEL RECEPTOR .....	44
B.	SISTEMA DE COMUNICACIÓN (16 CANALES) .....	45
a)	DISEÑO DEL TRANSMISOR .....	45
b)	DISEÑO DEL MEDIO DE TRANSMISIÓN.....	47
c)	DISEÑO DEL RECEPTOR .....	47
CAPÍTULO IV	.....	48
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	48
4.1.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN N.º 1 .....	48
4.1.1.	NIVELES DE POTENCIA EN EL TRANSMISOR Y RECEPTOR. ....	48
4.1.2.	NIVELES DE AMPLITUD EN EL ESPECTRO ÓPTICO. ....	49
4.1.3.	NIVELES DE LA TASA DE ERROR EN BITS (BER).....	51
4.2.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN N.º 2 .....	54
4.2.1.	NIVELES DE POTENCIA EN EL TRANSMISOR Y RECEPTOR. ....	54
4.2.2.	NIVELES DE AMPLITUD EN EL ESPECTRO ÓPTICO. ....	55
4.2.3.	NIVELES DE LA TASA DE ERROR EN BITS (BER).....	57
4.3.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL TIPO DE FIBRA. ....	60
4.4.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	64
4.4.1.	DEMOSTRACIÓN DE HIPÓTESIS .....	64
CAPÍTULO V	.....	66
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	66
5.1.	CONCLUSIONES.....	66
5.2.	RECOMENDACIONES .....	67

BIBLIOGRAFÍA .....	68
ANEXOS .....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de las variables. ....	35
Tabla 2. Resultados de niveles de potencia en el sistema de comunicación 1 .....	48
Tabla 3. Porcentaje de atenuación de los niveles de potencia. ....	48
Tabla 4. Resumen de los Niveles de amplitud del sistema de comunicaciones 1 .....	49
Tabla 5. Niveles de tasa de error en bits del sistema de comunicaciones 1 .....	51
Tabla 6. Porcentaje de atenuación en el Factor Q del sistema de comunicación 1 .....	53
Tabla 7. Niveles de Potencia en el Sistema de comunicaciones óptica 2.....	55
Tabla 8. Promedio de los niveles de potencia en el transmisor del CH 1 y CH8 del Sistema de comunicaciones 2.....	55
Tabla 9. Niveles de Amplitud del Sistema de comunicaciones 2.....	56
Tabla 10. Niveles de la tasa de error en bits (BER) del sistema de comunicacion 2 .....	58
Tabla 11. Niveles de las tasas de error en bits del Ch 1 y Ch 8.....	58
Tabla 12. Niveles de distorsión con referencia del Factor Q y Apertura de Ojo del sistema de comunicación 2. ....	60

Tabla 13. Cálculos de la potencia crítica, Potencia de salida en función de la longitud del enlace en una fibra Corning.....	62
Tabla 14. Cálculos de la potencia crítica, Potencia de salida en función de la longitud del enlace en una fibra Furukawa. ....	63
Tabla 15. Cálculos de la potencia crítica, Potencia de salida en función de la longitud del enlace en una fibra Ideal. ....	64
Tabla 16. Variables Obtenidas.....	64
Tabla 17. Variables Esperadas.....	64
Tabla 18. Test Chi-Cuadrado.....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama en bloques de un sistema de comunicación óptica .....	21
Figura 2. Experimento de Tyndall.....	22
Figura 3. Componente de la fibra óptica .....	22
Figura 4. Sistema WDM completo .....	23
Figura 5. a) Proceso de electrostricción, b) Proceso SBS .....	26
Figura 6. Cambio de frecuencia y ganancia en SBS en una fibra óptica mono modo .....	28
Figura 7. Sistema de comunicación WDM con un canal. ....	42
Figura 8. Componentes del bloque del Transmisor.....	43
Figura 9. Fibra Óptica Bidireccional .....	44
Figura 10. Componentes del Receptor .....	44
Figura 11. Sistema de comunicaciones de 16 canales. ....	45
Figura 12. Subsistema del Transmisor WDM de 16 canales.....	46
Figura 13. Elementos del subsistema de comunicación en el transmisor CH0 .....	46

Figura 14. Fibra Óptica Bidireccional para los 16 canales.....	47
Figura 15. Componentes del Rx de 16 canales.....	47
Figura 16. Niveles de potencia óptica: a) Salida del transmisor, b) Salida del Tramo Ideal, c) Salida de la Fibra Bidireccional .....	49
Figura 17. Niveles de potencia Eléctrica: a) Salida del Tramo ideal, b) Salida del tramo con la fibra bidireccional.....	49
Figura 18. Nivel de amplitud del espectro óptico a la salida del transmisor.....	50
Figura 19. Niveles de amplitud del espectro óptico a la salida: a) Tramo Ideal, b) Tramo con SBS .....	50
Figura 20. Niveles de amplitud del espectro óptico a la salida del Demux: a) Tramo Ideal, b) Tramo con SBS .....	51
Figura 21. Niveles de la Tasa de error en bits (BER)del espectro óptico a la salida de la trama Ideal: a) Factor Q. b) Min BER. c)Umbral. d)Apertura de Ojo .....	52
Figura 22. Niveles de la Tasa de error en bits (BER)del espectro óptico a la salida de la trama con efecto SBS: a) Factor Q. b) Min BER. c)Umbral. d)Apertura de Ojo.....	53
Figura 23. Nivel de Amplitud del espectro óptico a la salida del transmisor.....	56
Figura 24. Graficas de los niveles de Amplitud óptica a) Trama ideal 16 canales b) Trama con el efecto SBS 16 canales c) Trama ideal CH 1 d) Trama con el efecto SBS CH 1 e) Trama con el efecto SBS CH 8.....	57
Figura 25. Graficas del Factor Q: a) Trama Ideal CH 1 b) Trama Ideal CH8 c) Trama SBS CH1 d) Trama SBS CH8. ....	59

Figura 26. Graficas del Umbral: a) Trama Ideal CH 1 b) Trama Ideal CH8 c) Trama SBS  
CH1 d) Trama SBS CH8. .... 60

## RESUMEN

En la actualidad los sistemas de comunicación se ha vuelto una parte esencial para las telecomunicaciones, siendo necesario el uso de equipos que soporten mayores velocidades de transmisión que se acoplen a estos sistemas, la fibra óptica siendo un medio ideal se ve afectado en su transmisión por efecto de las no linealidades.

Este proyecto realiza el estudio y simulación de una red inducida al efecto no lineal Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS) en una fibra óptica, para determinar los principales parámetros de transmisión que impactan en el desempeño de una red WDM.

En el capítulo 1, se describen los objetivos planteados para desarrollar el trabajo de titulación estableciendo las metas propuestas para alcanzar con la investigación.

El capítulo 2, describe los antecedentes necesarios para desarrollar la investigación, entre ellos los sistemas de comunicaciones ópticas.

El capítulo 3, detalla la metodología necesaria para desarrollar la investigación.

El capítulo 4, detalla el efecto SBS, mismo que se produce debido a la interacción existente entre ondas ópticas y acústicas en una fibra, esta define dos escenarios: Escenario 1, está formado por el transmisor de un solo canal aleatorio, contiene dos medios de propagación: a través de una fibra óptica ideal e inducida al efecto SBS y dos receptores con instrumentos de medición. Escenario 2, está formado por un transmisor de 16 canales, un multiplexor 16\*1, contiene dos medios de propagación: a través de una fibra óptica ideal e inducida al efecto SBS, demultiplexor 1\*16 y dos receptores con instrumentos de medición.



## ABSTRACT

Currently, communication systems have become an essential part of telecommunications, it is necessary to use equipment that supports higher transmission speeds that are coupled to these systems, fiber optic being an ideal medium is affected in its transmission by effect of non-linearities. This present research carried out the study and simulation of a network induced to the non-linear effect brillouin stimulated dispersion (SBS) in an optical fiber, to determine the main transmission parameters that impact on the performance of a WDM network.

In chapter 1.- The objectives set out to develop the titling work are described, establishing the proposed goals to achieve with the research.

Chapter 2.- Describes the background necessary to develop the research, including optical communication systems.

Chapter 3.- Details the methodology needed to develop the research.

Chapter 4.- Details the SBS effect, which occurs due to the interaction between optical and acoustic waves in a fiber, this defines two scenarios: Scenario 1, it is formed by the transmitter of a single random channel, contains two means of propagation: through an ideal optical fiber and induced to the SBS effect and two receivers with measuring instruments . Scenario 2, consists of a 16-channel transmitter, a multiplexer 16 \* 1, contains two means of propagation: through an ideal optical fiber and induced to the SBS effect, demultiplexer 1 \* 16 and two receivers with measuring instruments .

Reviewed by: Granizo, Sonia

Language Center Teacher



## INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de la fibra óptica ha avanzado de una forma impresionante por lo que se la estudiará realizando aproximaciones con el objetivo de contemplar aquellos efectos y parámetros no percibidos. Por efecto de las no linealidades un sistema de comunicación puede verse afectado al transmitir información por un medio óptico y es necesario de programas o algoritmos que facilitan visualizar, realizar cálculos y simulaciones para una mayor comprensión de los daños que producen.

En los sistemas de comunicación diseñados por enlaces de fibra óptica, es necesario de técnicas de modulación como la Multiplexación por División de Onda o Wavelength Division Multiplexing (WDM) que puedan manejar el envío de información a largas distancias, a través de varias portadoras ópticas de diversas longitudes de onda por una fibra óptica, optimizando el gran ancho de banda.

A velocidades mayores de 10 Gbps la fibra óptica se vuelve un medio no lineal induciendo al efecto SBS, esto género que su estudio se vuelva cada vez más importante para determinar las principales causas de su afectación, con el propósito de evitar este fenómeno se utiliza métodos y técnicas para corregirlos o compensarlos si es necesario.

Según estudios realizados el efecto no lineal SBS utiliza la potencia óptica, que se refleja en el interior de las fibras como consecuencia del proceso no lineal de SBS, el cual genera una onda de Stokes desplazada respecto a la frecuencia de la onda incidente en una cantidad que depende del medio no lineal, este proceso se ve influenciado por el ancho de línea de la portadora óptica, y limita la potencia que puede aplicarse a la entrada de la fibra óptica.

Una onda de Stokes es la dispersión de una onda de longitud mayor, que tiene una dirección opuesta a la de propagación de la onda incidente y es de menor frecuencia a la de la luz incidente.

La interacción de la onda de bombeo y la onda acústica producen el efecto SBS.

El principal factor de limitación en las medidas lo construye el SBS, debido a las altas potencias ópticas y al reducido ancho de banda como consecuencia de la modulación externa.

Uno de los principales factores para mejorar el desempeño de una red WDM es identificar los parámetros de transmisión que impactan en los efectos no lineales, estos dependen de su variación para minimizar los efectos negativos que este tipo de degradaciones generan en el desempeño de la red.

Para generar el efecto Dispersión Estimulada de Brillouin o SBS se utilizó el software de simulación OptiSystem de Optiwave, en una red WDM se indujo el efecto no lineal para determinar los parámetros críticos donde se ve afectada del sistema de comunicación óptico, con el propósito de identificar los valores límites para evitar las no linealidades en la calidad de la transmisión. Para esto se toma en cuenta las velocidades de transmisión, potencias y anchos de banda en el transmisor y receptor.

# CAPÍTULO I

## 1. OBJETIVOS

### 1.1.Objetivo General

- ✓ Diseñar y simular una red WDM bajo el efecto no lineal de la fibra denominada Stimulated Brillouin Scattering.

### 1.2.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 Stimulated Brillouin Scattering.

## **CAPÍTULO II**

### **2. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES**

Para la transmisión a largas distancias por fibra óptica en sistemas de comunicación es necesario del uso de técnicas de multiplicación como WDM (Wavelength Division Multiplexing), esto genera no linealidades en el medio de transmisión los cuales deben ser analizados con el propósito de evitarlos y corregirlos, mediante métodos que permitan compensarlos. Los efectos no lineales son producidos en todo tipo de dieléctrico que son sometidos a altos niveles de potencia, produciendo una cantidad excesiva de campos electromagnéticos. Dentro de estos se pueden definir dos tipos: Los que están relacionados por el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica y los que se relacionan con los fenómenos de scattering que provocan una disminución del nivel de potencia (Guano, Molina & Jiménez, 2014).

El efecto SBS se presenta a niveles de potencia de entrada menores y genera el desplazamiento de la onda de Stokes de 11GHz. Ese efecto no lineal se presenta por la generación de una onda llamada onda de Stokes. Un parámetro importante de este efecto no lineal es la potencia crítica debido a SBS, donde la potencia crítica en la onda incidente y dispersada son iguales (Perafán, Tovar, Ordóñez & Agredo, 2011).

#### **2.2. ENFOQUE TEÓRICO**

##### **2.2.1. SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA**

Un sistema de comunicación óptica permite el envío y recepción de señales ópticas ya sea audio, datos y video, este se compone por un transmisor óptico, un canal de transmisión de fibra óptica y el receptor. Dependiendo los sistemas de comunicación ópticos es necesario de repetidores de señal para las pérdidas en el canal a lo largo del enlace.

En la figura 1, se presenta un diagrama en bloques de un sistema de comunicaciones, este se compone del transmisor (incluye una fuente de modulación analógica o digital), un circuito modulador y una fuente óptica. El canal de transmisión introduce ruido y distorsión en el sistema. El repetidor recibe la señal atenuada y la regenera a su salida

para ingresar al receptor mediante un diodo foto detector y circuitos adicionales se regenera la señal original mediante demoduladores, filtros o decodificadores (Keiser, 1991).

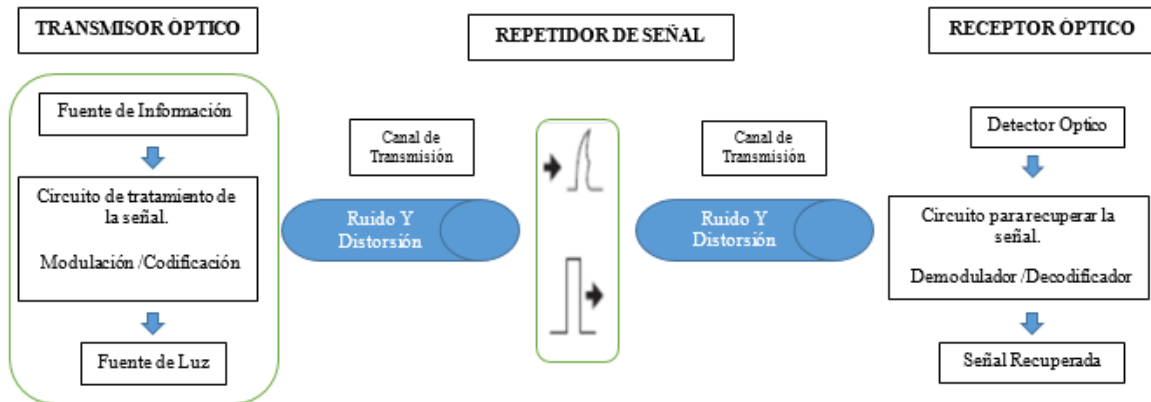


Figura 1. Diagrama en bloques de un sistema de comunicación óptica

Fuente: Autor

Lo anteriormente mencionado, es una alternativa eficiente para transmitir información a tasas altas de transmisión en Gbps. En todo sistema de comunicación óptico la información debe ser codificada, modulada y se multi-canalizada para poder enviarles de una forma eficiente y segura.

### 2.2.2. FIBRA ÓPTICA

Los orígenes de los sistemas de comunicaciones en fibra óptica fueron realizados por el físico irlandés John Tyndall quien descubrió que la luz podía viajar dentro de un material denso, como el agua, lo que produjo un efecto de reflexión interna total como se observa en la figura 2, esto sirvió como base para el físico hindú Narinder Singh Kapany efectuara experimentos que pronto condujo a la creación de la fibra óptica en el año de 1952 (Cajas, 2015).

Una de las primeras fibras ópticas fue construida con una atenuación de 1000 dB/Km restringiendo la transmisión a distancias cortas. Sin embargo, los estudios realizados con

el propósito de disminuir las pérdidas producidas por la fibra fueron mejorando a tal punto que en la actualidad existen fibras con una atenuación de 0,2 dB/km.

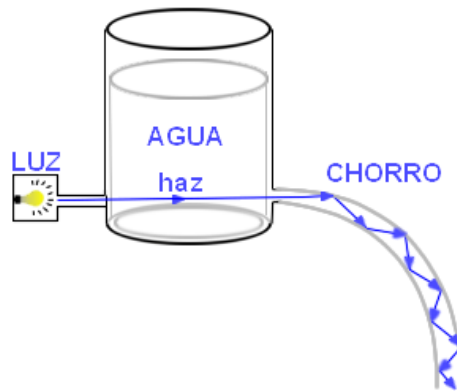


Figura 2. Experimento de Tyndall

Fuente: (Tucumán, 2012)

Una fibra óptica es una guía de ondas dieléctrico que trabaja a frecuencias ópticas, banda L (1570nm-1610nm), C (1530nm-1562nm) y S (1485nm-1520nm). Las propiedades en la transmisión son dadas por sus características estructurales las cuales tienen un mayor efecto en determinar como una señal de tipo óptico se transmite en la fibra (Keiser, 1991).

La fibra óptica está formada por tres partes como se muestra en la Figura 3, que son: el núcleo donde se propaga las ondas ópticas, el revestimiento que por lo general está hecho con los mismos materiales que el núcleo, pero con aditivos adecuados se puede confinar las ondas ópticas del núcleo y la cubierta que está fabricado en plástico y asegura la protección mecánica de la fibra óptica (Cervantes, Alonso, Galindo, Olvera, Calderón, Helton & Pérez, 2015).

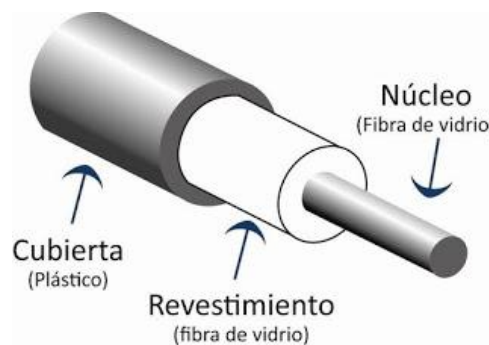


Figura 3. Componente de la fibra óptica

Fuente: (Mendoza & Silva, 2016)

### 2.2.3. WAVE LENGTH DIVISION MULTIPLEXING (WDM)

Un aspecto principal de los sistemas de comunicaciones ópticas es que se puede enviar varias longitudes de onda de forma simultánea a través de una misma fibra óptica en la banda de 1300nm-1600nm como se muestra en la figura 4. Esto es posible mediante la multiplexación por división en longitud de onda (WDM), técnica que utiliza un espaciamiento entre canales para evitar la interferencia entre los mismos.

