

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
CARRERA PROFESIONAL DE ELECTRÓNICA



**“ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA LONGITUD DEL
ENLACE SOBRE LA INTERFERENCIA INTERSIMBÓLICA EN UN
SISTEMA ÓPTICO DWDM, MEDIANTE UNA HERRAMIENTA DE
SIMULACIÓN”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: DISEÑO, INTERCONEXIÓN Y GESTIÓN
DE REDES DE COMUNICACIÓN**

AUTORES:

Br. Eric Gerardo Pinedo Luján
Br. Luis Angel Ruiz Mejía

ASESOR:

Ing. Eduardo Cerna Sánchez

TRUJILLO - PERÚ
2017

ACREDITACIONES

“ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA LONGITUD DEL ENLACE SOBRE LA INTERFERENCIA INTERSIMBÓLICA EN UN SISTEMA ÓPTICO DWDM, MEDIANTE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN”

Elaborado por:

Br. Eric Gerardo Pinedo Luján

Br. Luis Angel Ruiz Mejía

Aprobado por:

Ing. FILIBERTO M. AZABACHE FERNÁNDEZ
PRESIDENTE
CIP N° 104175

Ing. LUIS E. ALVARADO RODRIGUEZ
SECRETARIO
CIP N° 149200

Ing. OVIDIO H. RAMOS ROJAS
VOCAL
CIP N°92622

Ing. EDUARDO CERNA SÁNCHEZ
ASESOR
CIP N° 80252

PRESENTACIÓN

Señores miembros del Jurado:

De conformidad y en cumplimiento de los requisitos estipulados en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego y el Reglamento Interno de la Carrera Profesional de Ingeniería Electrónica para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico, ponemos a vuestra disposición el presente Trabajo de Tesis titulado: **“ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA LONGITUD DEL ENLACE SOBRE LA INTERFERENCIA INTERSIMBÓLICA EN UN SISTEMA ÓPTICO DWDM, MEDIANTE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN”**.

Este trabajo, es el resultado de la aplicación de los conocimientos adquiridos en la formación profesional en la Universidad, excusándonos anticipadamente de los posibles errores involuntarios cometidos en su desarrollo.

Trujillo, Mayo del 2017

Br. Eric Gerardo Pinedo Luján

Br. Luis Angel Ruiz Mejía

DEDICATORIAS

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo siempre en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el período de estudio.

A mis padres, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por brindarme su apoyo incondicional y ánimos para salir adelante.

A quien se ganó mi corazón y siempre me inspiró y motivó a continuar. Por creer en mí y acompañarme en todo este camino.

A mis profesores, amigas, compañeros y en especial a mi asesor, el Ing. Eduardo Cerna, por brindarme de su experiencia y dedicación en el proceso de realizar esta tesis.

Eric Gerardo

A Dios, por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.

A mis padres por el apoyo incondicional en mi vida, ellos me enseñan día a día a salir adelante, defender mis ideales, y esforzarme para obtener aquello lo que anhelo.

A mis hermanos y amigos, que durante estos años de carrera han sabido apoyarme para continuar y nunca renunciar, gracias por su amor incondicional y por su ayuda.

A mi asesor, el Ing. Eduardo Cerna, por brindarme de su experiencia para el desarrollo de mi Tesis.

Luis Angel

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por habernos dado fuerzas y ganas de seguir superarnos profesionalmente para establecer objetivos, realizar metas y cumplir responsabilidades.

A la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo, por brindarnos los conocimientos necesarios para el desarrollo del Proyecto de Tesis y abrirnos el camino hacia el ámbito laboral.

A todos nuestros profesores universitarios de Ingeniería Electrónica, por brindarnos conocimientos en cada una de las materias tomadas para el desarrollo profesional.

A nuestros padres por enseñarnos que la mejor herencia es la educación, por sus consejos, valores, motivación y amor.

A nuestro asesor de tesis, el Ingeniero Eduardo Cerna Sánchez, por su confianza y apoyo en el transcurso de toda la investigación.

A todos Gracias

RESUMEN

El presente trabajo de investigación documenta un estudio de la influencia de la longitud del enlace de fibra óptica DWDM sobre los parámetros de interferencia intersimbólica denominados OSNR, Jitter, Factor Q, y BER mediante una herramienta de simulación. Los resultados obtenidos muestran una degradación de OSNR en los límites de umbral a la distancia 80 km, niveles de Jitter que no llegan al nivel de umbral de 20% de periodo de bit hasta los 100 km, valores de factor Q que llegan al umbral aproximadamente a los 90 km y niveles de error de bit (BER) que llegan al umbral de 10^{-12} a la distancia de 90 km. Los resultados de los parámetros son presentados a través de diagramas resultantes de simulación tales como diagramas o patrón de ojo, y tablas estadísticas con curvas de comparación. Se presenta al final de todo el documento las conclusiones y recomendaciones.

ABSTRACT

The present investigation documents a study of the influence of the length of the DWDM optical fiber link over the interconnected interference parameters OSNR, Jitter, Factor Q, and BER using a simulation tool. The results show a degradation of OSNR in the threshold limits at distance of 80 km, Jitter levels that do not reach the threshold level of 20% of the bit period until 100 km, values of factor Q reaching the threshold approximately at 90 km and bit error levels (BER) reaching the threshold of 10^{-12} at the distance of 90 km. The results of the parameters are presented through diagrams resulting from simulation stories such as eye pattern diagrams and statistical tables with comparison curves. It is presented at the end of the whole document, the conclusions and recommendations.

INDICE

	Pag.
ACREDITACIONES	i
PRESENTACIÓN	ii
DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
INDICE.....	viii
INDICE DE FIGURAS.....	xi
INDICE DE TABLAS	xiii
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Realidad problemática.....	2
1.2. Delimitación del problema.....	3
1.3. Características y análisis del problema.....	3
1.4. Formulación del problema.....	4
1.5. Formulación de la Hipótesis.....	5
1.6. Objetivo de la Investigación.....	5
1.6.1. Objetivo General.....	5
1.6.2. Objetivos Específicos.....	5
1.7. Justificación de la Investigación.....	5
1.7.1. Importancia de la investigación.....	5
1.7.2. Viabilidad de la investigación.....	6
1.8. Limitaciones del estudio.....	6
CAPITULO II MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes de la investigación.....	8
2.2. Bases teóricas.....	10
2.2.1. WDM.....	10
2.2.1.1. Tipos de WDM.....	13