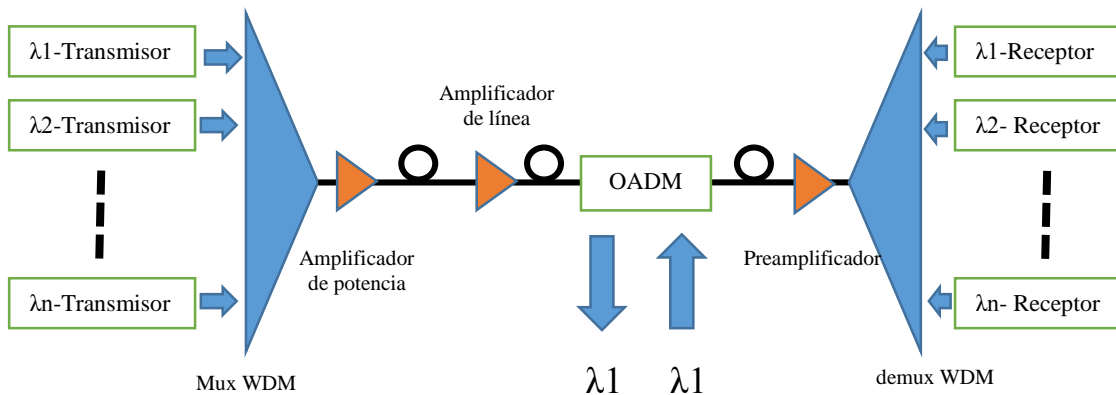


Figura 4. Sistema WDM completo

Fuente: Autor

#### A. PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN

Los sistemas WDM son de gran importancia en la capa óptica. Esta capa se encarga del envío de las señales a través de la red, entre los parámetros básicos se detallan a continuación.

##### a) ESPACIAMIENTO DEL CANAL

El espaciamiento entre canales puede ser de 12.5, 25, 50, 100 o 200 GHz, estos espaciamientos se encuentran estandarizados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) donde se recomienda 50 y 100 GHz y están descritos en la ITU.G.694.1.29. Mientras menor es el espaciamiento, mayor será la diafonía limitando la máxima velocidad de transmisión en los datos por longitud de onda (Peñarredonda, Silva & Mateus, 2010).



#### **b) DIRECCIÓN DE LA SEÑAL**

Los sistemas WDM son implementados de dos maneras: Unidireccional y Bidireccional. En los sistemas WDM Unidireccionales las longitudes de onda viajan a través de la fibra en una misma dirección por lo que es necesario dos fibras para una transmisión de doble sentido. En los sistemas WDM Bidireccional los canales se subdividen en dos bandas una para cada dirección produciendo que solo sea necesario una fibra.

#### **c) ANCHO DE BANDA DE LA SEÑAL**

Para la transmisión de señales ópticas en sistemas WDM es necesario utilizar un láser (OC-192/STM-64) que posee velocidades de bit de 10Gbps por cada longitud de onda con 240 canales multiplexados produciendo un máximo de 2.4 Tbps en una sola fibra. Los nuevos sistemas WDM son capaces de soportar velocidades de 40 Gbps (OC768/STM-256) por cada longitud de onda con 300 canales multiplexados. A raíz de esto se podrán transmitir 12 Tbps de ancho de banda sobre una misma fibra (Peñarredonda, Silva & Mateus, 2010).

#### **d) POTENCIA DE LA SEÑAL**

La potencia de la señal disminuye en los sistemas ópticos dependiendo de la distancia, La potencia de entrada es proporcional al láser emisor y la potencia de salida depende de la atenuación, dispersión, efectos no lineales en las fibras ópticas, etc.

#### **e) CODIFICACIÓN**

La etapa de codificación está en el transmisor y se encarga de convertir las señales eléctricas con diferentes portadoras a señales ópticas, estas señales luego son decodificadas en el receptor, donde serán convertidas a señales eléctricas. Existen dos tipos de codificación más utilizados y son: no retorno a cero (NRZ) y retorno a cero (RZ).

#### **f) TASA DE ERROR DE BITS(BER)**

La tasa de error de bits es la cantidad de bits recibidos con errores dividida por la cantidad total de bits recibidos, durante un intervalo de tiempo. Los valores de BER de  $10^{12}$  son valores de la red óptica síncrona.

### g) **RUIDO**

El ruido se presenta en sistemas ópticos que incluyen procesos de amplificación. El OSNR (relación señal a ruido óptico) especifica la razón entre la potencia neta de la señal y la potencia neta del ruido.

#### **2.2.4. STIMULATED BRILLOUIN SCATTERING (SBS)**

##### **A. INTRODUCCIÓN A SBS**

El efecto no lineal denominado SBS se manifiesta en niveles de potencia menores a los utilizados en el SRS. Este efecto se produce al propagar una onda incidente la cual genera una onda con dirección contraria (backward-propagating) llamada onda de Stokes. SBS de forma ideal es perjudicial para todos los sistemas de comunicación por fibra óptica, pero dependiendo su uso puede ser útil para desarrollar láseres o amplificadores Brillouin basados en fibra óptica.

##### **B. CONCEPTOS BÁSICO**

EL umbral de la potencia de bombeo para el efecto no lineal SBS depende del ancho espectral asociado con la onda de bombeo (LARA, 2015) este se encuentra por lo general en 1mW para ondas continuas. El efecto no lineal SBS presenta fonones acústicos a diferencia que en el SRS que es producido por fonones ópticos.

##### **C. PROCESOS FÍSICOS**

El campo de bombeo genera una onda acústica a través del proceso de electrostricción Figura 5-a. El proceso de SBS se describe como la interacción no lineal entre la onda incidente y una onda acústica, figura 5-b.

La onda acústica modula el índice de refracción del canal produciendo zonas de mayor y menor índice de refracción mediante la difracción de Bragg. La difracción de Bragg varía los índices de refracción dispersando la luz que incide en el medio. La luz dispersada tiene una menor frecuencia a la de onda incidente.

El cambio de la frecuencia de la onda incidente se asocia al movimiento de las rejillas del material siendo la velocidad del sonido en la fibra  $V_A = 5.96 \text{ Km/s}$ , produciendo el efecto Doppler sobre la onda incidente la cual a su vez produce la onda de Stokes con dirección opuesta y de menor frecuencia.

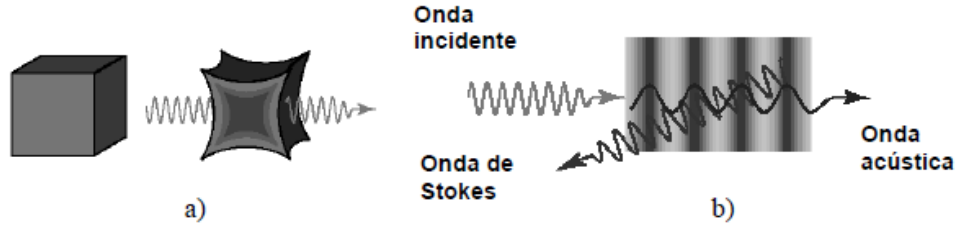


Figura 5. a) Proceso de electrostricción, b) Proceso SBS

Fuente: (LARA, 2015)

La variación de frecuencia producida por el efecto no lineal SBS,  $\Delta f_{SBS}$ , siendo igual a la frecuencia de la onda acústica  $f_A$ , dado por:

$$\Delta f_{SBS} = f_A = \frac{\omega_A}{2\pi} \quad \text{Ecuación 1}$$

Las frecuencias y vectores de la onda acústica, Incidente y de Stokes cumplen el principio de conservación de energía:

$$\omega_A = \omega_i - \omega_s \quad \text{Ecuación 2}$$

$$k_A = k_i - k_s \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde  $\omega_A$ ,  $\omega_i$  y  $\omega_s$  son frecuencias angulares y  $k_A$ ,  $k_i$  y  $k_s$  son los vectores de la onda incidente, acústica y de Stokes.

La frecuencia angular de la onda acústica es:

$$\omega_A = V_A |k_A| \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde  $V_A$  es la velocidad del sonido en el medio.

El vector  $k_A$  se obtiene del cuadrado de la Ecuación 3, considerando que  $\theta$  es el ángulo entre los vectores  $k_A$  y  $k_i$  usando  $|k_i| \approx |k_s|$ .

$$k_A^2 = k_i^2 + k_s^2 - 2|k_i| * |k_s| \cos \theta \approx 2k_i^2(1 - \cos \theta) \quad \text{Ecuación 5}$$

El vector de onda incidente se define por:

$$|k_i| = \frac{2\pi n}{\lambda_i} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde

$n$  = índice de refracción de la fibra

$\lambda_i$  = Longitud de onda de la onda Incidente en el vacío

Usando la Ecuación 5 y Ecuación 4 se obtiene:

$$\omega_A = V_A |k_A| \approx \frac{2\sqrt{2} \pi V_A n}{\lambda_i} (1 - \cos \theta)^{\frac{1}{2}} = \frac{4 \pi V_A n}{\lambda_i} \text{sen} \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

El cambio en frecuencia debido al efecto no lineal SBS:

$$\Delta f_{SBS} = f_A = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2\pi V_A n}{\lambda_i} \text{sen} \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

La Ecuación 8, describe el cambio de frecuencia por efecto de la no linealidad SBS, La frecuencia es máxima cuando va en dirección opuesta a la de propagación ( $\theta = \pi$ ) y es nulo en el sentido de propagación ( $\theta = 0$ ). Es por eso por lo que el efecto SBS solamente ocurre en la dirección opuesta a la dirección de propagación.

Si se utiliza los valores para una fibra de silicio  $V_A = 5.96$  Km/s y  $n = 1.45$  a una longitud de onda incidente  $\lambda_i = 1.55$   $\mu\text{m}$  da como resultado el cambio de frecuencia debido al efecto SBS  $\Delta f_{SBS} = 11.1$  GHz desplazando a la señal original como se representa en la figura 6.

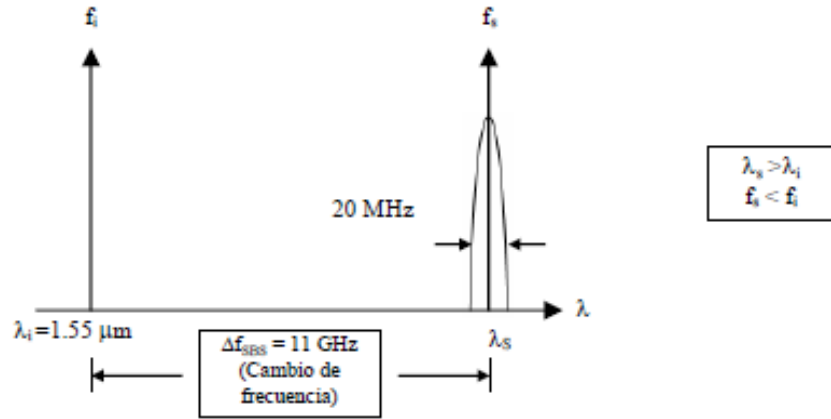


Figura 6. Cambio de frecuencia y ganancia en SBS en una fibra óptica mono modo

Fuente: (LARA, 2015)

Para ondas incidentes continuas (CW) se describen por dos ecuaciones:

$$\frac{dI_i}{dz} = -g_B I_i I_s - \alpha I_i \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\frac{dI_s}{dz} = -g_B I_i I_s + \alpha I_s \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$g_B = 5 * 10^{-11} \frac{m}{W}$ , Coeficiente de ganancia de Brillouin.

$I_i$  e  $I_s$  son las intensidades de la onda incidente y de Stokes.

#### D. ESPECTRO DE GANANCIA DE BRILLOUIN

El espectro de ganancia de brillouin se define como la potencia límite de SBS,  $P_{limite}$  (SBS), este es el nivel de potencia crítica en donde la potencia de la onda incidente es igual a la potencia de la onda dispersa.

La potencia crítica se calcula por:

$$P_{limite}(SBS) \approx \frac{21 A_e}{g_b L_e} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$A_e$  es el área efectiva.

$g_b$  es la ganancia de Brillouin.

$L_e$  es la longitud efectiva.

Al utilizar los valores típicos para fibras usadas a  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  en sistemas de comunicación óptica, área efectiva  $A_e = 53\mu\text{m}^2$  y una longitud efectiva  $L_e = 21.7\text{Km}$

$$P_{\text{limite}}(SBS) \approx \frac{21 A_e}{g_b L_e}$$

$$P_{\text{limite}}(SBS) \approx \frac{21 * 53\mu\text{m}^2}{5 * 10^{-11}\text{m/w} * 21.7 * 10^3\text{m}}$$

$$P_{\text{limite}}(SBS) \approx 1\text{mW por canal}$$

El valor de potencia crítica limita a la potencia incidente por canal en una red WDM y es independiente al número de canales.

## **E. UMBRAL DE BRILLOUIN**

Para estimar el Umbral de Brillouin se puede despreciar el desvanecimiento del bombeo por lo que estas producen potencias relativamente pequeñas en él canal. Mediante  $I_i(z) = I_i(0)e^{-\alpha z}$  y reemplazando en la ecuación 9 se obtiene la ecuación 12.

$$I_s(0) = I_s(L) e^{\frac{g_b * P_o * L_e}{A_e - \alpha L}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

$P_o$  es la potencia de bombeo

$A_e$  es el Área efectiva

Y la longitud efectiva viene dada por la Ecuación 13:

$$L_e = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}$$

En la ecuación 13, se muestra que la señal de Stokes crece en dirección opuesta debido a la amplificación Brillouin, el cual ocurre como resultado del efecto no lineal SBS.

## F. REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA DE SBS

Para la representación matemática es necesario de las ecuaciones de Maxwell las cuales describen los fenómenos electromagnéticos por completo, como la luz es una onda electromagnética implica la existencia de un campo eléctrico (Guano, Molina & Jiménez, 2014).

$$E_p(z, t) = A_p(z, t)e^{i(k_p z - \omega_p t)} + cc \quad \text{Ecuación 14}$$

$$E_s(z, t) = A_s(z, t)e^{i(k_s z - \omega_s t)} + cc \quad \text{Ecuación 15}$$

$$P(z, t) = p_o + \{p(z, t)e^{i(q_B z - \Omega_B t)} + cc\} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

Z: Eje de propagación de la fibra

T: Tiempo

$E_p(z, t)$  : Campo eléctrico de la onda incidente

$E_s(z, t)$  : Campo eléctrico de la onda de Stokes

$P(z, t)$  : Distribución de densidad de la fibra

$A_p(z, t)$ : Intensidad de la onda Incidente

$A_s(z, t)$  : Intensidad de la onda de Stokes

$k_p$  : Vector de onda incidente

$k_s$  : Vector de onda de Stokes

$\omega_p$  : Frecuencia angular de la onda incidente

$\omega_s$  : Frecuencia Angular de la onda de Stokes

$p_o$  : Distribución de densidad inicial

$p(z, t)$  : Amplitud de la onda acústica

$q_B$  : vector de la onda acústica

$\Omega_B$  : Frecuencia de la onda acústica

CC: Complejo Conjugado (Artificio matemático para hacer positiva a una ecuación)

En base a las siguientes ecuaciones, el campo eléctrico total está dado por:

$$E(z, t) = E_p(z, t) + E_s(z, t) \quad \text{Ecuación 17}$$

Este conjunto de ecuaciones no posee solución analítica por lo que es necesario utilizar medios no metódicos con el propósito de hallar una solución. Es por eso que considera las condiciones de estado equilibrio, donde las ecuaciones de amplitud se acoplan del campo eléctrico óptico.

$$\frac{dA_p}{dz} = \frac{i \varepsilon_o \omega \gamma_{st}^2 q^2}{2nc p_o} \frac{|A_s|^2 A_p}{\Omega_B^2 - \Omega^2 - i \Gamma_B} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$\frac{dA_s}{dz} = \frac{i \varepsilon_o \omega \gamma_{st}^2 q^2}{2nc p_o} \frac{|A_p|^2 A_s}{\Omega_B^2 - \Omega^2 - i \Gamma_B} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$I_{s,p} = 2 n \varepsilon_o c A_{s,p} \quad \text{Ecuación 20}$$

Asumiendo el factor de ganancia de Brillouin Ecuación 21:

$$g_B(\Omega) = g_p \frac{\left(\frac{\Gamma_B}{2}\right)^2}{(\Omega - \Omega_B)^2 + \left(\frac{\Gamma_B}{2}\right)^2} \quad \text{Ecuación 21}$$

Mediante la Ecuación 22 se modela los fenómenos de Scattering:

$$\frac{dI_s}{dz} = \frac{dI_p}{dz} = -g_B I_i I_s \quad \text{Ecuación 22}$$

Se debe tener cuidado que las pérdidas en la transmisión ( $\alpha$ ), a lo largo de una fibra óptica de longitud (L) no son despreciables, obteniendo la Ecuación 9 y la Ecuación 10 que describen las ecuaciones de las no linealidades.

$$\begin{aligned} \frac{dI_p}{dz} &= -g_B I_s I_p - \alpha I_p \\ \frac{dI_s}{dz} &= -g_B I_s I_p + \alpha I_s \end{aligned}$$



## **CAPÍTULO III**

### **3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1.TIPO DE ESTUDIO**

##### **3.1.1. INVESTIGACIÓN APLICADA**

En esta investigación tiene como propósito predecir un comportamiento específico a través de los conocimientos prácticos obtenidos al formular el problema, el investigador se fundamenta en el marco teórico para formular nuevas teorías y poder justificar con sus resultados.

#### **3.2.MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS**

##### **3.2.1. MÉTODOS**

###### **A. MÉTODO DESCRIPTIVO**

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

- a) Diseño de un sistema de comunicaciones ópticos WDM.
- b) Estudio del efecto no lineal SBS.

###### **B. MÉTODO INVESTIGATIVO EXPERIMENTAL**

- a) Simulación de un sistema de comunicación óptico WDM.

Para simular el sistema de comunicación WDM se utilizó el software OptiSystem de Optiwave generando dos escenarios que simulen un sistema de comunicación WDM. El escenario 1 se realizó las simulaciones de un transmisor con un canal a través de una fibra bidireccional con el efecto no lineal SBS y se compara con una fibra óptica ideal para generar los resultados.

El escenario 2 se realizó las simulaciones con un transmisor de 16 canales, que pasan a través de un multiplexor de 16\*1 en una fibra bidireccional con el efecto no lineal SBS y se compara con una trama con una fibra óptica ideal para generar los resultados.

- b) Test del sistema de comunicación óptico (Velocidades de transmisión, Niveles de potencia, Ancho de banda, sincronismos y BER)

Las pruebas realizadas para los sistemas de comunicación óptico 1 y 2 se efectuó mediante la variación de la longitud del enlace y el índice de refracción de la fibra óptica para visualizar como es afectado la señal al llegar al receptor.

### **C. MÉTODO ANALÍTICO**

Para el análisis del efecto no lineal denominado SBS se dispone de dos simulaciones realizadas en el software OptiSystem, La primera simulación describe un escenario WDM con un canal donde se realizará la comparativa entre un medio ideal y un medio inducido al efecto no lineal SBS. La segunda simulación hace referencia a un sistema de comunicación WDM de 16 canales trabajando de forma ideal e inducida el efecto no lineal SBS. Para la recolección de información se utilizó dispositivos e instrumentos de medida que proporciona OptiSystem para verificar el rendimiento del sistema de comunicación

#### **3.2.2. TÉCNICAS**

##### **A. OBSERVACIÓN**

Para este proyecto de investigación se utilizó la observación de tipo estructurada por lo que utilizamos métodos cuantitativos, realizando un estudio más preciso de los parámetros que vamos a medir y visualizar de una forma ordenada, cualquier parámetro o situación que beneficie al desarrollo de su propósito en función de objetivos preestablecidos.

#### **3.2.3. INSTRUMENTOS**

Los instrumentos utilizados para la investigación son los siguientes: Medidor de potencia óptica (MPO), Analizador de espectros ópticos (OSA), Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR) y Medidor de la tasa de error de bit (BER).

Para la obtención de los datos de la simulación se utilizó los instrumentos proporcionados por OptiSystem para la medición de señales ópticas:

- ✓ Analizador de Espectros
- ✓ Medidor de potencia

- ✓ Analizador WDM

Y para la medición de señales eléctricas:

- ✓ Analizador de espectros
- ✓ Analizador de la Tasa de error en bits (BER)
- ✓ Analizador de Diagrama de Ojo

Tomar en cuenta que otros de los factores que alteran la generación de los efectos no lineales como por ejemplo el área efectiva, longitud de la fibra óptica y la potencia crítica de Brillouin al utilizarlos generan la presencia del efecto no lineal SBS.

Para esto con propósitos educativos se utilizará tres tipos de fibra óptica para comparar como el efecto SBS puede afectar las mediciones dependiendo del tipo la fibra.

### **3.3.HIPÓTESIS**

El diseño y simulación de una red WDM inducida al efecto no lineal de la fibra denominada Stimulated Brillouin Scattering (SBS) permitirá determinar el rendimiento de un sistema de comunicaciones óptico.

### **3.4.IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES**

#### **3.4.1. VARIABLE DEPENDIENTE**

Permitirá determinar el rendimiento de un sistema de comunicaciones óptico.

#### **3.4.2. VARIABLE INDEPENDIENTE**

El diseño y simulación de una red WDM inducida al efecto no lineal de la fibra denominada Stimulated Brillouin Scattering (SBS).

### 3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

<b>VARIABLES</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>INSTRUMENTO</b>
<b>Dependiente</b>			
Permitirá determinar el rendimiento de un sistema de comunicaciones óptico.	Evaluar el rendimiento del sistema de comunicaciones óptico.	-Velocidad de transmisión. -Ancho de banda. -Sincronismo -Potencia en el Tx. -Potencia en el Rx.	- Espectrómetro - Diagrama de Ojo - OTDR
<b>VARIABLES</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>INSTRUMENTO</b>
<b>Independiente</b>			
El diseño y simulación de una red WDM inducida al efecto no lineal de la fibra denominada Stimulated Brillouin Scattering (SBS).	El efecto no lineal SBS utiliza la potencia óptica, que refleja en el interior produciendo una onda de Stokes con dirección opuesta y cambiando la frecuencia de la onda incidente.	-Diseño de la red Simulación de la red.  -Simulación del efecto no lineal SBS.  -Observar el efecto SBS causando alteraciones.	- Cálculos - Software de simulación. - Características Técnicas.

Tabla 1. Operacionalización de las variables.

Fuente: Autor

### 3.6. POBLACIÓN Y MUESTRA

#### 3.6.1. POBLACIÓN

La población, es determinada por cuatro pruebas los datos obtenidos en función de tres causas de atenuación y siete longitudes de enlace, estableciendo de una mejor manera la efectividad de la fibra óptica, recordar que todas estas pruebas son aleatorias por lo que se toma como una población infinita.

#### 3.6.2. MUESTRA

La población carece de registro definido, es decir que es desconocida ya que el número de pruebas puede ser infinito, por lo tanto, la muestra es establecida de acuerdo al cálculo con la siguiente fórmula:

$$n = \frac{Z_{\infty}^2 * p * q}{i^2}$$

Se toma el valor de gauss del 0.05 % por lo que la prevalencia es del 95%.

#### Significado de cada parámetro:

$Z_{\infty}$  =Distribución de Gauss donde  $z_{\infty}= 0.05= 1.96$

$p$ = 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%,  $i=0.05$

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

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

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

$$n = 72.99$$

$$n=73$$

### 3.7.PROCEDIMIENTOS

#### 3.7.1. ANÁLISIS TEÓRICO

- a) Establecer las bases teóricas para el desarrollo de una red WDM.
- b) Estudiar el efecto no lineal SBS producidos en la fibra óptica.
- c) Analizar de los datos obtenidos en la red WDM por efecto de las no linealidades en la fibra.

#### 3.7.2. DISEÑO DE UN SISTEMA WDM

- a) Analizar y Demostrar parámetros como: Potencia crítica SBS, Pérdidas, Ganancia de Brillouin y determinar las ecuaciones para describir el efecto no lineal SBS.
- b) Definir los parámetros técnicos de la fibra óptica.
- c) Diseñar la red WDM inducida a un efecto no lineal en el simulador OptiSystem de Optiwave.

#### 3.7.3. PRUEBAS

- a) Realizar la prueba en el simulador OptiSystem de Optiwave.
- b) Seleccionar el escenario para las simulaciones.
- c) Registrar los datos de los dos sistemas de comunicación óptico proporcionados por el software OptiSystem (Velocidad de transmisión, ancho de banda, efecto de Jitter, BER).

### 3.8.PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

#### 3.8.1. MODELAMIENTO DEL CANAL ÓPTICO

Para modelar el canal óptico se utilizaron las ecuaciones de maxwell para obtener la ecuación no lineal de schrodinger o (NLSE). Por ser este un medio dieléctrico se considera la densidad volumétrica y la densidad superficial igual a cero ( $\rho_v = 0, \vec{J}_e = 0$ ) (Sevilla, Simbaña & Fernández, 2013).

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad \text{Ecuación 23}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \mu \frac{\partial \nabla \cdot \vec{H}}{\partial t} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \text{Ecuación 25}$$

$$\nabla \cdot \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad \text{Ecuación 26}$$

A través de las siguientes ecuaciones se halló el vector donde se va a desplazar, esta se relaciona en el campo eléctrico y un vector de polarización P.

$$\bar{D} = \epsilon_0 \bar{E} + \bar{P}$$

Se halla el rotacional en la Ecuación 24.

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{E}) = \mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \bar{H}) \quad \text{Ecuación 27}$$

Empleando  $\nabla \times (\nabla \times \bar{E}) = \nabla(\nabla \cdot \bar{E}) - \nabla^2 \bar{E}$  y reemplazando la Ecuación 26 y Ecuación 27 se tiene:

$$\nabla^2 \bar{E} = -\mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\epsilon_0 \bar{E} + \bar{P}) \quad \text{Ecuación 28}$$

El vector polarización  $\bar{P}$  se expresa en dos componentes: lineal y no lineal como se muestra a continuación.

$$\bar{P} = \bar{P}_N + \bar{P}_{NL} \quad \text{Ecuación 29}$$

componente lineal:

$$\bar{P} = \epsilon_0 x_e^{(x)} \bar{E} \quad \text{Ecuación 30}$$

La componente no lineal del vector de polarización:

$$\bar{P}_{NL} = \epsilon_0 \epsilon_{NL} \bar{E} \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde:

$x_e^{(1)}$  Susceptibilidad eléctrica de primer orden.

$\epsilon_{NL}$  Permittividad no lineal del material.

Se reemplaza en la expresión del vector de polarización de la Ecuación 28 y se obtiene:

$$\nabla^2 \bar{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \left( 1 + x_e^{(1)} + \epsilon_{NL} \right) \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad \text{Ecuación 32}$$

Es necesario recordar que la permitividad relativa en el material se puede expresar como una susceptibilidad eléctrica de primer orden.

$$\epsilon_r 1 + x_e^{(1)} \quad \text{Ecuación 33}$$

La permitividad en el material no es más que la suma de las componentes lineales y no lineales  $\epsilon = \epsilon_r + \epsilon_{NL}$  y empleando la siguiente ecuación:  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$  obteniendo la ecuación del campo eléctrico de una fibra óptica:

$$\nabla^2 \bar{E} = -\frac{\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad \text{Ecuación 34}$$

Aplicando la transformada de Fourier ( $\partial/\partial t$  por  $i\omega$ ) en la Ecuación 34, cambia del dominio del tiempo al dominio de frecuencia de la onda para el campo eléctrico.

$$\nabla^2 \tilde{E} + \frac{\omega_0^2}{c^2} \hat{\epsilon}(\omega) \tilde{E} = 0 \quad \text{Ecuación 35}$$

La Ecuación 35, Se asume que la ecuación del campo eléctrico en función del dominio del tiempo es:

$$\begin{aligned} \tilde{E}(\mathbf{r}, \omega) = & \tilde{A}_x(z, \omega) \tilde{F}_x(\mathbf{r}_\perp, \omega) e^{j\beta(\omega)z_x} + \tilde{A}_y(z, \omega) \tilde{F}_y(\mathbf{r}_\perp, \omega) e^{j\beta(\omega)z_y} \\ & + \tilde{A}_z(z, \omega) \tilde{F}_z(\mathbf{r}_\perp, \omega) e^{j\beta(\omega)z_z} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 36}$$

La Ecuación 36,  $\tilde{F}_z(\mathbf{r}_\perp, \omega)$  muestra la transformada de Fourier del campo del modo elemental en la fibra.  $\tilde{A}_z(z, \omega)$  y  $\beta(\omega)$  constante de propagación. Se conoce que  $\tilde{F}_z(\mathbf{r}_\perp, \omega)$  debe ser menor que las otras dos componentes.

$$\tilde{F}_x(\mathbf{r}_\perp, \omega) \approx \tilde{F}_y(\mathbf{r}_\perp, \omega) \quad \text{Ecuación 37}$$

El campo eléctrico es:

$$\tilde{E}(\mathbf{r}, \omega) = \tilde{A}(z, \omega) \tilde{F}_z(\mathbf{r}_\perp, \omega) e^{j\beta(\omega)z} \quad \text{Ecuación 38}$$

La solución a la envolvente en función del dominio de la frecuencia  $\tilde{A}(z, \omega)$ , se presenta en la ecuación 39:

$$2j\beta_0 \frac{\partial \tilde{A}}{\partial z} + (\beta^2 - \beta_0^2) \tilde{A} = 0 \quad \text{Ecuación 39}$$

El término  $\beta$ , se expresa de forma lineal  $\beta_L$ , y en función de  $\Delta\beta$  representa una cantidad mínima y se detalla en la .



$$\beta = \beta_L + \Delta\beta,$$

$$\beta_L = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\beta_k \Delta\omega^k}{k!} \quad \text{Ecuación 40}$$

$$\Delta\beta = \gamma|A|^2 + j\frac{\infty}{2}$$

Remplazando la Ecuación 40 en la Ecuación 39 se obtiene:

$$\frac{\partial \tilde{A}}{\partial z} - j \left( \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\beta_k \Delta\omega^k}{k!} + \gamma|A|^2 + j\frac{\infty}{2} \right) \tilde{A} = 0 \quad \text{Ecuación 41}$$

Tomando la transformada inversa de la Ecuación 41, se obtiene la ecuación en el dominio del tiempo, Al remplazar se obtiene:

$$\Delta\omega^k = j^k \frac{\partial^k}{\partial t^k} \quad \text{Ecuación 42}$$

Para la NLSE representada en la Ecuación 43, se simplifica considerando únicamente la atenuación, los coeficientes de dispersión de segundo y tercer orden además el efecto no lineal de Kerr, obteniendo:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{2} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = j\gamma|A|^2 A \quad \text{Ecuación 43}$$

Donde:

$j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}$  : Efecto disperso de segundo orden.

$\frac{\beta_3}{2} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3}$  : Efecto disperso de tercer orden.

$\frac{\alpha}{2} A$ : Atenuación (Lineal)

$j\gamma|A|^2 A$  : Efecto Kerr (No lineal)

### 3.8.2. MODELAMIENTO DE LA ECUACIÓN DE BRILLOUIN

Para el modelamiento de la ecuación de Brillouin, no se ve representado en la NLSE por lo que es el resultado de transferir una onda con longitud de onda menor (llamada señal de bombeo) a una de longitud de onda mayor llamada señal de Stokes, Ecuación 44 (Sevilla, Simbaña & Fernández, 2013).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s \pm P_s \sum_{i=1}^N \frac{g_i}{\Gamma A_{eff}} P_{B_i} \\ \frac{dP_{ASE}}{dz} = -\alpha_s P_{ASE} \pm P_s \sum_{i=1}^N g_i P_{B_i} (P_{ASE} + 2h\nu\Delta\nu F_i) \end{array} \right. \quad \text{Ecuación 44}$$

Donde:

$P_s$ : Potencia de la señal.

$P_{B_i}$ : Potencia i-ésimo de incidencia.

$P_{ASE}$ : Ruido por emisión estimulada amplificada

$\alpha_s$ : Constante de atenuación de la fibra.

$g_i$ : Coeficiente de ganancia de Raman o Brillouin

$A_{eff}$ : Área efectiva

$h$ : Constante de Planck

$\nu$ : Frecuencia

$\Delta\nu$ : Ancho de banda del ruido

$\Gamma$ : Factor de polarización relativa

$F_i$ : Figura de ruido i-ésimo de incidencia

### 3.8.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN WDM

Para el diseño de un sistema de comunicaciones WDM es necesario cumplir parámetros técnicos que establece la EIA/TIA 569 la cual rigie un proceso para estandarizar sobre las prácticas de diseño y construcción los cuales darán soporte a los medios de transmisión y al equipo de comunicaciones.

En la figura 7, se muestra el sistema de comunicaciones óptico con un solo canal

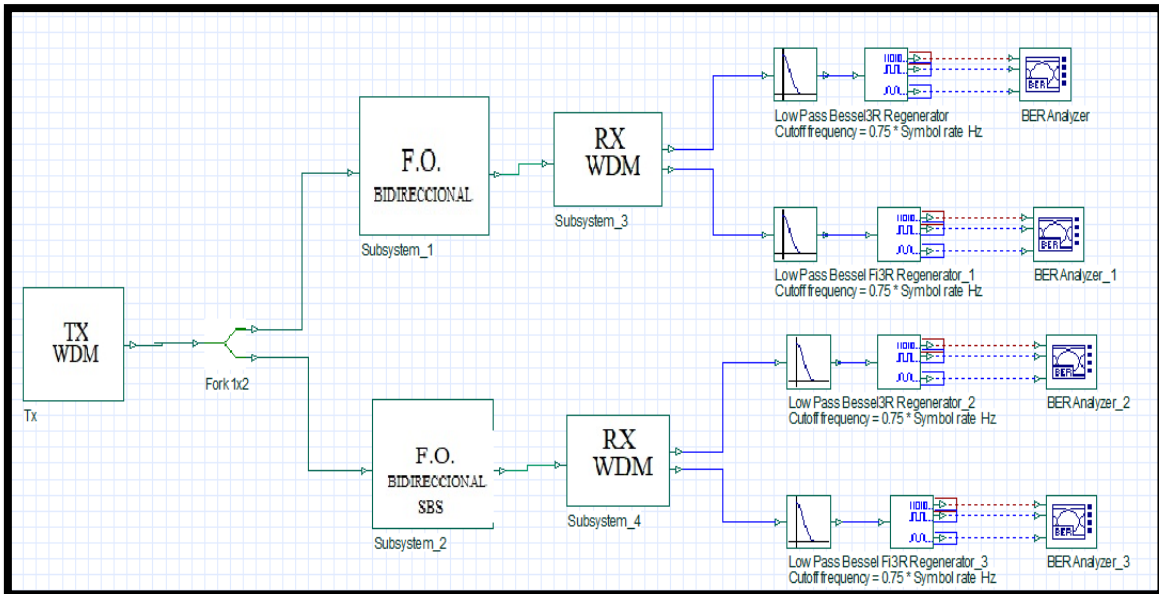


Figura 7. Sistema de comunicación WDM con un canal.

Fuente: Autor

## A. SISTEMA DE COMUNICACIÓN (1 CANAL)

Los parámetros de transmisión del Sistema de Comunicaciones WDM son:

- Bit Rate: 10 Gbps.
- Número de canales: 1.
- Polarización: NRZ.

### a) DISEÑO DEL TRANSMISOR

El sistema de comunicaciones 1 de fibra óptica se considera las siguientes características dado por los fabricantes:

#### Características:

- **Modelo comercial:** STM81004X\_L
- **Fabricante:** Siemens
- **Frecuencia del canal:** 191.5 THz

- **Longitud de Onda:** 1550 nm
- **Potencia del Transmisor:** 1200  $\mu$ W o 0.79 dBm

A continuación, en la figura 8, se detalla los componentes del transmisor simulado en el software OptiSystem de Optiwave.

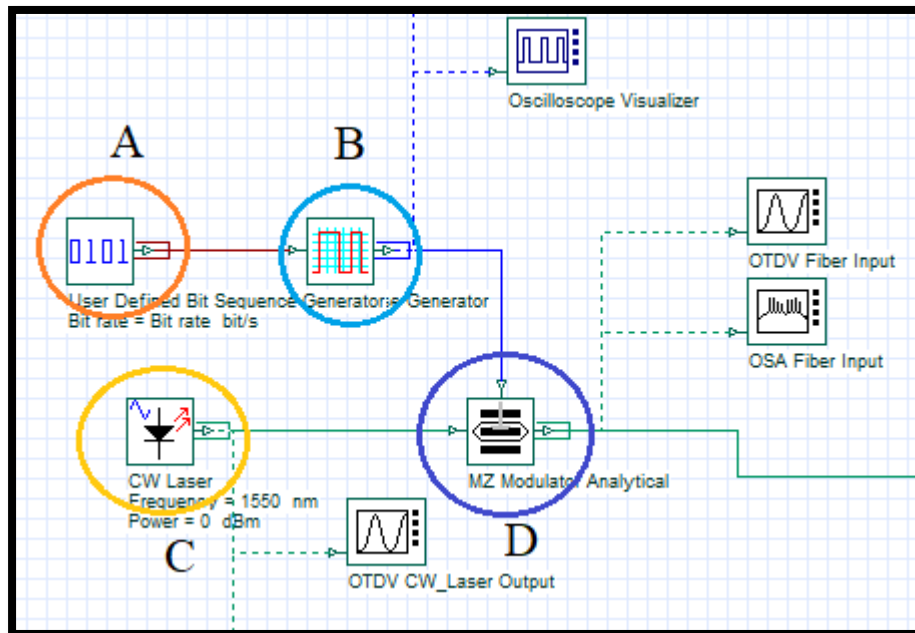


Figura 8. Componentes del bloque del Transmisor.

Fuente: Autor

Los elementos que conforman el transmisor en el sistema de comunicación son:

- Generador aleatorio de secuencia binaria
- Generador de Pulsos NRZ
- Láser Óptico
- Modulador Mach-Zehnder.

## b) DISEÑO DEL MEDIO DE TRANSMISIÓN

En el medio de transmisión se utiliza una fibra óptica comercial bidireccional para producir el efecto no lineal en el sistema de comunicación como se observa en la figura 9.

**Características:**

En el medio de transmisión de fibra óptica se considera las siguientes características dado por los fabricantes:

- **Modelo comercial de fibra:** Corning® Optical Fiber ZBL SMF-28 1550nm.
- **Longitud del enlace:** 50Km

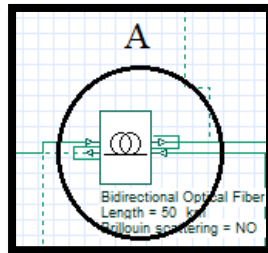


Figura 9. Fibra Óptica Bidireccional

Fuente: Autor

### c) DISEÑO DEL RECEPTOR

Para el diseño del receptor del sistema de comunicaciones 1 se considera las siguientes características dado por los fabricantes:

#### Características:

- **Modelo comercial fotodiodo PIN:** Beijing SWT® Optical Communication Technology Co. Ltd, model PSD-ACF-B8902.
- **Filtro:** Filtro Activo pasa bajos de cuarto orden de Bessel

La figura 10, se compone de:

- A. Fotodiodo PIN
- B. Filtro Activo pasa bajos

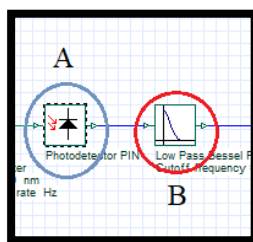


Figura 10. Componentes del Receptor

Fuente: Autor

## B. SISTEMA DE COMUNICACIÓN (16 CANALES)

El sistema de comunicaciones WDM 2 posee las siguientes características:

- A. Bit Rate: 10 Gbps.
- B. Número de canales: 16.
- C. Polarización: NRZ

En la figura 11, se muestra el sistema de comunicación 2 completo.