2.2.1.2. Componentes Básicos.....	17
a. Fuentes ópticas.....	17
b. Multiplexores ópticos.....	17
c. Demultiplexores ópticos.....	17
d. Medio de transmisión.....	17
e. Acopladores.....	17
f. Amplificadores ópticos.....	17
g. Detectores.....	17
2.2.1.3. Fuentes ópticas.....	18
2.2.1.4. Parámetros fundamentales del transmisor.....	19
2.2.1.5. Multiplexor y demultiplexores ópticos.....	19
2.2.1.6. Medio de transmisión.....	20
2.2.1.7. Acopladores.....	21
2.2.1.8. Amplificadores.....	22
2.2.1.9. Detectores.....	24
2.2.2. Fibra Óptica.....	25
2.2.3. Dispersión Cromática.....	26
2.2.3.1. Dispersión Guía de Onda.....	28
2.2.3.2. Dispersión Material.....	29
2.2.4. Interferencia Intersimbólica.....	29
2.2.4.1. Diagrama de Ojo.....	30
2.2.4.1.1. Análisis de Parámetros de Ojo.....	34
a. Por las características de la Onda de Pulso.....	34
a.1. Nivel de 1 lógico.....	34
a.2. Nivel de 0 lógico.....	34
a.3. Cruce de Amplitud.....	35
a.4. Cruce de tiempo.....	35
a.5. Periodo de Bit.....	35
a.6. JITTER.....	35
b. Por comparación de máscaras.....	35

2.2.4.2. OSNR.....	36
2.2.4.3. BER.....	37
2.2.4.4. Factor Q.....	39
2.3. Definición de términos básicos.....	40
CAPÍTULO III MATERIAL Y MÉTODOS.....	43
3.1. Material.....	44
3.1.1. Población y muestra.....	44
3.1.2. Unidad de Análisis.....	44
3.2. Método.....	44
3.2.1. Tipo de investigación.....	44
3.2.2. Diseño de investigación.....	45
3.2.3. Variables de estudio y Operacionalización.....	45
3.2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	49
3.2.5. Técnicas de procesamiento de datos.....	58
CAPITULO IV RESULTADOS.....	74
4.1. Resultados.....	75
4.2. Discusión de resultados.....	76
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
5.1. Conclusiones.....	81
5.2. Recomendaciones.....	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
ANEXOS.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 2.1. Diagrama de tecnología WDM.....	11
Figura 2.2. Características a nivel físico de DWDM.....	15
Figura 2.3. Acoplador en derivación bicónico.....	22
Figura 2.4. Esquema de detección coherente.....	25
Figura 2.5. Efecto de dispersión cromática: amplificación del pulso y cierre del ojo.....	28
Figura 2.6. Interferencia en señal transmitida.....	30
Figura 2.7. Diagrama de ojo.....	31
Figura 2.8. Diagrama de ojo apertura.....	31
Figura 2.9. Enlace expuesto a ruido.....	32
Figura 2.10. Parámetros del Pulso.....	34
Figura 2.11. Característica de los parámetros de la onda de pulso.....	35
Figura 2.12. Máscara del diagrama de ojo para señales de Transmisión óptica.....	36
Figura 2.13. Figura de Ruido del sistema.....	37
Figura 2.14. Cálculo OSNR del diagrama de ojo.....	38
Figura 2.15. Fórmula Bit Error Rate, BER.....	38
Figura 2.16. Representación del ruido en la señal.....	40
Figura 3.1. Ejemplo de la relación óptica Señal a Ruido.....	52
Figura 3.2. Cálculo de OSNR diagrama de ojo.....	52
Figura 3.3. Jitter – Diagrama de Ojo.....	53
Figura 3.4. Medición de Jitter.....	54
Figura 3.5. Comportamiento del parámetro BER.....	55
Figura 3.6. Punto del BER máximo.....	56
Figura 3.7. Máximo Factor Q.....	57
Figura 3.8. Características de la simulación a nivel físico de DWDM.....	58
Figura 3.9. Diseño completo de la simulación.....	59
Figura 3.10. Fase de generación.....	61
Figura 3.11. Diseño del sistema de Multiplexación.....	62
Figura 3.12. Diseño del sistema de Demultiplexación.....	62

Figura 3.13. Parámetros principales de conexión fibra monomodo.....	63
Figura 3.14. Parámetros de Dispersión de conexión fibra monomodo.....	63
Figura 3.15. Hoja Técnica de Fibra monomodo subcategoría G.652B.....	64
Figura 3.16. Etapa de transducción de señal.....	65
Figura 3.17. Enlace 3R Regenerator y BER Analyzer.....	65
Figura 3.18. Curva de Tendencia Parámetro OSNR.....	69
Figura 3.19 (a). OSNR a 10 Km.....	69
Figura 3.19 (b). OSNR a 100 Km.....	69
Figura 3.20. Curva de Tendencia Parámetro Jitter.....	70
Figura 3.21 (a). Parámetro Jitter a 10 km.....	70
Figura 3.21 (b). Parámetro Jitter a 100 km.....	70
Figura 3.22. Curva de Tendencia Parámetro Factor Q.....	71
Figura 3.23 (a). Factor Q a 10km.....	71
Figura 3.23 (b). Factor Q a 100km.....	71
Figura 3.24. Curva de Tendencia Parámetro BER.....	72
Figura 3.25. Parámetro BER a 10 km a 193 THz.....	72
Figura 3.26. Parámetro BER a 100 km a 193 THz.....	73
Figura 4.1. Relación BER entre unidades de amplitud y probabilidad.....	76
Figura 4.2. Diagramas de ojo de con Longitudes de fibra óptica de 10; 40; 80 y 100 km.....	76
Figura 4.3. Comparación de las tendencias del parámetro OSNR de los reportes obtenidos del sistema DWDM y del sistema WDM de López, A. (2014).....	77

ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 2.1. Comparación de Tecnologías WDM.....	14
Tabla 2.2. Tabla de comparación CWDM / DWDM.....	16
Tabla 2.3. Características típicas de los amplificadores.....	23
Tabla 3.1. Operacionalización de la Variable Independiente.....	47
Tabla 3.2. Operacionalización de la Variable Dependiente.....	48
Tabla 3.3. Características principales del Optisystem 7.0.....	49
Tabla 3.4. Datos de parámetros ISI con longitud de enlace de 10 km.....	67

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Las redes de telecomunicaciones, con el paso de los años, cada vez soportan más tráfico de datos heterogéneos e impredecibles debido al desarrollo de nuevos servicios para el usuario, tales como el video bajo demanda o la telefonía IP, y de la creciente demanda de organizaciones en disponer de redes privadas virtuales (VPNs) para el tráfico de sus “datacenters”. Este hecho, junto con el aumento continuo de demanda de tráfico en la red, motiva una creciente preocupación por disponer de una red dinámica y flexible, capaz de adaptarse a los cambios en el flujo de datos y que además ofrezca un rendimiento alto de los medios desplegados. (López, A., 2014).