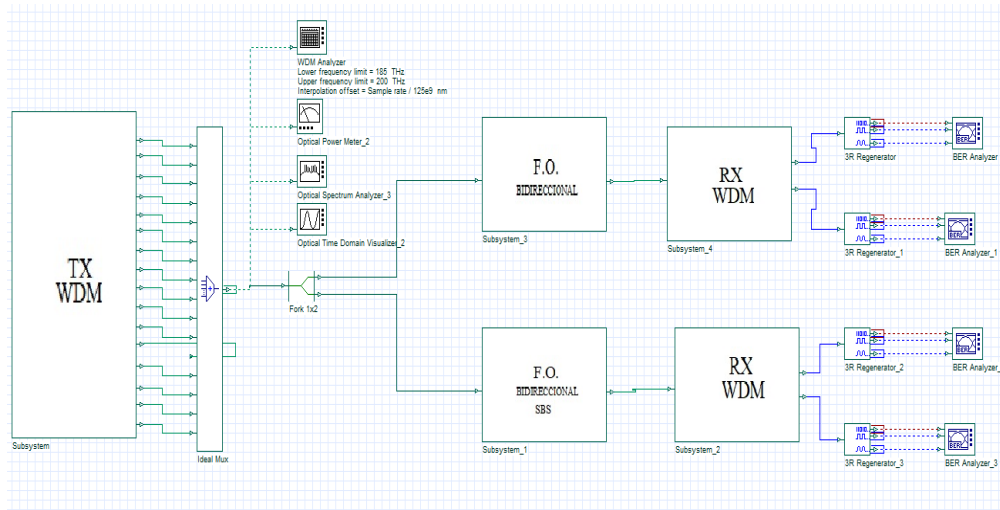


Figura 11. Sistema de comunicaciones de 16 canales.

Fuente: Autor

### a) DISEÑO DEL TRANSMISOR

El sistema de comunicaciones 2 de fibra óptica se considera las siguientes características dado por los fabricantes:

#### Características:

- **Modelo comercial:** STM81004X\_L
- **Fabricante:** Siemens
- **Frecuencia del canal:** 191.5 THz
- **Longitud de Onda:** 1550 nm
- **Potencia del Transmisor:** 1200  $\mu$ W ó 0.79 dBm

A continuación, en la figura 12, se detalla los componentes del transmisor simulado en el software OptiSystem de Optiwave.

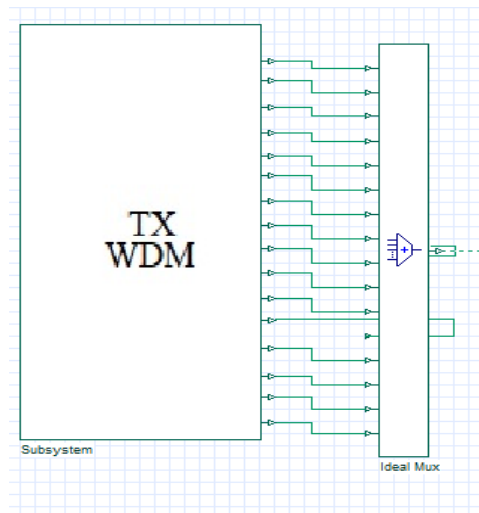


Figura 12. Subsistema del Transmisor WDM de 16 canales.

Fuente: Autor

Los elementos que conforman el transmisor en el sistema de comunicación figura 13, son:

- A. Generador aleatorio de secuencia binaria
- B. Generador de Pulsos NRZ
- C. Laser Óptico
- D. Modulador Mach-Zehnder.

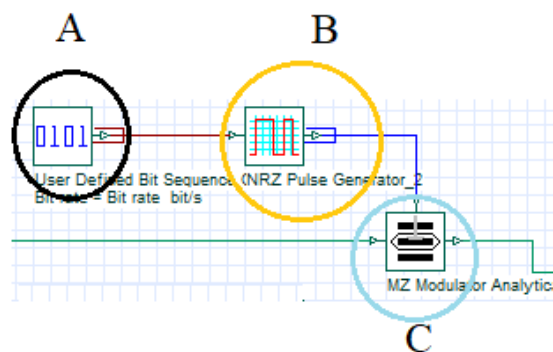


Figura 13. Elementos del subsistema de comunicación en el transmisor CH0

Fuente: Autor

Nota: Este diagrama se repite para los canales CH0-CH15.

## b) DISEÑO DEL MEDIO DE TRANSMISIÓN

La figura 14, muestra el medio de transmisión del sistema de comunicaciones 2 y se considera las siguientes características dados por el fabricante:

### Características:

- **Modelo comercial de fibra:** Corning® Optical Fiber ZBL SMF-28 1550nm.
- **Longitud del enlace:** 50Km

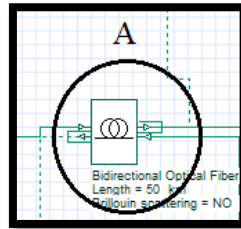


Figura 14. Fibra Óptica Bidireccional para los 16 canales.

Fuente: Autor

## c) DISEÑO DEL RECEPTOR

La figura 15, muestra el receptor del sistema de comunicaciones 2 y se considera las siguientes características dados por el fabricante:

### Características:

- **Modelo comercial fotodiodo PIN:** Beijing SWT® Optical Communication Technology Co. Ltd, model PSD-ACF-B8902.
- **Filtro:** Filtro Activo pasa bajos de cuarto orden de Bessel

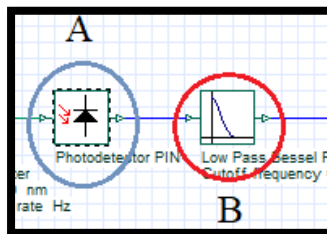


Figura 15. Componentes del Rx de 16 canales

Fuente: Autor

El receptor se compone de:

- A. Fotodiodo PIN
- B. Filtro Activo pasa bajos



## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se describe las pruebas realizadas para el sistema de comunicación WDM, para generar el efecto no lineal en la fibra óptica denominado SBS.

#### 4.1.RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN N.º 1

##### 4.1.1. NIVELES DE POTENCIA EN EL TRANSMISOR Y RECEPTOR.

En el sistema de comunicaciones se hace referencia un canal, simulando a través de una trama ideal y al efecto no lineal SBS; Los datos obtenidos se pueden observar en la Tabla 2 y son generados por el bloque WDM Analizar de OptiSystem.

Canal Óptico	Frecuencia (THz)	Potencia de la señal (dBm)	Potencia de Ruido (dBm)	SNR (dBm)	Potencia de Ruido:0.1nm (dBm)	OSNR (dB)
Tramo Ideal	191.5	-19.600793	-40.882433	21.28164	-42.923633	23.32284
Tramo con SBS	191.5	-15.601992	-68.88182	21.279828	-42.92302	23.321028

*Tabla 2. Resultados de niveles de potencia en el sistema de comunicación 1*

*Fuente: Autor*

Los datos obtenidos a continuación se tomarán como referencia con los niveles de potencia del tramo ideal para sacar una tabla de porcentajes mostrando como se ve afectada la señal a través de la fibra.

Canal Óptico	Potencia de la señal en %	% de Atenuación
Tramo Ideal	100%	0%
Tramo con SBS	79.60%	20.4%

*Tabla 3. Porcentaje de atenuación de los niveles de potencia.*

*Fuente: Autor*

En la figura 16, se registran los datos obtenidos por el software de simulación OptiSystem en la salida del transmisor, primero a la salida del tramo ideal y luego a la salida de la fibra con el efecto SBS.

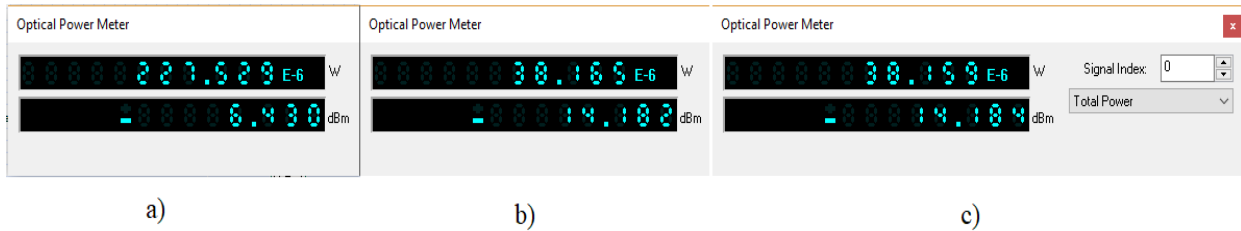


Figura 16. Niveles de potencia óptica: a) Salida del transmisor, b) Salida del Tramo Ideal, c) Salida de la Fibra Bidireccional

Fuente: Autor

En la figura 17, se registran los niveles de potencia eléctrica en la salida del demultiplexor del tramo ideal y de la fibra con el efecto SBS.

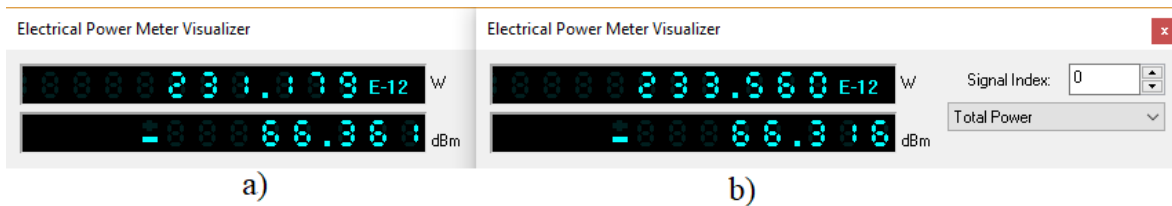


Figura 17. Niveles de potencia Eléctrica: a) Salida del Tramo ideal, b) Salida del tramo con la fibra bidireccional

Fuente: Autor

Según los datos obtenidos se aprecia que la trama ideal con respecto a la fibra óptica SBS tiene un porcentaje de error del 20.4 %.

#### 4.1.2. NIVELES DE AMPLITUD EN EL ESPECTRO ÓPTICO.

A continuación, se presenta la tabla 4 donde se presentan los niveles de amplitud del sistema de comunicaciones 1 obtenidas de la figura18, figura 19 y figura 20.

Canal Óptico	Amplitud Máxima (dBm)	Amplitud Mínima (dBm)
Total, Transmitida	-6.916818223944844	-104.4325324655264
Tramo Ideal	-17.34634424743705	-103.9358883691697
Tramo SBS	-17.34831789763354	-103.935794385827

Tabla 4. Resumen de los Niveles de amplitud del sistema de comunicaciones 1

Fuente: Autor

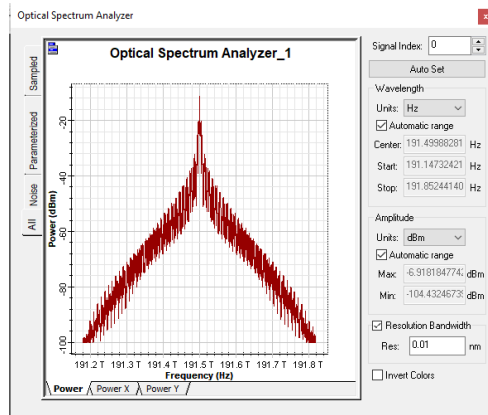


Figura 18. Nivel de amplitud del espectro óptico a la salida del transmisor

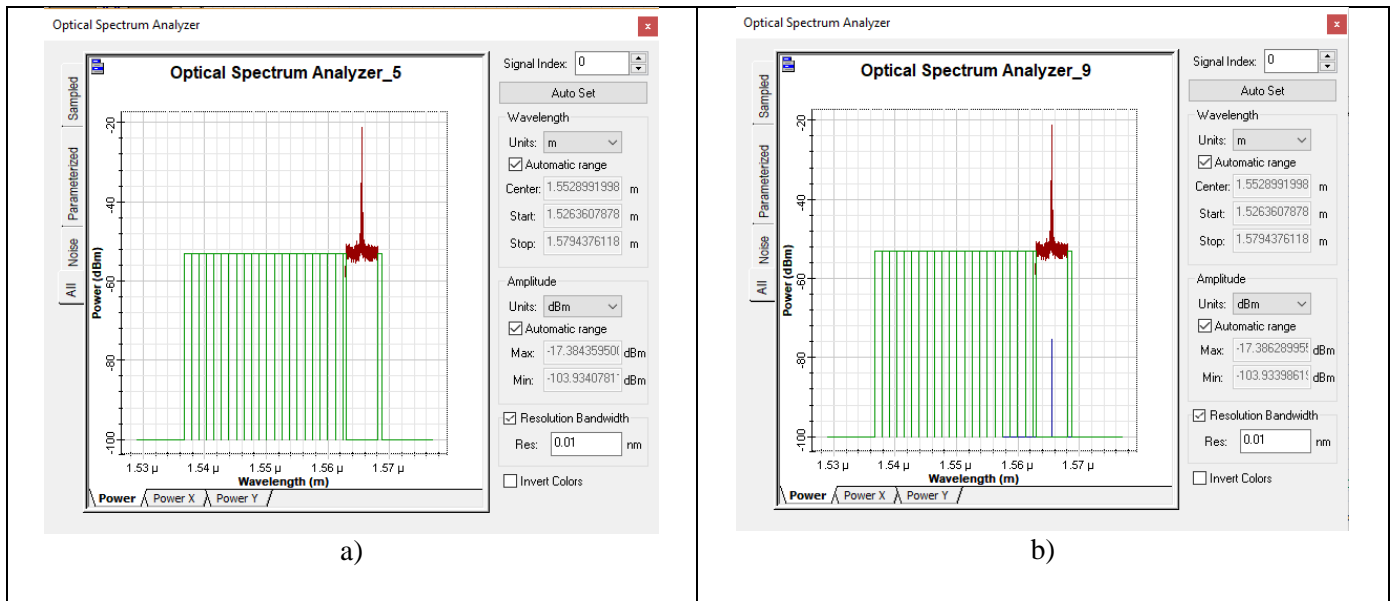


Figura 19. Niveles de amplitud del espectro óptico a la salida: a) Tramo Ideal, b) Tramo con SBS

Fuente: Autor

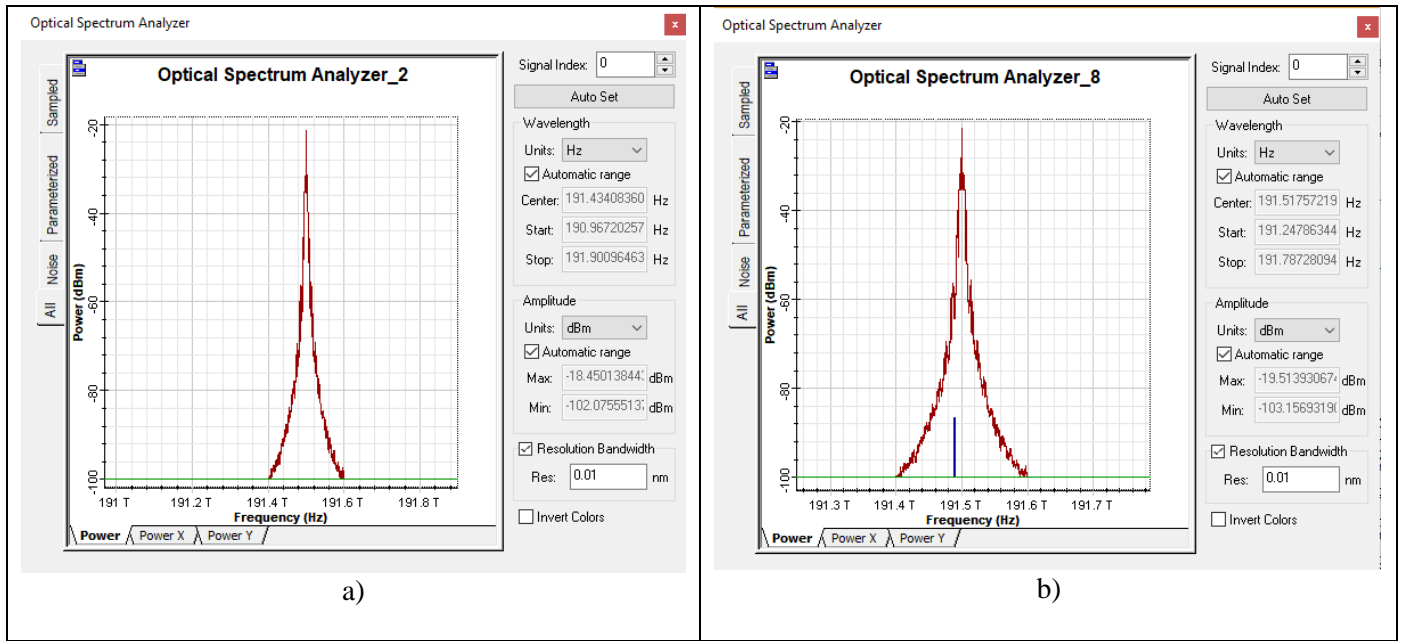


Figura 20. Niveles de amplitud del espectro óptico a la salida del Demux: a) Tramo Ideal, b) Tramo con SBS

Fuente: Autor

#### 4.1.3. NIVELES DE LA TASA DE ERROR EN BITS (BER).

La tabla 5 muestra los valores de la tasa de error en bits (BER) obtenidos en el software OptiSystem.

Canal Óptico	Factor Q Max.	Min. VER	Apertura de Ojo	Umbral	Decisión Inst.
Tramo ideal	4.64499	1.70042e-6	5.67519e-6	7.94743e-6	0.5
Tramo SBS	4.33227	7.37299e-6	4.77834e-6	8.51477e-6	0.5

Tabla 5. Niveles de tasa de error en bits del sistema de comunicaciones 1

Fuente: Autor

Como se observa en la figura 21, se toma del sistema de comunicación 1 las gráficas del Factor de calidad, el mínimo valor para la tasa de error de bit, apertura de ojo, umbral y la desviación instantánea de la trama ideal.

Cada uno de los datos obtenidos de la tabla 5, se generan por el software OptiSystem para relacionar la trama ideal con referencia al a trama con el efecto SBS.