Las redes de transporte efectúan conmutaciones de circuitos mediante multiplexación de longitud de onda (WDM) ofreciendo altas velocidades de transmisión. Sin embargo, la naturaleza de WDM introducen una alta rigidez en la red, causando un bajo rendimiento del ancho de banda disponible y poca flexibilidad a la hora de reconfigurarse en función de las variaciones del tráfico, por lo cual es requerido el uso de un sistema más denso denominado DWDM, aumentando el ancho de banda de una fibra óptica mediante la multiplexación de varias longitudes de onda con mínimas separaciones entre ella, siendo actualmente la tecnología WDM más popular, ya que ofrece más capacidad de tráfico de datos. Según Laude (2002), señala que un sistema DWDM suministra espaciamientos de canales de 25 GHz (0,2 nm), 100 GHz (0,8 nm) o 200 GHz (1,6 nm), y se pueden colocar varios cientos de longitudes de onda en una sola fibra. La mayoría de los sistemas DWDM típicos utilizan 40 u 80 canales, aunque se puede alcanzar los 160 canales. (López, A., 2014).

Uno de los fenómenos más importante que ocurre por la gran longitud de los enlaces, lo cual caracteriza a estos enlaces de fibra óptica, es la aparición de la llamada interferencia intersimbólica (ISI). Según lo investigado, no se ha realizado estudios para poder estimar la influencia de la longitud de los enlaces sobre parámetros específicos de la ISI. López, A. (2014), realizó un estudio en el cual indicaba sobre la base de una herramienta de simulación que la influencia de la longitud del enlace sobre los parámetros de interferencia intersimbólica en un sistema WDM son

relevantes para el tráfico de datos, sin embargo la presente investigación se orienta a utilizar una herramienta de simulación con la finalidad de estimar la influencia de los enlaces sobre los parámetros ISI en un sistema DWDM.

1.2. Delimitación del problema

La presente investigación se delimita al análisis de la influencia de la longitud del enlace sobre la interferencia Intersimbólica en un sistema óptico DWDM, mediante una herramienta de simulación

1.3. Características y análisis del problema

- a. Fenómenos de propagación que influyen en la calidad de la señal recibida.
- b. Dificultad para un análisis experimental y teórico de las Interferencias intersimbólicas.

Análisis de características problemáticas

a. Fenómenos de propagación que influyen en la calidad de la señal recibida.

En los sistemas de multiplexación, las señales recibidas presentan diferentes parámetros que tienen relación a la ISI, los parámetros tomados en esta investigación son los relacionados con el error de bit, distorsión y retardo.

Una medida de rendimiento común para la fiabilidad de un enlace de comunicación es la probabilidad de cometer un error en la transmisión de información. Según Analui (2005), afirma que “estos errores o parámetros se calculan mediante la tasa de errores de bits (BER), que se define como la relación entre el número de errores y el número total de bits transmitidos. Una de las deficiencias primarias que causa errores en la comunicación es el ruido”.

El ruido es una señal no deseada que se mezcla en la transmisión que se quiere realizar y además es un componente relacionado con la distorsión.

La distorsión que produce el ruido en una determinada comunicación depende de su potencia, de su distribución espectral respecto al ancho de banda de la

señal, y de la propia naturaleza de información que transporta. Esta relación de señal y ruido se la define como SNR, que es la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido en un punto determinado en un canal de transmisión, además cuanto mayor es el valor de esta relación, mayor será la calidad de la señal recibida.

En lo referido a retardo podemos señalar que es la desviación no deseada de una señal periódica en un momento ideal. Este análisis se puede realizar en los diagrama de ojo, aquellos que se determinarán mediante las frecuencias asignadas para cada longitud de enlace definida.

b. Dificultad para un análisis experimental y teórico de las Interferencias Intersimbólicas

Para poder analizar los sistemas ópticos DWDM y poder llegar a una correcta interpretación de éstos mismos, se requiere de equipos muy sofisticados y de muy alto costo y siendo éste una realidad en que las empresas no darían acceso a sus instalaciones para poder realizar estas pruebas debido a la posibilidad de que sean perjudicadas sus implementaciones. Del mismo modo sería el análisis teórico de estas interferencias, usando los criterios de Nyquist podríamos llegar a solucionar y entender de una manera más profunda estas relaciones de interferencias pero debido a su complejidad, lo laborioso que es y su extenso desarrollo, tiende a ser muy difícil y tedioso debido al tiempo que tomaría poder abordarlo completamente. Por ello, se usará un software simulador de los enlace y del sistema óptico DWDM, simplificándolo así el trabajo y permitiendo un análisis más simple sin pérdida de resultados.

1.4. Formulación del problema

¿Cómo influye la longitud del enlace sobre los parámetros de Interferencia Intersimbólica en un sistema óptico DWDM simulado?

1.5. Formulación de la Hipótesis

Los parámetros de Interferencia Intersimbólica se degradan con la longitud del enlace al evaluarse con la simulación de un sistema óptico DWDM.

1.6. Objetivos de la Investigación

1.6.1. Objetivo General

Realizar una estimación de la influencia de la longitud del enlace sobre los parámetros de Interferencia Intersimbólica en un sistema óptico DWDM utilizando una herramienta de simulación.

1.6.2. Objetivos Específicos.

- Simular enlaces ópticos DWDM de diferente longitud.
- Estimar mediante la herramienta de simulación, los parámetros de Interferencia Intersimbólica DWDM resultantes del proceso de simulación.
- Comparar mediante un análisis de tendencia, los parámetros ISI resultante de la simulación versus la longitud del enlace óptico.

1.7. Justificación de la investigación

1.7.1. Importancia de la investigación

Desde el punto de vista académico, el presente trabajo servirá como antecedente para futuras investigaciones relacionadas con los sistemas DWDM, además permitirá realizar una simulación de Multiplexación por División en Longitudes de Onda, que ayudará a entender, conocer, y analizar

las influencias de las longitudes de fibra óptica referidos a las Interferencias Intersimbólicas y las relaciones de entrada y salida para diversas longitudes de fibra óptica.

1.7.2. Viabilidad de la investigación

La presente investigación es viable porque se cuenta con la información necesaria y con los recursos humanos, financieros, materiales, tiempo y conocimientos para desarrollar la presente investigación.

1.8. Limitaciones del estudio

La presente investigación está limitado a realizarse únicamente como simulación del sistema DWDM, ya que la oportunidad de trabajar con los equipos adecuados para poder analizar las Interferencias Inter-simbólicas es muy complicado debido al costo para obtenerlos o la dificultad de acceder a una central de acceso de fibra óptica para el estudio de éste mismo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Investigación

Análisis de Atenuación, Dispersión y Automodulación de Fase en Sistemas de Comunicaciones de Único Canal por Fibra Óptica a 10 Gb/s.

En un estudio realizado por el Ing. Andrés González García del Centro de Investigaciones Óptica A. C. en Mexico, 2007. Debido a la dificultad del tema y de no poder realizar un análisis experimental, éste estudio se tuvo que realizar mediante una simulación, basado en los efectos lineales y no-lineales de los parámetros mencionados en el título, en diferentes tipos de fibras ópticas utilizadas en sistemas de 10 Gb/s. Éste trabajo empleó el uso de modulos NRZ el cual presenta una mayor resistencia al ensanchamiento por dispersión cromática y a la Automodulación de Fase, y de las técnicas de compensación de dispersión, a través de fibras de compensación y mapas de dispersión.

Redes Roadm Como Futuro De Las Redes Dwdm En Guatemala.

Según el estudio realizado por Manolo Estuardo Chajon Mayén de la Universidad de San Carlos de Guatemala, 2015, da a conocer la solución que ofrecen las redes ROADM en las redes de transmisión óptica, en especial sobre las redes DWDM, presentando conceptos fundamentos de las telecomunicaciones ópticas, tipos de fibra óptica, dispersión y sistemas de transmisión. Se presenta el concepto de red jerárquica y los tipos de redes; tecnologías para aumentar la capacidad, tanto como los distintos tipos de multiplexación. Desarrolla conceptos sobre multiplexación por división de longitud de onda, conceptos generales y tipos. Se presenta el concepto de multiplexación por división de longitudes de ondas densas, entregando un alto margen de conceptos adecuados para las redes DWDM.

Análisis del Desempeño de Sistemas WDM utilizando formatos avanzados de modulación óptica a tasas superiores a 10 Gb/s. Según el estudio realizado por José Antonio Gama Benítez de la Universidad Autónoma de México en México en el año 2012; hace referencia a un estudio por medio de un avanzado sistema para simular enlaces ópticos en capa física además demuestra que los formatos modulados en fase, en especial los RZ-DPSK y RZ-DQPSK requieren una OSNR menor para alcanzar un BER dado. Por otro lado, según afirma José Gama, el formato duobinario es el que requiere mayor OSNR para cierto BER, además complementa afirmando que en la mayoría de los sistemas de comunicaciones ópticos usan fibras de sílice ya que pueden transmitir luz con pérdidas tan pequeñas como de 0.2 db/km, e incluso así la potencia de la señal se reduce a tan solo 1% después de 100 km.

Diseño, análisis y simulación de enlaces ópticos que utilizan Multiplexación por División en Longitudes de Ondas a través de la práctica de laboratorio.

Según el estudios realizados por Aniel López Pérez de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas en Cuba, 2014, explica su investigación mediante una simulación realizada acerca de las características principales del sistema óptico WDM, de los componentes básicos de un sistema de este tipo y de sus ventajas con respecto a otros sistemas de multiplexación tradicionales mediante diferentes experiencias con la fibra óptica referida a su tipo, longitud, codificaciones de línea y números de canales multiplexados; llegando así a una conclusión muy necesaria para esta investigación afirmando que el número de canales no interviene en una variación del factor de calidad, más bien sería por cuestión de costos de equipamiento para lograr un sistema lo suficientemente denso como se requiera.

Performance Analysis Of A DWDM Optical Transport Network With Crosstalk

Según el estudios realizados por Muntakim Hussain perteneciente a BRAC University de Bangladesh en el año 2010, nos informa que en su investigación se centró en los análisis de rendimiento de enlaces DWDM que son dañados por diafonía para el dispositivo óptico de conexión cruzada (OXC), siendo esta difonía la que se genera cuando un demultiplexor separa longitudes de onda entrantes en diferentes fibras de salida. OXC es un dispositivo que se utiliza para conmutar señales ópticas de alta velocidad. Mediante esta investigación se logró demostrar que cada deterioro ocasiona una penalización de potencia en el sistema. En presencia del deterioro, se necesita una potencia de señal más alta en el receptor para mantener una tasa de errores de bits (BER) deseada. Ésta penalización de potencia la definen como el aumento de potencia de señal requerida (en dB) para mantener el mismo BER en presencia de impedimentos.

2.2 Bases teóricas

2.2.1. WDM

La multiplexación por división de onda (WDM, Wave División Multiplexing) la multiplexación y la demultiplexación involucran señales luminosas transmitidas con longitudes de onda entre 1300 nm y los 1600 nm a través de canales de fibra óptica. La idea es combinar distintas señales sobre frecuencias diferentes. Sin embargo, la diferencia es que las frecuencias son muy altas.

El proceso del sistema WDM (Multiplexación por División de Longitud de Onda) es acoplar la luz de dos o más longitudes de onda discretas para que entre y salga de una fibra óptica. La tecnología WDM es un proceso en el que distintas fuentes de información (canales) se propagan por una fibra óptica a distintas longitudes de onda, que no interfieren entre sí en esencia, cada longitud de onda

forma un "carril" óptico de la supercarretera de transmisión, y mientras más carriles haya, se puede conducir más tráfico por un solo cable de fibra óptica. (Tomasi, 2003).

El mecanismo de WDM es una tecnología muy compleja, pero sin embargo la idea es muy simple. Se quiere combinar múltiples haces de luz dentro de una única luz en el multiplexor y hacer la operación inversa en el demultiplexor. Combinar y dividir haces de luz se resuelve fácilmente un prisma. Como la física básica que un prisma curva un rayo de luz basándose en el ángulo de incidencia y la frecuencia. Usando esta técnica, se puede hacer un multiplexor que combine distintos haces de luz de entrada, cada uno de los cuales contiene una banda estrecha de frecuencia, en un único haz de salida con una banda de frecuencia más ancha. También se puede hacer un demultiplexor para hacer la operación para revertir el proceso como se ve en la siguiente figura.