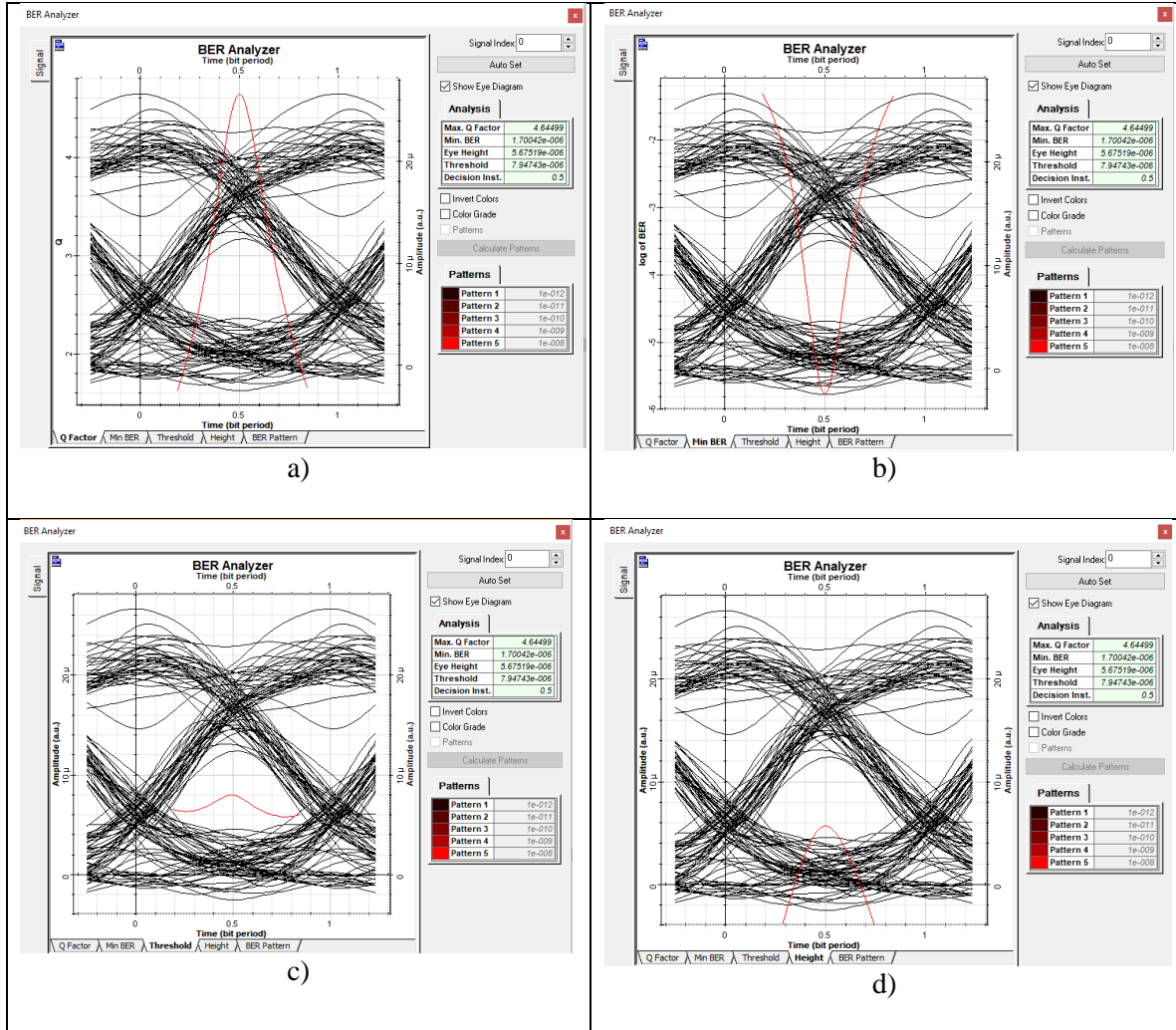


Figura 21. Niveles de la Tasa de error en bits (BER) del espectro óptico a la salida de la trama Ideal: a) Factor Q. b) Min BER. c) Umbral. d) Apertura de Ojo

Fuente: Autor

A continuación, se observan los niveles de las tasas de error en bits (BER) del espectro óptico en el tramo con el efecto no lineal SBS del sistema de comunicación 1, para esto se muestran las gráficas del Factor de calidad, el mínimo valor para la tasa de error de bit, apertura de ojo, umbral y la desviación instantánea en la figura 22.

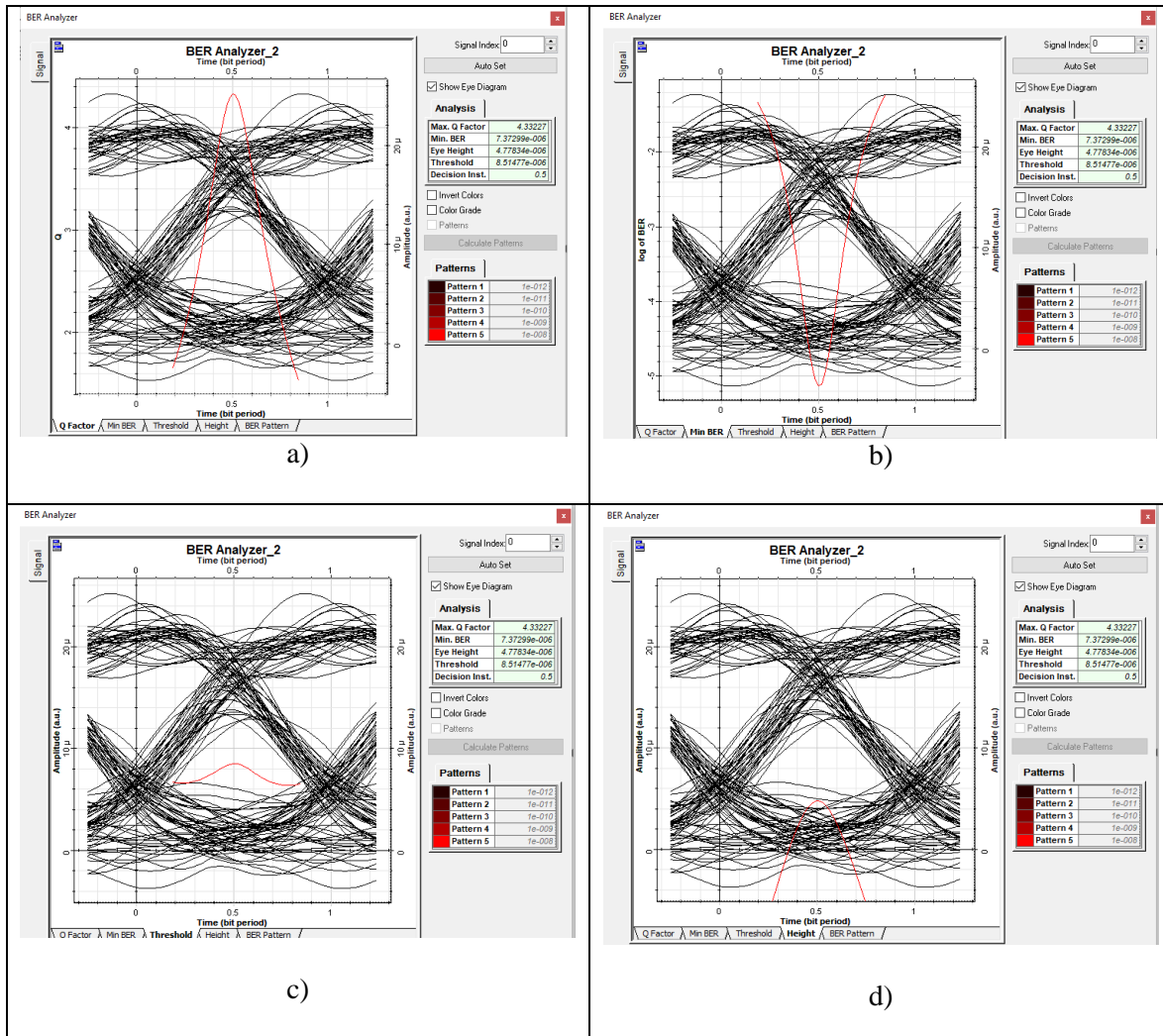


Figura 22. Niveles de la Tasa de error en bits (BER) del espectro óptico a la salida de la trama con efecto SBS: a) Factor Q. b) Min BER. c) Umbral. d) Apertura de Ojo

Fuente: Autor

Los datos obtenidos de la variable del factor Q, de la tabla 5 se efectúa el análisis porcentual con respecto al sistema de comunicación 1, en la trama ideal y la trama con el efecto no lineal SBS. Los resultados se muestran en la tabla 6.

Canal Óptico	Factor Q	Factor Q (%)	% de Atenuación
Trama Ideal	4.64499	100 %	0 %
Trama con SBS	4.33227	93.27 %	6.73 %

Tabla 6. Porcentaje de atenuación en el Factor Q del sistema de comunicación 1

Fuente: Autor

En el sistema de comunicación 1 se obtiene el 6.73 % de error en el factor de calidad entre las simulaciones de la trama ideal con una fibra óptica monomodo y la trama con el efecto no lineal SBS.

#### 4.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN N.º 2

Para el procesamiento de la información en el sistema de comunicaciones 2 solo se va a tomar en cuenta dos canales de forma aleatoria, el CH1 y CH8 para facilitar el análisis de los resultados.

##### 4.2.1. NIVELES DE POTENCIA EN EL TRANSMISOR Y RECEPTOR.

Los datos en la tabla 7 se obtienen por el bloque WDM Analyzer del software OptiSystem, como variable de referencia, la potencia de la señal del transmisor es el 100% del análisis porcentual, para visualizar como afecta en el sistema de comunicaciones 2 en la simulación con una trama ideal y con la trama con el efecto no lineal SBS.

CANAL ÓPTICO	Potencia de la señal del Tx (dBm)	Potencia de la señal de la trama ideal (dBm)	% de la potencia de la señal	Potencia de la señal de la trama con el efecto SBS (dBm)	% de la potencia de la señal	% de atenuación
<b>1</b>	-9.6160889	-19.598376	49,07	-19.61617	49,02	0,04
2	-9.6182253	-19.637917	48,98	-19.634324	48,99	-0,01
3	-9.6190508	-19.665964	48,91	-19.65914	48,93	-0,02
4	-9.6255459	-19.617302	49,07	-19.628408	49,04	0,03
5	-9.6243267	-19.649921	48,98	-19.650382	48,98	0,00
6	-9.6249678	-19.547472	49,24	-19.574679	49,17	0,07
7	-9.6258479	-19.583661	49,15	-19.556957	49,22	-0,07
<b>8</b>	-9.6248777	-19.620627	49,05	-19.586126	49,14	-0,09
9	-9.6250589	-19.665446	48,94	-19.646401	48,99	-0,05
10	-9.6253359	-19.687258	48,89	-19.710353	48,83	0,06

<b>11</b>	-9.6252136	-19.552636	49,23	-19.550687	49,23	0,00
<b>12</b>	-9.6252013	-19.598323	49,11	-19.602813	49,10	0,01
<b>13</b>	-9.6247773	-19.626216	49,04	-19.636671	49,01	0,03
<b>14</b>	-9.6188686	-19.555209	49,19	-19.589442	49,10	0,09
<b>15</b>	-9.6187973	-19.591705	49,10	-19.589709	49,10	-0,01
<b>16</b>	-9.6163235	-19.645167	48,95	-19.628277	48,99	-0,04

Tabla 7. Niveles de Potencia en el Sistema de comunicaciones óptica 2

Fuente: Autor

En la tabla 8, se describe el promedio de los niveles de potencia del transmisor de los canales 1 y 8 del sistema de comunicaciones óptico 2; Existe el 0.065 % de afectación y esto es causado por diferentes tipos de fenómenos que aparecen a lo largo del sistema.

<b>CANAL ÓPTICO</b>	<b>Potencia de la señal del Tx (dBm)</b>	<b>Potencia de la señal de la trama ideal (dBm)</b>	<b>% de la potencia de la señal</b>	<b>Potencia de la señal de la trama con el efecto SBS (dBm)</b>	<b>% de la potencia de la señal</b>	<b>% de atenuación</b>
<b>1</b>	-9.61608	-19.598376	49.07	-19.61617	49.02	0.04
<b>8</b>	-9.62487	-19.620627	49.05	-19.5861	49.14	-0.09
<b>Promedio</b>	-9.62048	-19.609501	49.06	-19.6011	49.08	0.065

Tabla 8. Promedio de los niveles de potencia en el transmisor del CH 1 y CH8 del Sistema de comunicaciones 2

Fuente: Autor

#### 4.2.2. NIVELES DE AMPLITUD EN EL ESPECTRO ÓPTICO.

A continuación, se presenta la tabla 9 donde se presentan los niveles de amplitud del sistema de comunicaciones 2 obtenidos de la figura 23.



Canal Óptico	Amplitud Máxima (dBm)	Amplitud Mínima (dBm)
Total, Transmitida	-6.92024361103924	-104.4323693518553
Tramo Ideal	-17.26366102227738	-103.9398256656058
Tramo SBS	-17.3003981033477	-103.938076280793

Tabla 9. Niveles de Amplitud del Sistema de comunicaciones 2

Fuente: Autor

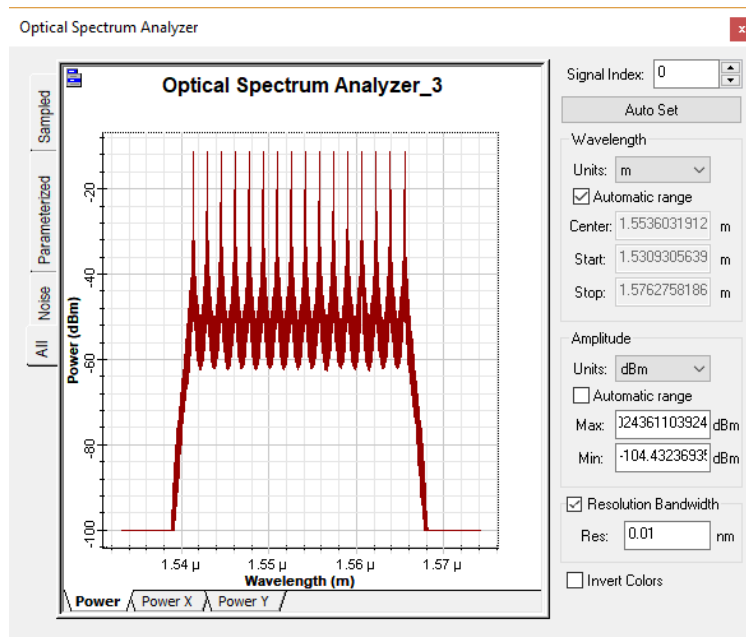
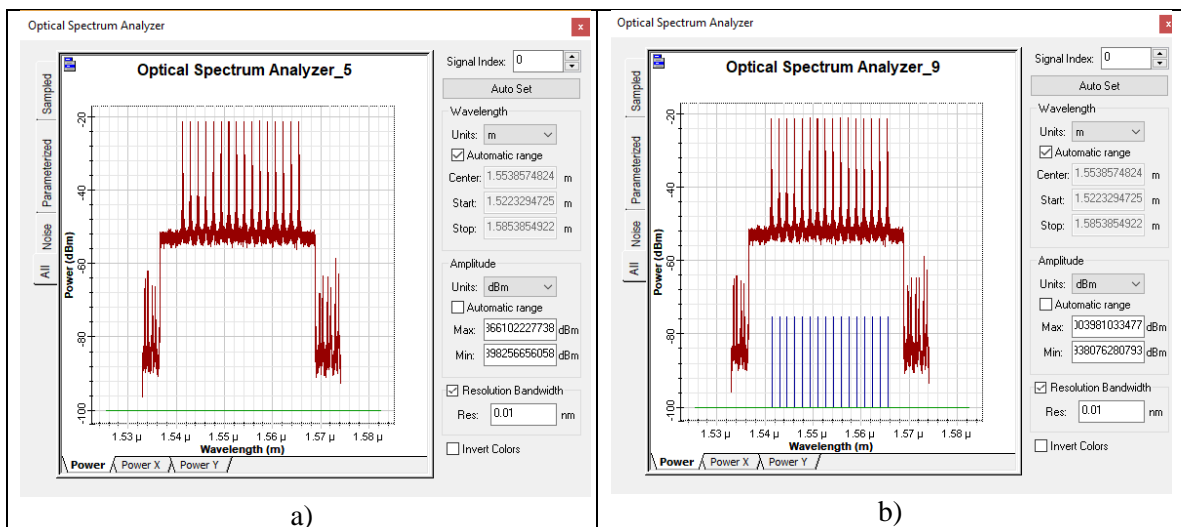


Figura 23. Nivel de Amplitud del espectro óptico a la salida del transmisor

Fuente: Autor



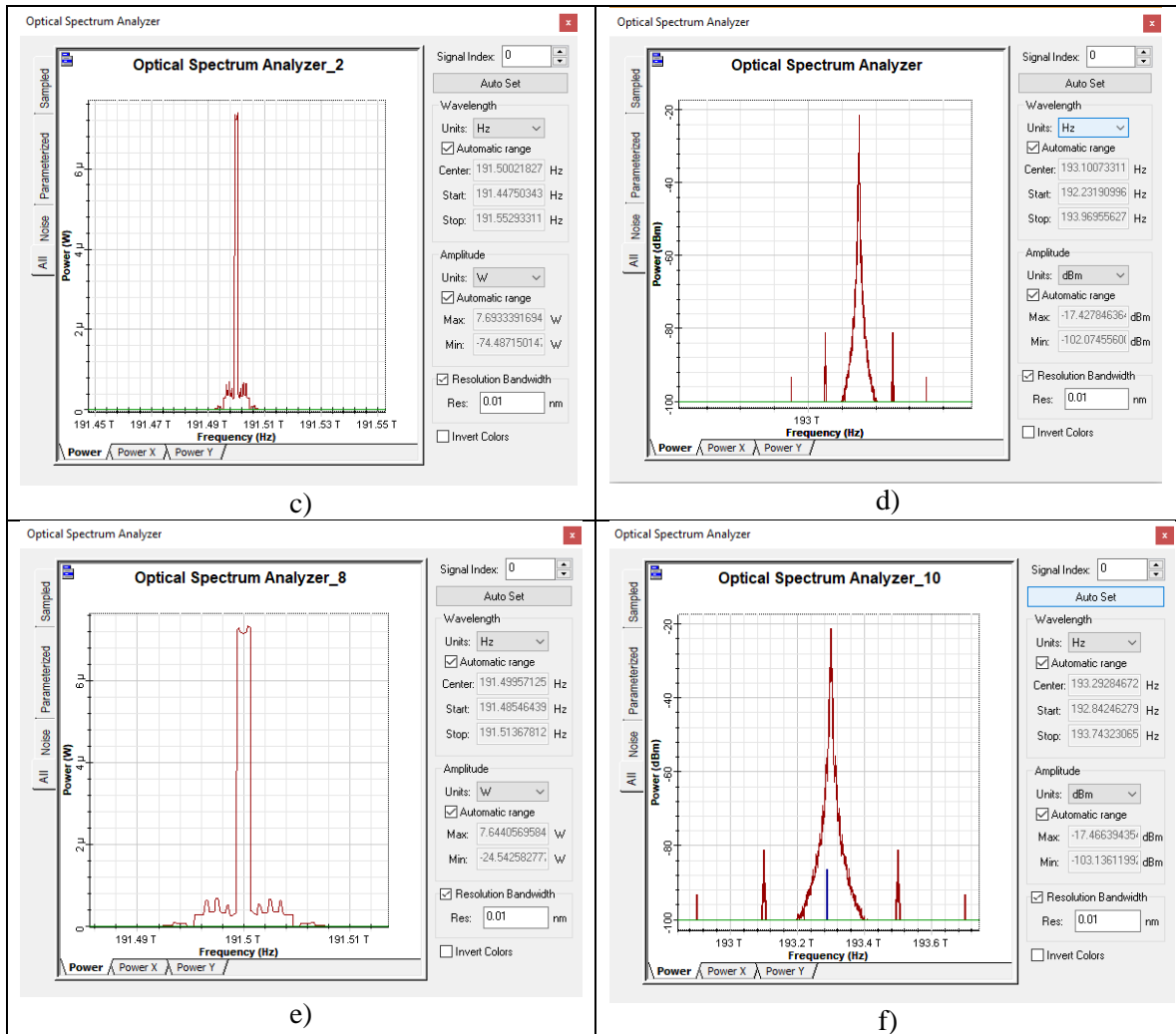


Figura 24. Graficas de los niveles de Amplitud óptica a) Trama ideal 16 canales b) Trama con el efecto SBS 16 canales c) Trama ideal CH 1 d) Trama con el efecto SBS CH 1 e) Trama con el efecto SBS CH 8.