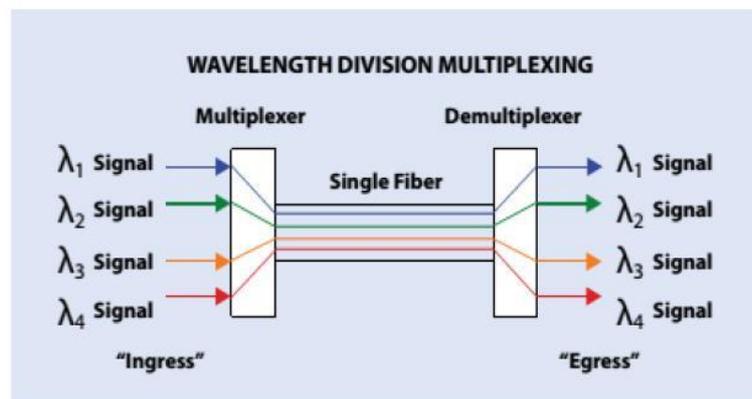


Figura 2.1: Diagrama de tecnología WDM
Fuente: López, A. (2014)

Los métodos tradicionales de multiplexación de señales sobre fibra óptica utilizando luz coherente son Multiplexación por División en la Frecuencia (Frequency Division Multiplexing, FDM) y Multiplexación por División el tiempo (Time Division Multiplexing, TDM).

Conceptualmente, esta forma de multiplexión es similar a FDM (Multiplexión por división de frecuencia), utilizada en sistemas satelitales y de microondas. Mientras que FDM consiste en transmitir varias señales

al mismo tiempo a través de un solo canal de banda ancha, modulando primero cada una de ellas en una subportadora distinta y, posteriormente, reuniéndolas para formar una sola señal, WDM reúne diferentes longitudes de onda para formar la señal que se transmitirá. De manera similar a otras formas de multiplexión, WDM requiere que cada longitud de onda sea debidamente espaciada de las demás, con el objeto de evitar la interferencia intercanal.

En cuanto a TDM lo esencial es incrementar la capacidad de la red añadiendo canales que subdividen aquellos que ya existían anteriormente, teniendo en cuenta el inconveniente de que el equipamiento requiere mayor costo y una alta complejidad en los protocolos de señal (Aguilera, 2012).

EN WDM transmite más señales por una misma fibra sin complicaciones de protocolos ni de tiempo. A cada canal en particular se le asigna una longitud de onda específica por medio de un convertidor electro-óptico, el cual convierte la señal eléctrica en la energía luminosa que se transmite por toda la fibra de forma simultánea. Esta asignación se encuentra estandarizada en las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones y cada canal puede transmitir señales de diferentes velocidades y formatos basándose en diferentes protocolos de comunicación como SONET/SDH, ATM, PDH e IP (ITU-T, 2002).

2.2.1.1. Tipos de WDM

Existen esencialmente tres tipos de WDM según López (2014) que se implementan según los requerimientos de la red que se desea diseñar. Estas variantes son:

- Multiplexación por División Aproximada de Longitudes de Onda (Coarse Wavelength Division Multiplexing, CWDM).

Los sistemas CWDM requieren de un espaciamiento entre longitudes de onda, mayor o igual a 20 [nm]. Esta holgura permite utilizar componentes de no tan alta precisión, lo que hace que este sistema sea bastante menos costoso que DWDM, al eliminar la necesidad de algunos componentes muy sofisticados y precisos. CWDM es una implementación de WDM para redes de corto y mediano alcance. Actualmente, CWDM puede operar con 8 longitudes de onda, cada una operando a un Bit Rate que va desde los 156 [Mbps] a los 10 [Gbps], logrando anchos de banda de hasta 100 [Gbps], utilizando múltiples longitudes de onda.

- *Multiplexación por División de Longitudes de Onda Densa (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM).*

Las principales ventajas que ofrece DWDM se enlistan a continuación:

- a. Aumenta dramáticamente la capacidad de un punto a otro de la red de fibra óptica, lo cual es considerado la aplicación clásica de DWDM. Esto se debe principalmente a la posibilidad de transmitir varias señales dentro de una sola señal y a las altas tasas de transmisión que soporta.
- b. Permite transportar cualquier formato de transmisión en cada canal óptico. Así, sin necesidad de utilizar una estructura común

para la transmisión de señales, es posible utilizar diferentes longitudes de onda para enviar información síncrona o asíncrona, analógica o digital, a través de la misma fibra.

- c. Permite utilizar la longitud de onda como una nueva dimensión, además del tiempo y el espacio, en el diseño de redes de comunicación.
- d. DWDM metropolitana
- e. DWDM de larga distancia.
- f. DWDM de ultra larga distancia.

➤ *Multiplexación por División de Longitudes de Onda Ultra densa (Ultra Dense Wavelength-Division Multiplexing, UDWDM).*

A continuación se hace presente una comparación de las tecnologías antes mencionadas.

Tabla 2.1. Comparación de Tecnologías WDM

Parámetros	Sistemas WDM			
	DWDM(ULD)	DWDM(LD)	Metro DWDM	CWDM
Estándar UIT-T	Recomendación G.694.1			G.694.2
Alcance (Km)	3000 a 12000	Hasta 3000	40 - 300	80
Velocidad máx. (Gb/s)	10	Hasta 40	Hasta 10	2.5
Bandas de trabajo	S, C y L (1450 a 1625)			O, E, S, C y L (1271 a 1611 nm)
Separación entre canales (nm)	0.20 (25 GHz) 0.4 (50 GHz) 0.8 (100 GHz)	0.4 (50 GHz) a 0.8 (100 GHz)	0.8 (100 GHz) 1.6 (200 GHz)	20 nm (2500 GHz)
Número de λ	Hasta 160	40- 160	16 - 80	18
Control de la estabilidad de la temperatura del láser	Celdas peltiers integradas en los módulos del encapsulado, termistor, fotodiodo PIN, circuito de control.			No poseen sistemas de enfriamiento
Amplificación óptica	EDFA+Raman	EDFA	EDFA	Ninguna

Fuente: Laude (2002)

DWDM es una tecnología que transmite varias longitudes de ondas de luz simultáneamente sobre una fibra óptica en forma paralela. Cada señal se transmite con su propia banda de color, de manera que se define una longitud de onda exclusiva para cada fuente de señal.

DWDM es una componente importante de las redes ópticas, que permite la transmisión de voz, video y datos (Voz sobre IP, Video IP, ATM), además de señales SDH a través de la capa óptica. Estos sistemas permiten la transmisión de decenas de Tbps.