Fuente: Autor

La figura 24, muestra los niveles de amplitud óptica en la salida del transmisor de 16 canales ideal y a la salida del tramo con el efecto no lineal SBS, genera un desplazamiento de señal por una señal de Stokes de 11GHz aproximadamente.

#### 4.2.3. NIVELES DE LA TASA DE ERROR EN BITS (BER).

La tabla 10, registra los datos de la tasa de error en bits (BER), Factor de calidad máximo, Mínima tasa de error en bits (BER), apertura de ojo, umbral y decisión Instantánea obtenidos en el software OptiSystem en los canales 1 y 8.

CH 1					
Canal Óptico	Factor Q Max.	Min. BER	Apertura de Ojo	Umbral	Decisión Inst.
Tramo ideal	5.15669	1.2567e-7	6.81865e-6	7.36271e-6	0.515625
Tramo SBS	5.03932	2.67052e-8	7.38582e-6	7.53059e-6	0.515625
CH 8					
Canal Óptico	Factor Q Max.	Min. BER	Apertura de Ojo	Umbral	Decisión Inst.
Tramo ideal	5.43932	2.67052e-8	7.38582e-6	7.53059e-6	0.515625
Tramo SBS	4.18719	1.40888e-5	4.52287e-6	7.56792e-6	0.515625

Tabla 10. Niveles de la tasa de error en bits (BER) del sistema de comunicacion 2

Fuente: Autor

Tabla 11, muestra los parámetros principales: factor de calidad y apertura del ojo de los CH1 y CH8.

Canal Óptico		Factor Q Max.	% Factor Q Max.	Apertura de Ojo	% Apertura de Ojo
CH 1	TRAMO IDEAL	5.15669	100 %	7.81865e-6	100 %
	TRAMO SBS	5.03932	97.72 %	7.38582e-6	94.46 %
CH 8	TRAMO IDEAL	5.43932	100 %	7.38582e-6	100 %
	TRAMO SBS	4.18719	76.98 %	4.52287e-6	61.24 %

Tabla 11. Niveles de las tasas de error en bits del Ch 1 y Ch 8.

Fuente: Autor

La figura 25, 26 muestran las gráficas del Factor de calidad y el umbral de los canales 1 y 8 del sistema de comunicación 2.

El factor de calidad se muestra en la figura 25, de la trama ideal y con el efecto no lineal SBS de los canales CH1 y CH8.

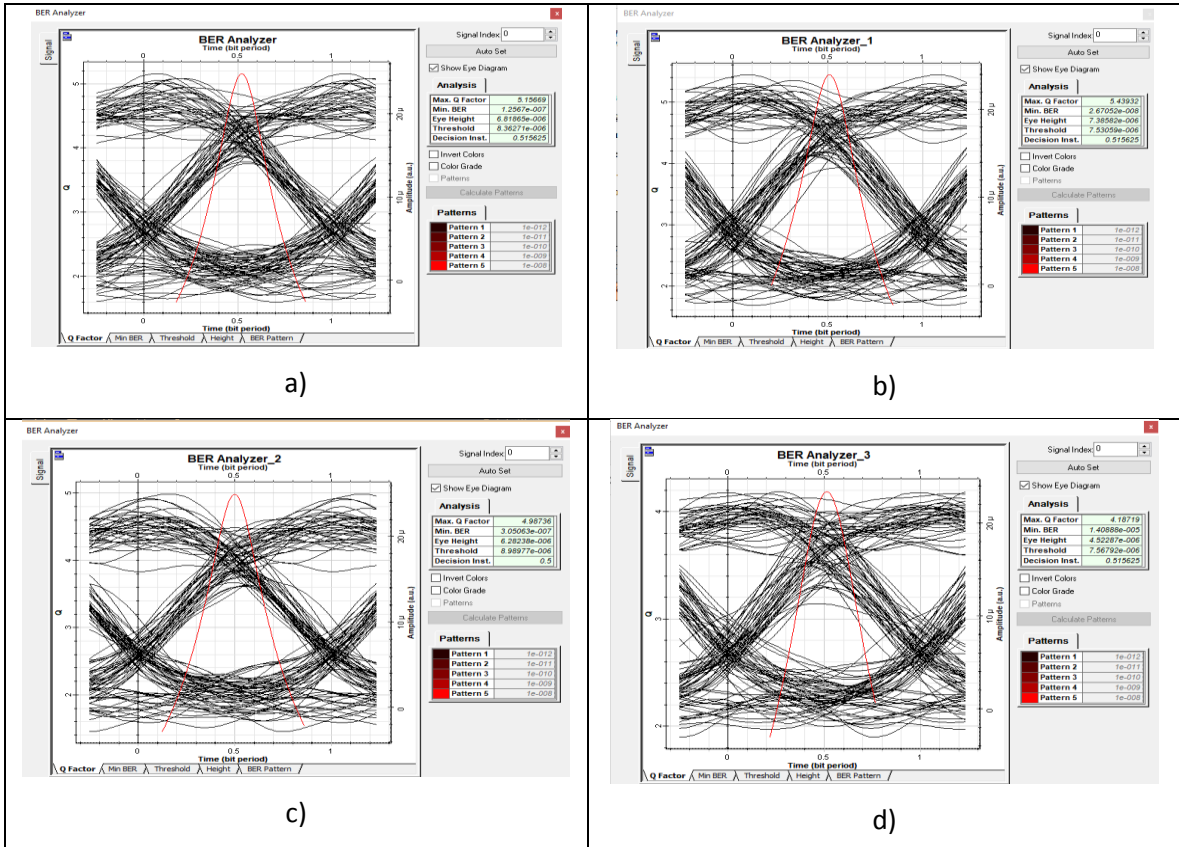
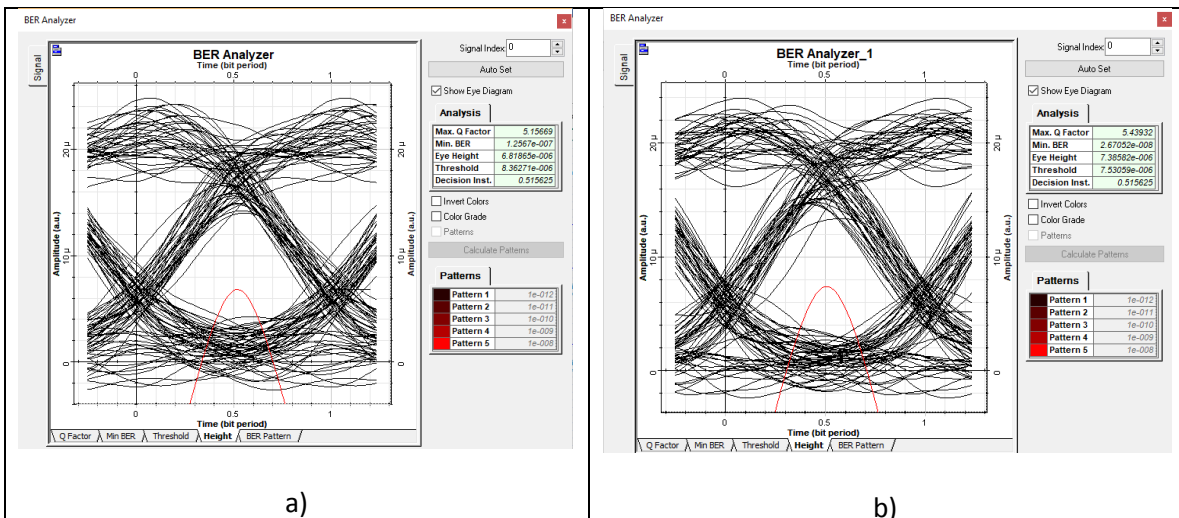


Figura 25. Graficas del Factor Q: a) Trama Ideal CH 1 b) Trama Ideal CH 8 c) Trama SBS CH 1 d) Trama SBS CH 8.

Fuente: Autor

En la figura 26, se observa el Umbral en la trama ideal y con el efecto no lineal SBS de los canales CH1 y CH8.



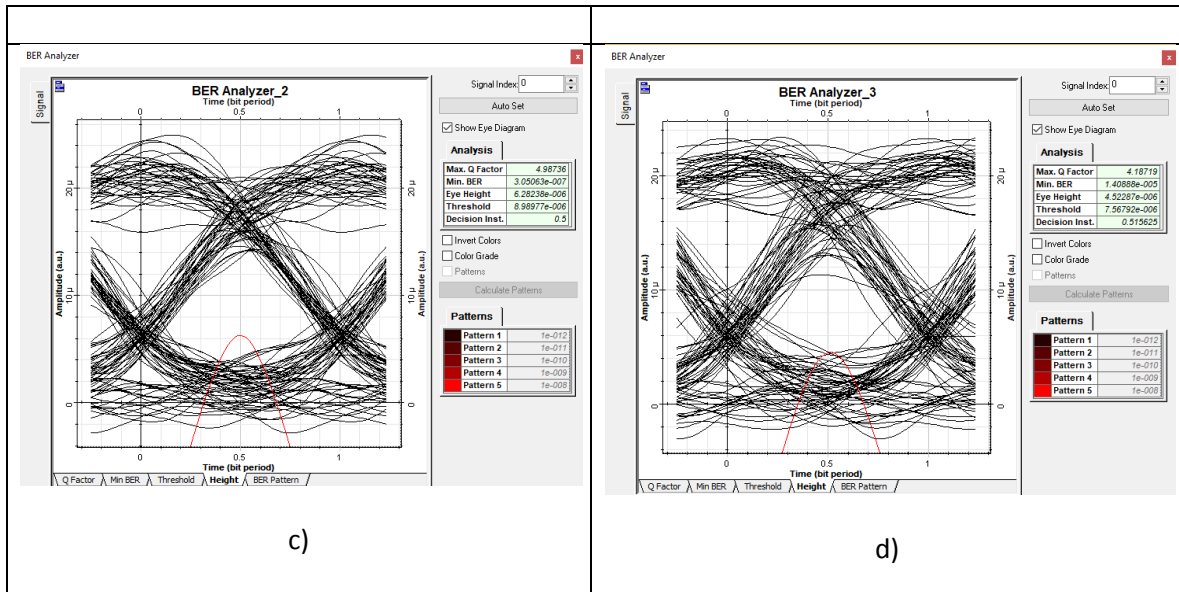


Figura 26. Graficas del Umbral: a) Trama Ideal CH 1 b) Trama Ideal CH8 c) Trama SBS CHI d) Trama SBS CH8.

Fuente: Autor

Según los diagramas de ojo obtenidos en la figura 25, la apertura es adecuada, pero con presencia de ruido, por lo que muestra un incremento del Jitter y BER, la distorsión es aceptable a pesar de la presencia del efecto no lineal SBS y se registran en la tabla 12.

Canal Óptico	Factor Q Max.	% Factor Q Max.	Apertura de Ojo	% Apertura de Ojo
TRAMO IDEAL	5.15669	100 %	7.81865e-6	100 %
TRAMO SBS	5.03932	97.72 %	7.38582e-6	94.46 %
<b>% DE DISTORSIÓN</b>	<b>2.28 %</b>		<b>5.54 %</b>	

Tabla 12. Niveles de distorsión con referencia del Factor Q y Apertura de Ojo del sistema de comunicación 2.

Fuente: Autor

### 4.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL TIPO DE FIBRA.

Se utiliza tres tipos de fibra óptica para hallar la potencia crítica de Brillouin:

- Ideal
- Corning
- Furukawa

Establecer la potencia de entrada del sistema y la longitud del enlace para poder calcular la potencia de salida del sistema.

**Paso 1) Calcular la longitud efectiva. (Ecuación 13)**

$$l_e = \frac{1-e^{-\alpha L}}{\alpha}$$

Donde:

$l_e$ : Longitud efectiva

$\alpha$ : Atenuación de la fibra ( $\alpha=0.23$ \*Atenuacion según la ITU650.2)

$L$ : Longitud del enlace (50) en km

**Paso 2) Calcular Área efectiva.**

$$A_{eff} = \pi w_0^2$$

**Ecuación 45**

Donde:

$A_{eff}$ : Área efectiva medida en ( $\mu m^2$ )

$w_0$ : Radio del núcleo

**Paso 3) Calcular la potencia crítica de Brillouin. (Ecuación 11)**

$$P_{critica}(SBS) = \frac{21A_{eff}}{g_B L_e}$$

Donde:

$A_{eff}$ : Área efectiva medida en ( $\mu m^2$ )

$g_B$ : Ganancia de Brillouin ( $5 * 10^{-11} m/W$ )

$L_e$ : Longitud efectiva

**Paso 4) Calcular la potencia crítica de Raman.**

$$P_{critica}(SBS) = f_{th} \frac{A_{eff}}{g_R L_e}$$

**Ecuación 46**

Donde:

$A_{eff}$ : Área efectiva medida en ( $\mu m^2$ )

$g_R$ : Ganancia de Raman ( $6 * 10^{-14} m/W$ )

$L_e$ : Longitud efectiva

$f_{th}$ : Factor de Raman para la potencia de umbral ( $f_{th}=16$ : Configuración co-propagante,  $f_{th}=20$ : Configuración contra-propagante)

**Paso 5) Calcular la potencia de salida.**

$$P_{out} = g_R \frac{P_{in}^2 * L_e}{A_{eff}} \quad \text{Ecuación 47}$$

Donde:

$A_{eff}$ : Área efectiva medida en ( $\mu m^2$ )

$g_R$ : Ganancia de Raman ( $6 * 10^{-14} m/W$ )

$L_e$ : Longitud efectiva

$P_{in}$ : Potencia de entrada

El cálculo de la potencia de salida en la fibra óptica monomodo Corning, con las siguientes características muestran los siguientes datos:

- **Diámetro del Núcleo:** 8.2  $\mu m$
- **Atenuación según la ITU650.2:** 0.2dB/km.

Longitud del enlace (Km)	Longitud efectiva en Km	Área efectiva ( $\mu m^2$ )	Pc SBS (W)	P in (W)	P out (W)
1	0,977348648	52,81017251	0,02269433	0,03	0,000837727
5	4,466660815	52,81017251	0,004965739	0,03	0,003828566
10	8,015572924	52,81017251	0,002767147	0,03	0,006870491
50	19,55959035	52,81017251	0,001133985	0,03	0,016765363
100	21,52061227	52,81017251	0,001030652	0,03	0,018446239
150	21,71722206	52,81017251	0,001021322	0,03	0,018614762
200	21,73693393	52,81017251	0,001020396	0,03	0,018631658

Tabla 13. Cálculos de la potencia crítica, Potencia de salida en función de la longitud del enlace en una fibra Corning.

Fuente: Autor

Características de la fibra óptica monomodo Furukawa muestran los siguientes datos:

- **Diámetro del Núcleo:** 10.4  $\mu\text{m}$
- **Atenuación según la ITU650.2:** 0.2dB/km

Longitud del enlace (Km)	Longitud efectiva en Km	Área efectiva ( $\mu\text{m}^2$ )	Pc SBS (W)	P in (W)	P out (W)
1	0,977348648	84,94866535	0,03650533	0,04	0,00148929
5	4,466660815	84,94866535	0,00798772	0,04	0,00680634
10	8,015572924	84,94866535	0,00445114	0,04	0,01221421
50	19,55959035	84,94866535	0,00182409	0,04	0,02980509
100	21,52061227	84,94866535	0,00165787	0,04	0,03279331
150	21,71722206	84,94866535	0,00164286	0,04	0,03309291
200	199,0905753	0,785398163	1,6569E-06	0,04	0,30337611

Tabla 14. Cálculos de la potencia crítica, Potencia de salida en función de la longitud del enlace en una fibra Furukawa.

Fuente: Autor

Características de la fibra óptica monomodo Ideal muestran los siguientes datos:

- **Diámetro del Núcleo:** 9  $\mu\text{m}$
- **Atenuación según la ITU650.2:** 0.2dB/km

Longitud del enlace (Km)	Longitud efectiva en Km	Área efectiva ( $\mu\text{m}^2$ )	Pc SBS (W)	P in (W)	P out (W)
1	0,977348648	63,61725124	0,0273385	0,04	0,00148929
5	4,466660815	63,61725124	0,00598193	0,04	0,00680634
10	8,015572924	63,61725124	0,00333342	0,04	0,01221421
50	19,55959035	63,61725124	0,00136604	0,04	0,02980509
100	21,52061227	63,61725124	0,00124157	0,04	0,03279331
150	21,71722206	63,61725124	0,00123033	0,04	0,03309291



200	21,73693393	63,61725124	0,00122921	0,04	0,03312295
-----	-------------	-------------	------------	------	------------

Tabla 15. Cálculos de la potencia crítica, Potencia de salida en función de la longitud del enlace en una fibra Ideal.

Fuente: Autor

#### 4.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En el análisis de resultados se verificó el diseño y simulación de los sistemas de comunicación para que sea fiable y permita un mayor rendimiento, se utilizó el método de comprobación de hipótesis Chi cuadrado, verificando la dependencia de las variables: potencia de la señal, factor Q y la apertura de ojo mediante los bloques de medición proporcionados por el software OptiSystem.

##### 4.4.1. DEMOSTRACIÓN DE HIPÓTESIS

De las variables independientes se utiliza los valores promedios obtenidos de las tablas anteriores para generar la tabla 16.

TRAMO	Potencia	Factor Q	Apertura de Ojo	Proporción Muestral
Tramo Ideal	-19.609501	5.15669	7.81865e-6	0.5
Tramo con SBS	-19.6011	5.03932	7.38582e-6	0.5
<b>Total</b>	-39.210601	10.19601	15.20447e-6	

Tabla 16. Variables Obtenidas.

Fuente: Autor

En la tabla 17, se muestra los datos obtenidos en la experimentación.

TRAMO	Potencia	Factor Q	Apertura de Ojo
Tramo Ideal	-20.10	5.45	4.852356e-6
Tramo con SBS	-19.20	4.09	4.325568e-6

Tabla 17. Variables Esperadas

Fuente: Autor

Para verificar la hipótesis se calcula los valores del Chi-cuadrado, con un error mínimo de 0.005 y 2 grados de libertad. Según la tabla 18, demostrando que el Chi Cuadrado  $X^2$  Tabla, (valor de 10.354856) mayor a  $X^2$  Prueba, (valor de 0.0002565) por lo tanto la hipótesis es válida.

K	3	r	2
Grados de Libertad		(r-1) (k-1)	2
Nivel de significación		$\alpha$	0.005
Chi Cuadrado $X^2$ Tabla		$\chi^2$	10.354856
Probabilidad		P	0.989856
$X^2$ Prueba			0.0002565

Tabla 18. Test Chi-Cuadrado

Fuente: Autor

Para verificar la prueba, hay que recordar que si  $\chi^2_{prueba}$  es mayor al chi cuadrado, la hipótesis es válida, por lo tanto, significa que el efecto no lineal SBS influye para el rendimiento del sistema de comunicación.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- ✓ Para el diseño de la red WDM se tomaron en cuenta los parámetros establecidos por la UIT, haciendo referencia a la característica de los fabricantes de la fibra y de más dispositivos que se utilizaron para simular un escenario real.
- ✓ Los efectos no lineales se presentan en todo tipo de dieléctrico en los cuales los niveles de potencia de entrada tienden a ser excesivos.
- ✓ Los parámetros que determinan la presencia de los efectos no lineales son el área efectiva, longitud efectiva y dependiendo del espaciamiento entre canales.
- ✓ El efecto no lineal SBS se presentan en los primeros tramos de fibra por lo que al recorrer grandes distancias su potencia tiende a decaer.
- ✓ La distancia del enlace al incrementarse tiende a aumentar la longitud efectiva en la fibra, produciendo una pérdida en la potencia de umbral donde se presentan las no linealidades de Brillouin.
- ✓ Cuando el área efectiva es reducida en una fibra óptica monomodo tiende a generar no linealidades lo cual se ve afectado en la deformación de la señal que se va a enviar.
- ✓ Para la simulación del efecto SBS se seleccionó una fibra óptica bidireccional y se configuró la ganancia de Brillouin.
- ✓ Para los sistemas de comunicación con velocidades de transmisión superiores a los 10 Gbps se demostró la presencia de atenuaciones, mostrando un incremento del retardo y BER, siendo un valor aceptable a pesar de la presencia de los efectos no lineales.