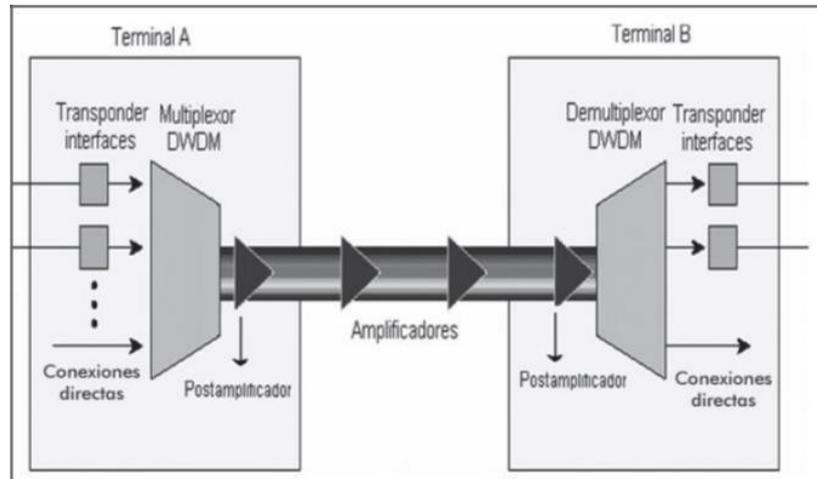


Figura 2.2: Características a nivel físico de DWDM
Fuente: *Buelvas (2009)*

A pesar de que DWDM se conoce hace mucho tiempo, al inicio, sus aplicaciones estuvieron restringidas a dos o cuatro canales como máximo (WDM). Actualmente los avances tecnológicos permiten que longitudes de ondas de luz paralelas puedan ser densamente empaquetadas e integradas en un sistema de transmisión con señales de extrema alta frecuencia. Los espaciamientos actualmente utilizados son de 200 GHz para aplicaciones metropolitanas y de 100 GHz para otro tipo de redes.

El medio más común utilizado por DWDM es un par de fibras ópticas; una para transmisión y la otra para la recepción. Sin embargo, existen sistemas DWDM que utilizan una fibra bidireccional, pero estos, sacrifican capacidad al reservar una banda para prevenir la mezcla de las señales de entrada y de salida.

La disponibilidad de tecnologías más maduras, en demultiplexores y Amplificadores de Fibra Óptica Dopada con Erbio EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA) ha permitido que más de treinta canales puedan estar disponibles en forma comercial. Los demultiplexores utilizan un nuevo componente de filtro llamado Fiber Grating, que consiste en un tramo de fibra óptica donde el índice de refracción ha sido permanentemente modificado. Esto ha permitido la creación de un componente, que permite actuar como reflector dependiente de las longitudes de onda. El Fiber Grating crea un filtro de ancho de banda que funciona como un espejo para las longitudes de onda.

Los amplificadores EDFA, al igual que los demultiplexores, han permitido el desarrollo comercial de DWDM, proporcionando un medio para la amplificación de longitudes de onda en forma simultánea. Esta amplificación se realiza agregando iones de erbio a una fibra, proceso llamado doping. La estructura atómica del erbio permite la amplificación requerida para longitudes de onda que operan en la región de 1550 nm. El EDFA directamente amplifica las señales ópticas y no depende de las frecuencias, por tanto, tiene la ventaja de que no es necesario regenerar la señal, permitiendo alcanzar distancias mayores sin regeneración eléctrica de la señal.

Tabla 2.2. Tabla de comparación CWDM / DWDM

CWDM	DWDM
Definido por Longitudes de Onda	Definido por Frecuencias
Corta Distancia de Transmisión	Largas Distancias de Transmisión
Usa amplios rangos entre frecuencias	Estrechas frecuencias
Longitudes de Onda de propagación lejana	Angostas Longitudes de Onda
Desvío de Longitud de Onda posible	Es necesario Láseres de mucha precisión para mantener los canales en el punto
Espectro en dividido en grandes proporciones	Espectro dividido en pequeñas piezas
La Señal de Luz no es amplificada	Tal vez necesario amplificar la señal

Fuente: Elaboración propia

2.2.1.2. Componentes básicos

La calidad de la multiplexación por división en longitudes de onda depende mucho de la tecnología de dispositivos ópticos que se utilicen. Este tipo de sistemas básicamente se forma con:

- a) **Fuentes ópticas:** Convierten la señal eléctrica en energía luminosa y la emiten con diferentes longitudes de onda.
- b) **Multiplexores ópticos:** Combinan la energía luminosa emitida por las fuentes ópticas.
- c) **Demultiplexores ópticos:** Dispositivo que separa la longitud de onda de cada canal .Tipos de multiplexores/demultiplexores:
 - a. Los de rejilla de difracción.
 - b. Los de filtros de interferencia.
 - c. Los de prisma.
- d) **Medio de transmisión:** El medio utilizado es la fibra óptica que lleva la información hasta el receptor
- e) **Acopladores:** Dispositivos que combinan la luz en una fibra, o la separan de esta.
- f) **Amplificadores ópticos:** Incrementan la potencia de la señal óptica
- g) **Detectores:** Convierten la señal óptica de nuevo al dominio eléctrico y recuperan los datos que son transmitidos a través del sistema de comunicaciones ópticas.

Las características principales que deben tener estos componentes son: bajas pérdidas de inserción, baja diafonía, facilidad de conexión,

fácil adaptación de conectores para lograr una transmisión directa, tamaño pequeño, alta confiabilidad.

2.2.1.3. Fuentes ópticas

El diodo láser es un dispositivo semiconductor similar a los diodos LED pero que bajo las condiciones adecuadas emite luz láser. Estas fuentes ópticas tienen además la ventaja de que introduciendo impurezas o dopantes, se puede modificar la frecuencia de emisión. El compuesto más utilizado en el rango de longitudes de onda de 1,1 a 1,6 μm , es el InGaAsP.

-Los diodos láser tienen como valores típicos, una potencia de salida de 20 mW, frecuencia de modulación de 10 GHz y anchura espectral de 0,7 nm. Por ser fuentes de luz coherentes, son necesarios para la utilización de detectores coherentes, los cuales dan lugar a una mejora de la sensibilidad y selectividad del sistema. Son utilizados en las fibras multimodo.

-Los fotodiodos emisores de luz se caracterizan por una potencia de salida de 1mW, frecuencia de modulación de 50 GHz y anchura espectral de 50 nm. Son siempre utilizados en fibras monomodo (Agraval, 1995). Son más baratos que los LED y su tiempo de vida operativa es mayor. Los LED más utilizados son los de emisión superficial, que con un correcto diseño pueden utilizarse en sistemas de hasta 500 Mb/s, a costa de perder potencia de emisión. Los LED de emisión lateral, suponen una mejora de prestaciones, aumentando la potencia acoplada a la fibra y una reducción de la anchura espectral, presentando sin embargo inconvenientes como la complejidad de fabricación y alimentación de los diodos láser.