## 5.2.RECOMENDACIONES

- ✓ Hay que recordar que la potencia de entrada debe ser mucho mayor que la potencia crítica de SBS para que se presente el efecto no lineal.
- ✓ Para que se genere el efecto no lineal SBS se debe recordar que solo se presenta en sistemas con un ancho espectral mayor al ancho de banda de Brillouin.
- ✓ Para utilizar fibras monomodo DCF en sistemas WDM se toma en cuenta que el coeficiente de dispersión cromática debe ser similar en sus longitudes de onda.
- ✓ El diseño de un sistema de comunicaciones ópticas se basa en los parámetros establecidos por la UIT.
- ✓ Para la generación de los efectos no lineales en un sistema de comunicación este debe trabajar a velocidades de transmisión mayores a los 10GHz.
- ✓ El software de simulación OptiSystem se descargó como versión de prueba, por lo tanto, para volverlo a ejecutar es necesario formatear el pc mediante códigos por el símbolo del sistema y se podrá ejecutar nuevamente.

## BIBLIOGRAFÍA

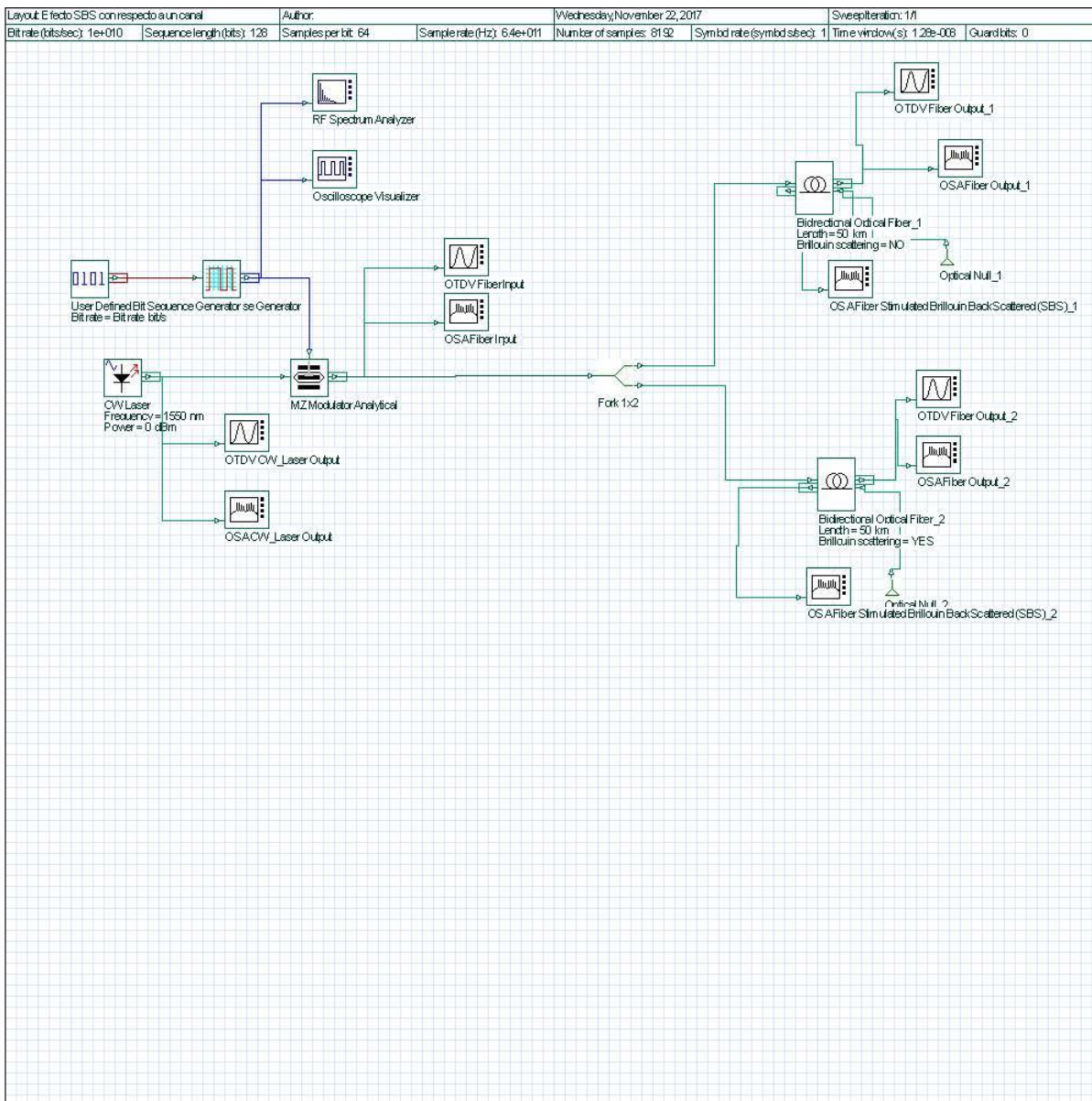
- Cajas, A. (2015). *Nuevas Tecnologías*. Obtenido de Fibra Óptica.  
<http://nuevatecnologias.awardspace.com/FIBRAOPTICA.html>
- Cervantes, C., Alonso, E., González Galindo, E., Mejía Olvera, A., Calderón, R., Helton, A., & Tapia Pérez, L. F. (2015). Análisis y factibilidad en la implementación de una red de acceso por fibra óptica (FTTH) para un desarrollo inmobiliario.
- Guano, H. A., Molina, P. C., & Jiménez, M. S. (2014). Estudio y Simulación de los efectos no lineales Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado de Raman (SRS) en una Fibra Óptica Monomodo. *Revista Politécnica*, 33(1).
- Sánchez Lara, R. (2015). Evaluación del impacto de efectos no-lineales en sistemas DWDM.
- Keiser, G. (1991). *Optical Fiber Communications*. Singapur. Mc,Graw Hill.
- Peñarredonda, D. A. B., Silva, I. D. T., & Mateus, E. A. (2010). Redes ópticas DWDM: diseño e implementación. *Visión electrónica*, 4(1), 70-80.
- Mendoza, Silva. (5 de abril del 2016). Fibra Óptica.  
<http://2016redes5cp2g7.blogspot.com/2016/04/cables-compuestos-de-forma-optica.html>.
- Perafán, J. G. L., Tovar, A. T., Ordóñez, H., & Agredo, J. P. (2011). Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una redWDM. *Facultad de Ingeniería*, 20(31), 23-35.
- Malcolm, N., y Zhao, W. (1995). Comunicación dura en tiempo real en redes de acceso múltiple. *Real-Time Systems*, 8 (1), 35-77.

- Peralta Sevilla, A., Tipán Simbaña, M., & Amaya Fernández, F. (2013). Análisis de los efectos dispersivos y no lineales en un canal óptico empleando métodos numéricos.
- Fernández, D. F. M., Toledo, J. A. R., & Tovar, A. T. (2012). Análisis de Desempeño de Diferentes Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la CD en Redes WDM. *Entre Ciencia e Ingeniería*, (11), 101-130.
- Alumnos del instituto 9 de Julio. (2012). *Tecnología de las telecomunicaciones 2012*. San Miguel de Tucumán, Argentina.  
<https://sites.google.com/site/teccomunic2012/com-opticas>.
- Universidad de Valladolid. (20/02/2008). Tutorial de comunicaciones ópticas. Valladolid, España.  
[http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema4/tema4\\_4.htm](http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema4/tema4_4.htm).

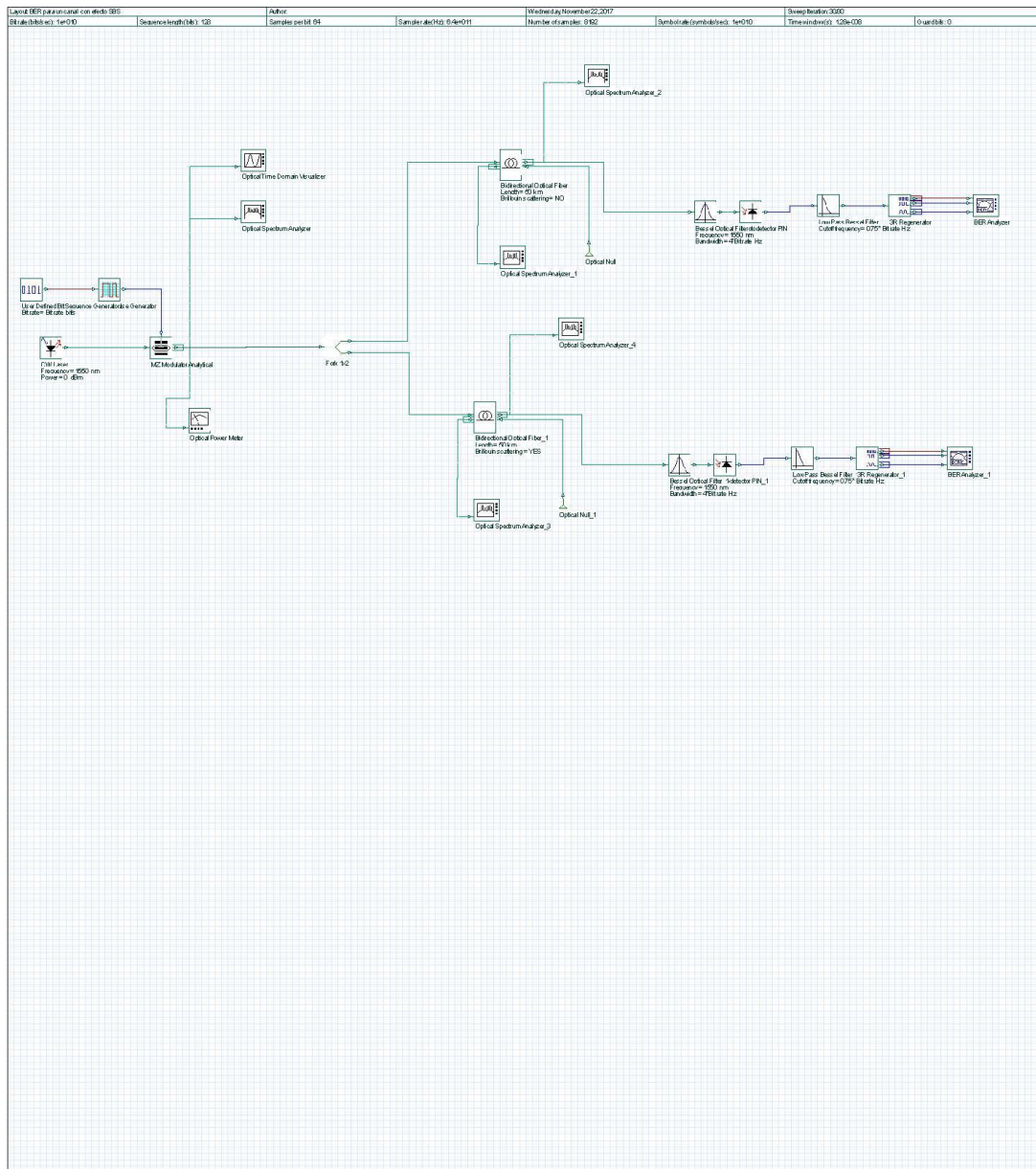
ANEXOS

# ANEXOS

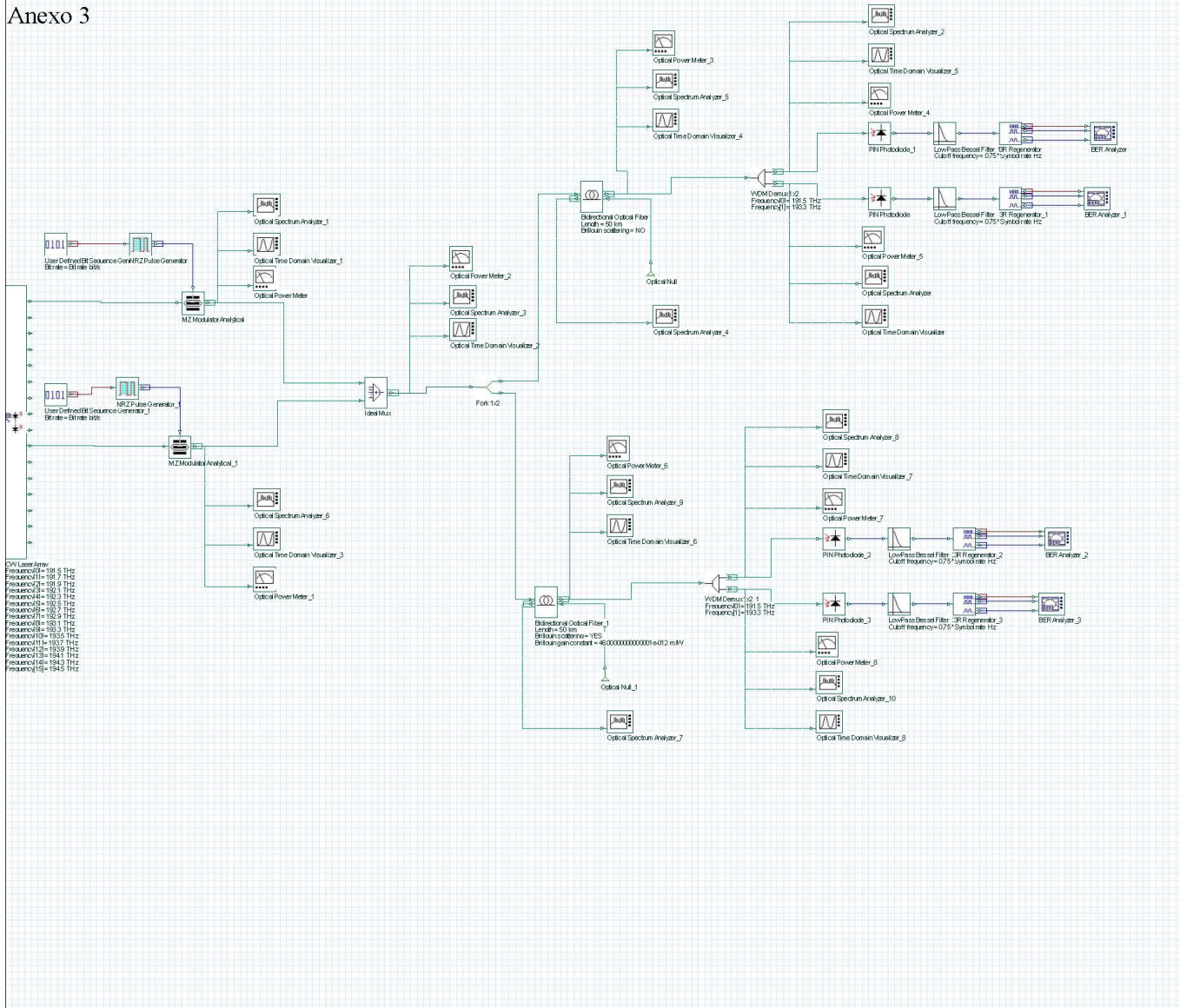
Anexo 1



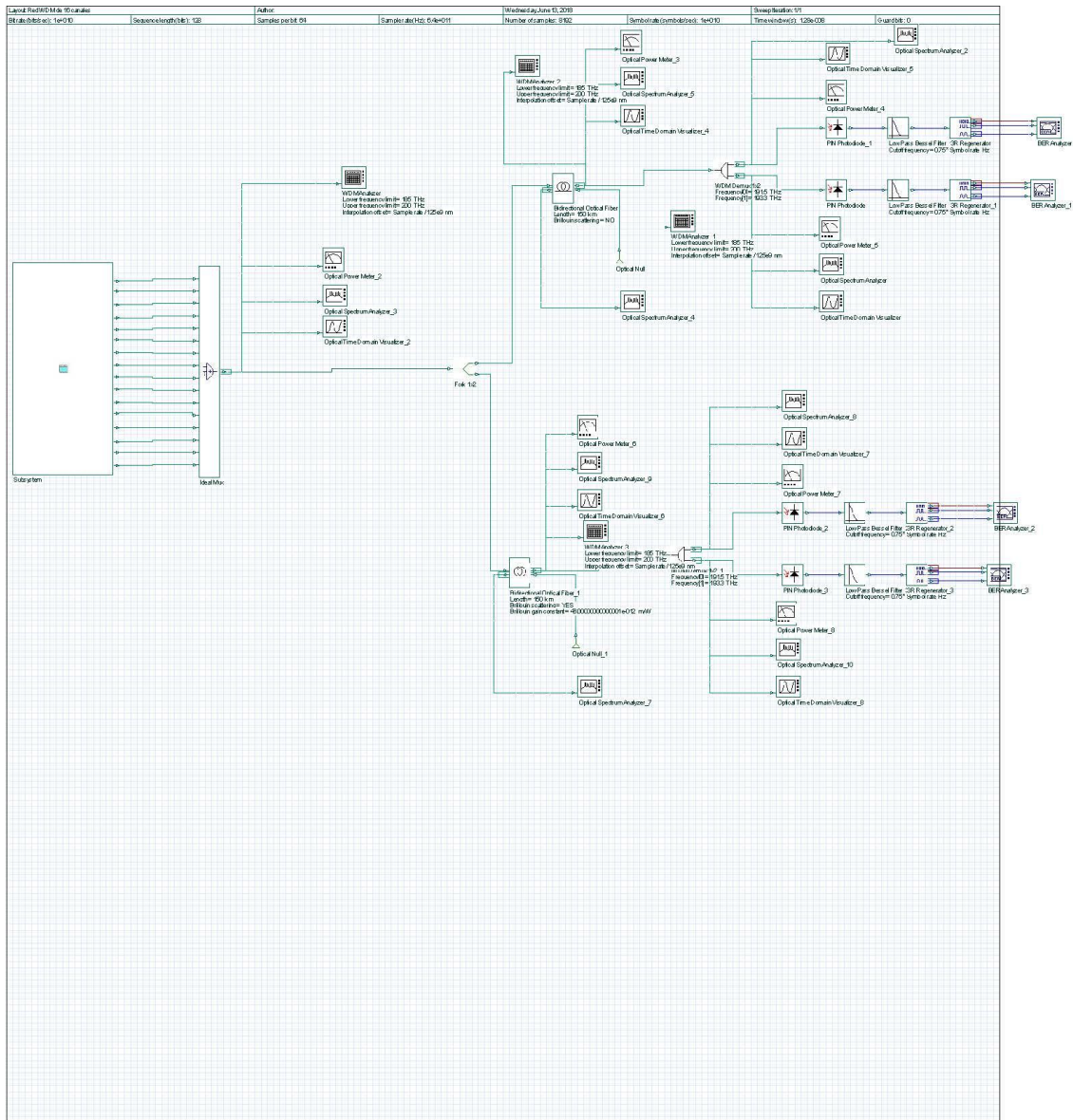




# Anexo 3



Anexo 4



NEXUS TECHNOLOGY S.A.C. – DISTRIBUIDOR MAYORISTA

# Especificaciones Técnicas

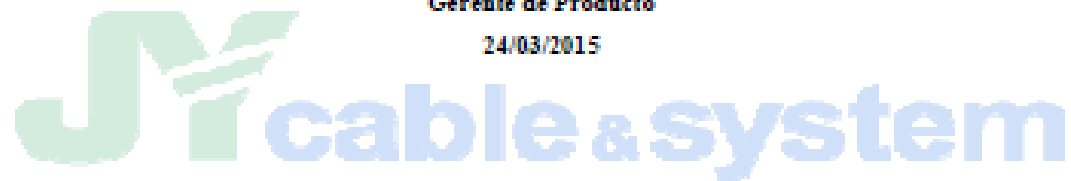
---

Fabricante: JY CABLE&SYSTEM

Producto: Cable Óptico ADSS P/N AD10-XXX-S.

Gerente de Producto

24/03/2015



**CABLE OPTICO tipo ADSS – origen: México**

- Fabricación con insumos nuevos no reciclados, bajo plan y control de calidad de manufactura ISO9001.
- Estándar de diseño ADSS IEEE P1222 v2011

**1. Diseño constructivo:**

- 1.01 *Chaqueta externa*<sup>1</sup> de polietileno de alta densidad (incluye negro de humo para protección UV), libre de deformaciones, erosiones, agujeros, desgarros o decoloraciones, espesor mínimo 1.2 mm.
- 1.02 Hilaturas de *aramidas*<sup>2</sup> como material de resistencia a la tensión axial, por debajo de la chaqueta externa.
- 1.03 *Cordón de rasgado*<sup>3</sup> axial de poliéster, por debajo de la chaqueta externa.
- 1.04 *Tubos holgados*<sup>4</sup> de PBT con diámetro externo de 2.1 mm, codificados por color TIA/EIA-598 dispuestos en sentido helicoidal alrededor del elemento central, con cambio de sentido alternado.
- 1.05 Código de colores de tubos holgados:

1	2	3	4	5	6	7	8
azul	naranja	verde	marrón	gris	blanco	rojo	negro

- 1.06 Dimensión y configuración del cable, peso y cargas máximas

NºFibras (OCN)	Total Elementos (tuberrelleno)	Diámetro (mm)	Peso (kg/km)	Tensión Máxima Permitida (N)	Tensión Máxima (N)
12	6 (2+4)	9.6 ± 0.4	70	1500	6000
24	6 (2+4)	9.6 ± 0.4	70	1500	6000
48	6 (4+2)	9.6 ± 0.4	70	1500	6000
96	8 (8+0)	10.9 ± 0.4	99	1500	6000

- 1.07 *Lámina* protectora de humedad alrededor del paquete de tubos holgados.
- 1.08 *Hilo* absorbente de humedad, paralelo y adyacente al elemento central.
- 1.09 Relleno de tubos holgados con *gel bloqueador de humedad*<sup>5</sup> inerte al ser humano, al material plástico del tubo y a las fibras ópticas, libre de impurezas, transparente, no nutritivo a los microorganismos y no conductor de electricidad, libre de gases.
- 1.10 *Elemento central* de plástico reforzado con fibra de vidrio para impedir el rizado del cable y mensajero dieléctrico incorporado.

## 2. Parámetros ópticos y geométricos:

Fibras ópticas monomodo UIT-T G.652D (SMF) para operar en todo el espectro 1260 hasta 1625 nm con pico de agua reducido o mejorado y longitud de onda, de dispersión cromática cero, alrededor de la región de los 1310 nm, optimizada para los 1310 nm pero que pueden emplearse en 1550 nm; para transmisión de señales analógicas o digitales.

Las fibras ópticas incluidas en esta especificación técnica están fabricadas con sílica sintética pura, mediante técnica de deposición de vapor químico modificado (MCVD).

Parámetros		UdM	Especificación	
Atenuación	1310 nm	dB/km	$\leq 0.35$	
	1550 nm		$\leq 0.25$	
Puntos de discontinuidad	1310 y 1550 nm	dB	$\leq 0.10$	
Diámetro de campo modal	1310 nm	$\mu\text{m}$	$9.2 \pm 0.4$	
	1550 nm		$10.4 \pm 0.5$	
Longitud de onda de corte ( $\lambda_c$ ) fibra en cable		nm	$\leq 1260$	
Dispersión	1285 – 1330 nm	ps/(nm.km)	$\leq 3.5$	
	1550 nm		$\leq 18.0$	
	Longitud de onda dispersión cero		nm	1302 - 1322
	Pendiente de dispersión cero		ps/(nm <sup>2</sup> .km)	$\leq 0.092$
Coefficiente de dispersión por modo de polarización (PMD <sub>o</sub> )	1550 nm	ps/km <sup>1/2</sup>	$\leq 0.1$	
Índice de refracción	1310 nm		1.4690	
	1550 nm		1.4695	
Diámetro de clad		$\mu\text{m}$	$125.0 \pm 1.0$	
No circularidad del clad		%	$\leq 1.0$	
Error de concentricidad (core/clad)		$\mu\text{m}$	$\leq 0.8$	
Diámetro del coating (sin color)		$\mu\text{m}$	$245 \pm 10$	
Nivel de prueba de tensión 1% en 1 sg.		GPa	$\geq 0.7$	
Macroflexión (100 vueltas mandril 75 mm) a 1550 nm		dB	$\leq 0.05$	

### 2.01 Código de colores de fibras ópticas

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
azul	naranja	verde	marrón	gris	blanco	rojo	negro	amarillo	violeta	roca	agua

### 3. Especificaciones ambientales y mecánicas<sup>ii</sup>

Prueba	Standard IEC	Método	Criterio de aceptación
Tensión	60794-1-E1	Máxima tensión permitida Muestra: 100 m cable Tiempo: 10 min	Cambio de atenuación: $\leq 0.1$ dB a 1550 nm luego de la prueba
Tensión máxima		Instalación (MAT)	1500 N
		Rotura (UT)	6000 N
Compresión	60794-1-E3	Carga: 2000 N Tiempo: 5 min Plancha de 100 x 100 mm	Cambio de atenuación: $\leq 0.1$ dB a 1550 nm luego de la prueba
Impacto	60794-1-E4	Energía de impacto: 2.94 J Puntos de impacto: 3 Intentos: 1	Cambio de atenuación: $\leq 0.1$ dB a 1550 nm luego de la prueba
Doblez repetido	60794-1-E6	Radio: 20 veces diámetro externo Muestra: 1 m cable con 150 N Intentos: 25	Cambio de atenuación: $\leq 0.1$ dB a 1550 nm luego de la prueba
Torsión	60794-1-E7	Muestra: 1 m cable con 50 N Intentos: 10 a 180°	Cambio de atenuación: $\leq 0.1$ dB a 1550 nm luego de la prueba
Doblez	60794-1-E11	Mandril: 20 veces diámetro externo Vueltas: 4 Intentos: 10	Cambio de atenuación: $\leq 0.1$ dB a 1550 nm luego de la prueba
Ciclo térmico	60794-1-F1	20°C a -40°C y 70°C a 20°C Periodo: 12 horas en cada paso	Cambio de atenuación: $\leq 0.1$ dB a 1550 nm luego de la prueba
Penetración de agua	60794-1-F3	Altura de agua: 1 m Muestra: 3 m cable Duración: 12 horas	No hay presencia de humedad al extremo de la muestra.
Radio de doblez	Operación	15 veces el diámetro externo	Sin cambio de atenuación
	Instalación	20 veces el diámetro externo	
Temperatura	Operación	-40 a 70 °C	Sin cambio de atenuación
	Instalación	-30 a 60 °C	
	Almacenamiento	-40 a 70 °C	

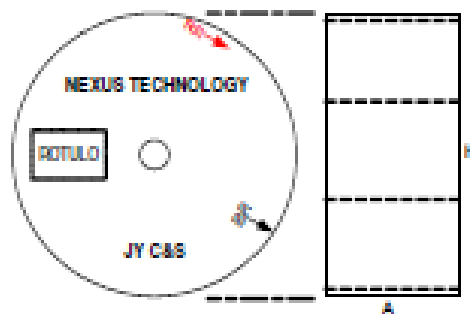
### 4. Presentación

- 4.01 Marcado secuencial sobre chaqueta externa en bajo relieve con impreso en color blanco<sup>iii</sup>, indicando marca del fabricante, año de fabricación, código del fabricante, tipo de cable, cantidad de fibras ópticas, metrado secuencial.

JY CABLE&SYSTEM | 2015 | AD10-048-S | ADSS 48 SMF G652D | 6 km | ---- 3788 |

La marca (ejemplo) indica el año de fabricación, código, tipo de cable cantidad de fibras, tipo de fibras: monomodo, tensión axial y metrado secuencial

- 4.02 Bobina sobre carrete<sup>™</sup> de madera<sup>™</sup>, extremo del cable visible y sellado contra humedad. Indicando marca del fabricante, identificación del carrete, peso bruto/neto, longitud de inicio/fin, código del fabricante, tipo de cable, sentido de giro, marca de término de bobinado.
- 4.03 El cable en bobina y su carrete correspondiente tendrá un peso de 578 kg para las versiones de 12 y 24 SMF, con H=1.40 m, A=0.70 m;
- 4.04 En el caso de la versión de 48 SMF, un peso de 596 kg, con H=1.40 m, A=0.70 m;
- 4.05 Y en la versión de 96 SMF, un peso de 782 kg, con H=1.50 m, A=0.70 m.



**Documentación incluida (archivo digital):**

Cada bobina probada en fábrica genera un archivo digital que consolida el reporte de inspección visual y pruebas ópticas de cada fibra óptica que se detallan a continuación.

Se asegura que todos los valores mostrados se encuentran por debajo de los parámetros de rendimiento mínimo ofrecido.

- 5.01 Reporte de atenuación kilométrica en triple ventana de operación 1310/1383/1550 nm.
- 5.02 Dispersión cromática en 1285-1330 y 1550 nm;
- 5.03 Longitud de onda de dispersión cero;
- 5.04 Pendiente de dispersión cromática;
- 5.05 Diámetro de campo modal en 1310/1550 nm;
- 5.06 Longitud de onda de corte en bobina;
- 5.07 No circularidad del clad;
- 5.08 Error de concentricidad entre el núcleo y el clad;
- 5.09 Coeficiente de dispersión por modo de polarización;



5.10 Índices de refracción en 1310/1550 nm;

5.11 Prueba de penetración de agua;

#### 5. Aplicación<sup>4</sup>

Instalación en postes (ejemplo demostrativo) de alumbrado público o línea eléctrica <115 kV, viento máximo  $\leq 60$  km/h, 0.0 mm hielo radial, flechado 1.1%, vano máximo  $\leq 100$  m.

Se pueden consultar otros parámetros de instalación.

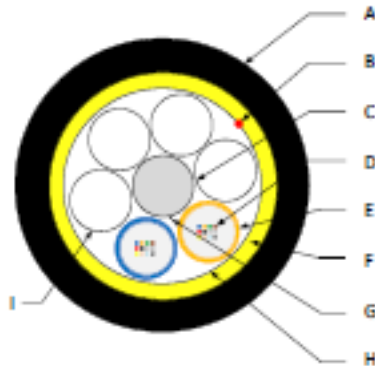
#### 6. Rendimiento

En función a los equipos electro-ópticos de los extremos, la fibra óptica incluida en el cable puede rendir

- a. IEEE P802.3ba 400 Gbps Ethernet (4x100) hasta 10 km preliminar sujeto a cambios.
- b. IEEE 802.3ba 100 Gbps Ethernet 100GBase-ER4 (4x25) hasta 40 km
- c. IEEE P802.3bm 40 Gbps Ethernet 40GBase-ER4 (4x10) hasta 40 km
- d. IEEE 802.3ae 10 Gbps Ethernet 10GBase-ER hasta 120 km
- e. IEEE 802.3z 1 Gbps Ethernet 1000Base-ZX hasta 200 km, previo análisis de presupuesto óptico en 1550 nm.
- f. RS232 / RS485 / RS422, hasta 80 km según presupuesto óptico.
- g. Video analógico, sobre 1 hilo, hasta 120 km según presupuesto óptico.
- h. SDH STM-256 (40 Gbps) hasta 80 km según presupuesto óptico.
- i. Aplicaciones CWDM (16 longitudes de onda) y DWDM (40 longitudes de onda) hasta 80 km.

**Diagrama de sección "AD10-024-S." (sin escala)**

- A. Chaqueta HDPE
- B. Cordón de rasgado
- C. Miembro central
- D. 12 SMF/tubo holgado (24 SMF total)
- E. 2 Tubos holgados
- F. Hilos de aramidas
- G. Hilo de absorción de humedad
- H. Lámina plástica
- I. Varillas helicoidales de relleno PE natural


**Código de Producto/Fabricación**

- AD10-012-S. = JPN-LT-AD100-SM12
- AD10-024-S. = JPN-LT-AD100-SM24
- AD10-048-S. = JPN-LT-AD100-SM48
- AD10-096-S. = JPN-LT-AD100-SM96

**JY CABLE&SYSTEM**, es marca registrada de [www.jyyoung.com](http://www.jyyoung.com), cuenta con planta de manufactura en Monterrey, Nuevo León, México y opera con insumos importados desde Corea del Sur y sistema de gestión de calidad ISO 9001. 20150526 v3.5

<sup>1</sup> Cubierta, chaqueta o jacket

<sup>2</sup> Yarns, de kevlar o heracros

<sup>3</sup> Ripcord

<sup>4</sup> Tubetes o loose tubes o buffers

<sup>5</sup> Water blocking gel

<sup>6</sup> Algunas de estas pruebas son de control de calidad rutinaria una vez al año en lotes de fabricación de distintos diseños similares razón por la cual solo se muestran para referencia, no se entregan con el producto.

<sup>7</sup> En caso de fallo de fábrica, se hace un segundo marcado correcto en amarillo o naranja en otra zona del cable.

<sup>8</sup> Si la cantidad de cable ordenada es múltiplo de 6 km, caso contrario el cliente debe ordenarlo por separado.

<sup>9</sup> Aprobada según estándar de calidad ISPM15 de control fito-sanitario internacional

<sup>10</sup> Al ser una familia de cables ADSS la instalación puede hacerse en distintos escenarios, teniendo la información completa de velocidad máxima de viento, capa de hielo radial, voltaje de línea eléctrica, flechado, temperatura ambiente y factor de seguridad podemos simular su comportamiento mecánico.

# Corning® SMF-28® Ultra 200 Optical Fiber

## Product Information



Leveraging Corning® SMF-28® Ultra optical fiber technology, Corning® SMF-28® Ultra 200 optical fiber is a full-spectrum fiber with a reduced coating diameter of 200 microns and enhanced optical bending performance compared to legacy single-mode fiber. This fiber features low attenuation, a 9.2 micron nominal mode-field diameter at 1310 nm, and is intended for use in miniaturized cabling applications. SMF-28® Ultra 200 fiber surpasses the requirements of ITU-T Recommendations G.657.A1 and G.652.D and is fully backwards compatible with legacy G.652 compliant fiber types.

### Optical Specifications

#### Maximum Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value* (dB/km)
1310	≤ 0.32
1383**	≤ 0.32
1490	≤ 0.21
1550	≤ 0.18
1625	≤ 0.20

\* Alternate attenuation offerings available upon request.  
 \*\* Attenuation values at this wavelength represent post-hydrogen aging performance.

#### Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1285 – 1330	1310	0.03
1525 – 1575	1550	0.02

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α.

#### Macrobend Loss

Mandrel Radius (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
10	1	1550	≤ 0.50
10	1	1625	≤ 1.5
15	10	1550	≤ 0.05
15	10	1625	≤ 0.30
25	100	1310, 1550, 1625	≤ 0.01

\* The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified radius.

#### Point Discontinuity

Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1310	≤ 0.05
1550	≤ 0.05

#### Cable Cutoff Wavelength (λ<sub>c</sub>)

λ<sub>c</sub> ≤ 1260 nm

#### Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD (μm)
1310	9.2 ± 0.4
1550	10.4 ± 0.5

#### Dispersion

Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm-km)]
1550	≤ 18.0
1625	≤ 22.0

Zero Dispersion Wavelength (λ<sub>0</sub>): 1304 nm ≤ λ<sub>0</sub> ≤ 1324 nm

Zero Dispersion Slope (S<sub>0</sub>): S<sub>0</sub> ≤ 0.092 ps/(nm<sup>2</sup>-km)

#### Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/√km)
PMD Link Design Value	≤ 0.04*
Maximum Individual Fiber PMD	≤ 0.1

\* Complies with IEC 60794-3: 2001, Section 5.5, Method 1, (m = 20, Q = 0.01%), September 2001.

The PMD link design value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD<sub>2</sub>). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled.

#### How to Order

Contact your sales representative, or call the Optical Fiber Customer Service Department. Ph: 1-607-248-2000 (U.S. and Canada) +44-1244-525-1310 (Europe) Email: [cofc@corning.com](mailto:cofc@corning.com) Please specify the fiber type, attenuation, and quantity when ordering.

## Dimensional Specifications

Glass Geometry		Coating Geometry	
Fiber Curl	$\geq 4.0$ m radius of curvature	Coating Diameter	$200 \pm 5 \mu\text{m}$
Cladding Diameter	$125.0 \pm 0.7 \mu\text{m}$	Coating-Cladding Concentricity	$\leq 10 \mu\text{m}$
Core-Clad Concentricity	$\leq 0.5 \mu\text{m}$		
Cladding Non-Circularity	$\leq 0.7\%$		

## Environmental Specifications

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation 1310 nm, 1550 nm, and 1625 nm (dB/km)
Temperature Dependence	-60°C to +85°C*	$\leq 0.05$
Temperature Humidity Cycling	-10°C to +85°C up to 98% RH	$\leq 0.05$
Water Immersion	23°C $\pm$ 2°C	$\leq 0.05$
Heat Aging	85°C $\pm$ 2°C	$\leq 0.05$
Damp Heat	85°C at 85% RH	$\leq 0.05$

\*Reference temperature = +23°C

Operating Temperature Range: -60°C to +85°C

## Mechanical Specifications

### Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile stress  $\geq 100$  kpsi (0.69 GPa).\*

\*Higher proof test levels available.

### Length

Fiber lengths available up to 50.4 km/spool.

## Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Core Diameter	8.2 $\mu\text{m}$
Numerical Aperture	0.14 NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm
Zero Dispersion Slope ( $S_{z0}$ )	0.088 ps/(nm <sup>2</sup> ·km)
Effective Group Index of Refraction ( $N_{eff}$ )	1310 nm: 1.4676 1550 nm: 1.4682
Fatigue Resistance Parameter ( $N_f$ )	20
Coating Strip Force	Dry: 0.5 lbs. (2N) Wet, 34-day room temperature: 0.5 lbs. (2N)
Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns Pulse Width)	1310 nm: -77dB 1550 nm: -82dB

CORNING

Corning Incorporated  
One Riverfront Plaza  
Corning, NY 14810 USA  
Ph: 607-386-2000 (US and Canada)  
+44-1564-125-120 (Europe)  
Email: [cofc@corning.com](mailto:cofc@corning.com)  
[www.corning.com/opticalfiber](http://www.corning.com/opticalfiber)

Corning and SMF-28 are registered trademarks  
of Corning Incorporated, Corning, NY  
© 2015 Corning Incorporated. All Rights Reserved.