2.2.1.4. Parámetros fundamentales del transmisor

Es necesario citar los parámetros más importantes del transmisor con el objetivo de escoger el que mejor se ajuste a las necesidades del diseño que se requiera implementar.

- Potencia máxima emitida. La potencia que emite la fuente óptica del transmisor.
- Máxima razón de datos o ancho de banda. La máxima razón de transmisión en bps o la máxima respuesta de frecuencia en Hz.
- Tiempo de subida:
 - Tiempo de subida óptico. Tiempo que demora el pulso de la señal luminosa en alcanzar del 20% el 80% del valor correspondiente a su amplitud máxima.
 - Tiempo de subida eléctrico. Tiempo que demora el pulso de la señal eléctrica en alcanzar del 10% el 90% del valor correspondiente a su amplitud máxima.
- Tipo de conector. Eléctrico y óptico; especificar el nivel de atenuación que se introduce.
- Tipo de la señal de código. Se refiere al tipo de formato de la señal: RZ, NRZ, código Manchester o MBNB, etc.
- Retardo. Tiempo que tarda la señal en el transmisor en nanosegundos.
- Fuente de alimentación. Voltaje requerido para alimentar el transmisor.

2.2.1.5. Multiplexores y demultiplexores ópticos

En WDM son necesarios dispositivos eficaces para introducir por la fibra las distintas longitudes de onda que provienen de las fuentes de luz y los demultiplexores son los que discriminan las diferentes longitudes de onda que provienen del haz multiplexado previamente. En la práctica la

demultiplexación se realiza antes de la detección de la luz debido a que los fotodetectores son de banda ancha y no pueden reconocer una sola λ . Los multiplexores y los demultiplexores pueden ser de diseño pasivo o activo. El diseño pasivo se basa en prismas, rejillas de difracción, o filtros mientras que el diseño activo combina dispositivos pasivos y filtros sintonizables. Los principales retos en estos dispositivos son minimizar la diafonía y maximizar la separación de cada canal. La diafonía es una medida de cuánto están separados los canales, mientras que la separación de canales se refiere a la posibilidad de distinguir cada longitud de onda (Cisco, 2001).

2.2.1.6. Medio de transmisión

En sistemas WDM el medio de transmisión principal utilizado es la fibra óptica la cual se encarga de guiar, conducir, entregar la señal transmitida de datos cuya información está contenida en la señal luminosa que viaja a través de la fibra al receptor donde se realiza la detección de la información contenida en el mensaje proveniente del emisor. Esta señal luminosa debe ser guiada hasta el receptor con la atenuación mínima posible de forma tal que las pérdidas de información también sean mínimas o que la probabilidad de error de bits de la señal recibida con respecto a la transmitida sea la menor posible.

Para seleccionar una fibra adecuada donde se pretende utilizar WDM se requiere que la fibra sea compatible con todas las λ utilizadas en la red y con el propio sistema WDM en la región de 1550 nm.

En la selección de la fibra se evalúan diversos factores. Los tres efectos más importantes son la atenuación, la dispersión y la no linealidad.

2.2.1.7. Acopladores

El término acoplador abarca todos los dispositivos que combinan la luz en una fibra, o bien la separan de ésta. Un divisor es un acoplador que divide la señal óptica procedente de una fibra en dos o más fibras.

La razón de división es el porcentaje de la potencia que viaja por cada una de las salidas. Para un divisor de dos puertos, la razón de división más común es 50:50, aunque pueden ser fabricados divisores de cualquier razón.

Un combinador es el dispositivo inverso del divisor. Una señal de entrada al combinador sufre una pérdida de alrededor de 3 dB de potencia. Un acoplador 2×2 , en general, está constituido por un combinador 2×1 seguido por un divisor 1×2 , cuyo efecto es dispersar las señales desde las dos fibras de entrada a las dos fibras de salida. Una implementación típica, es el acoplador en derivación biconica fusionada, que consiste básicamente en dos fibras ópticas o guías rectangulares fusionadas. Además de la división de potencia 50:50 en el acoplador, la señal experimenta ciertas pérdidas de retorno. Si la señal entra por una entrada del acoplador, alrededor de la mitad de la potencia de la señal va por cada una de las salidas. Sin embargo, una cantidad de potencia es devuelta por el acoplador, típicamente entre 40 y 50 dB. Otro tipo de pérdidas son las de inserción, que ocurre, por ejemplo, cuando los ejes del núcleo de la fibra y del acoplador no están alineados.

Los acopladores englobados en una configuración Mach-Zehnder, han sido muy utilizados en tecnologías comerciales como dispositivos de multiplexación en longitud de onda. Estos dispositivos de multiplexación, al igual que los basados en rejillas de Bragg, son más baratos que otras tecnologías propuestas y son más fáciles de mejorar en cuanto a incrementos en el número de canales a multiplexar, porque emplean el mismo tipo de bloques para 4, 8, 16 y 32 canales. (Agrawal, 1992)

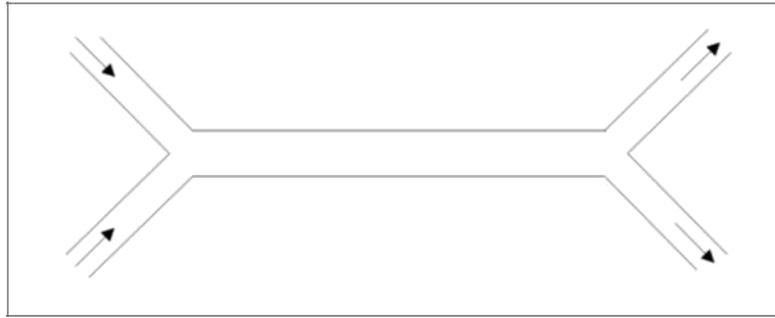


Figura 2.3: Acoplador en derivación bicónico

Fuente: Agraval (1992).

2.2.1.8. Amplificadores

Los amplificadores ópticos difieren de los amplificadores optoelectrónicos en que sólo actúan elevando la potencia de la señal, no reconstruyendo su forma temporal. De este modo, la amplificación óptica supone una total transparencia de los datos, es decir, es independiente del formato de modulación de la señal.

Las redes digitales actuales, como por ejemplo SONET y SDH, aunque utilizan la fibra óptica como único medio de transmisión, todavía se basan en amplificación optoelectrónica. En ésta se detecta la señal luminosa para convertirla en corriente eléctrica, amplificándola por vía electrónica y luego, con esta corriente amplificada y filtrada, se modula un láser y se introduce la señal de nuevo en la fibra.

En un sistema WDM, cada longitud de onda necesitaría ser separada antes de ser amplificada electrónicamente, y después recombinada antes de ser retransmitida. Así, para eliminar la necesidad de multiplexores y demultiplexores ópticos en los amplificadores, los amplificadores ópticos deben regenerar la señal óptica sin convertirla previamente en una señal eléctrica. Además, gracias a su alta ganancia y potencia de salida, se consigue duplicar o triplicar la distancia óptima entre repetidores eléctricos. La desventaja es clara: se amplifica el ruido además de la señal, degradándose la relación señal a ruido en el receptor.

Los amplificadores ópticos utilizan el principio de la emisión estimulada. Los dos tipos básicos de amplificadores ópticos son los amplificadores láser semiconductores y los amplificadores dopados con tierras raras, que serán presentados a continuación. Las características más relevantes de estos amplificadores

Tabla 2.3: Características típicas de los amplificadores

Tipo de amplificador	Región de ganancia	Ancho de banda de ganancia	Ganancia
Semiconductor	cualquiera	40 nm	25 dB
EDFA	1.525-1560 nm	35 nm	25-51 dB
PDFFA	1.280-1.330 nm	50 nm	20-40 dB

Fuente: Millan, R. (1998).

Un amplificador de semiconductor láser consiste en un láser semiconductor modificado. Una señal débil es enviada a través de la región activa del semiconductor, que vía emisión estimulada, resulta en la emisión desde el semiconductor de una señal más potente.

Las ganancias que consiguen los amplificadores de semiconductor actuales son de alrededor de 25 dB, con una saturación de ganancia de 10 dBm. Tienen una sensibilidad a la polarización de 1 dB, y un ancho de banda de alrededor de 40 nm. La gran ventaja de estos amplificadores es que pueden integrarse con otros componentes.

Las limitaciones de la amplificación óptica son: el espectro de ganancias asimétrico de los amplificadores ópticos, es decir, no se amplifican todas las longitudes de onda por igual, y se amplifica por igual tanto señal como ruido. Además, la región activa del amplificador puede emitir fotones espontáneamente, lo cual constituye una fuente de ruido adicional. En definitiva, una señal óptica de múltiples longitudes de onda atravesando una serie de amplificadores ópticos, tendrá la potencia distribuida entre sus diferentes longitudes de onda, desequilibrándose progresivamente.

2.2.1.9. Detectores

La misión de un receptor óptico es convertir la señal óptica de nuevo al dominio eléctrico y recuperar los datos que son transmitidos a través del sistema de comunicaciones ópticas. Se distinguen dos tipos de detectores dependiendo de la naturaleza de la modulación de la señal óptica: los detectores incoherentes y los detectores coherentes.

En los receptores que emplean detección directa, o detectores incoherentes, un fotodetector convierte el haz de fotones que le llega, modulado en intensidad, en un haz de electrones. El haz de electrones es amplificado y pasa a través de un detector de umbral. El que un bit sea un cero lógico o un uno, depende de si el haz está por debajo o encima del umbral en el tiempo de duración de ese bit. Es decir, la decisión se hace en función de la ausencia o presencia de luz durante el tiempo de bit.

Los dispositivos básicos para la detección óptica son los fotodiodos PN (consistentes en una unión p-n) y el fotodiodo PIN (donde un material intrínseco se ubica entre las regiones p y n del material). En su forma más simple, el fotodiodo es básicamente una unión p-n en inversa. A través del efecto fotoeléctrico, la luz incidente en la unión originará la emisión de pares electrón-hueco tanto en las regiones n como la p del fotodiodo. Los electrones creados en la región p se dirigirán a la región n, y los huecos de la región n cruzarán ésta hasta la p, resultando en un flujo de corriente.

La detección coherente es más compleja que la detección directa, permite la detección de señales débiles de un entorno ruidoso. En los sistemas ópticos, sin embargo, es difícil mantener la información de fase requerida para la detección coherente. Puesto que los láseres emiten varias pequeñas bandas espectrales no nulas, la señal transmitida consiste en un número de frecuencias con fases y amplitudes variables. El efecto, es que la fase de la señal transmitida experimenta aleatorias y significativas fluctuaciones en torno a la fase deseada. Estas fluctuaciones de fase dificultan la reconstrucción de la información de fase a partir de la señal transmitida,

limitando así la eficiencia de los sistemas de detección coherente, en la **figura 2.4** encontramos el esquema de detección coherente.

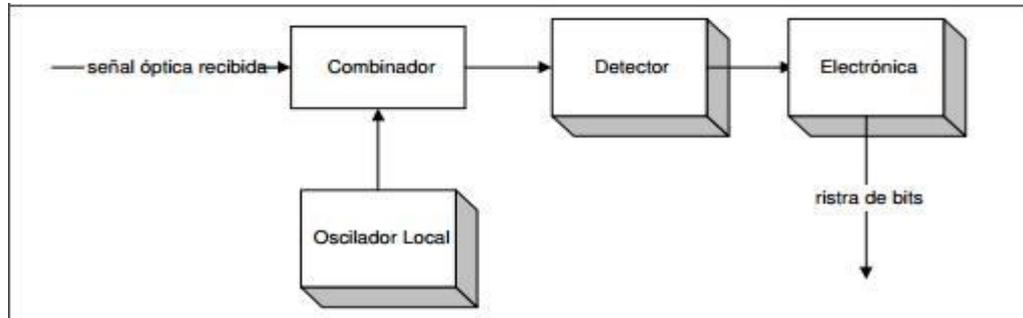


Figura 2.4: Esquema de detección coherente

Fuente: Millan, R. (1998).

2.2.2. Fibra Óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión, empleado habitualmente en redes de datos y telecomunicaciones, consiste en un hilo muy fino de material transparente, vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir.

La fibra óptica se ha convertido en el medio de transmisión más atractivo debido a sus cualidades:

- Bajas pérdidas de transmisión y alto ancho de banda. Mientras que parece que no puede rebasarse la capacidad de 1 GHz en el cable coaxial, a través de fibra óptica se podrán llegar a transmitir más de 1 THz, en caso de que la tecnología llegue a proporcionar detectores suficientemente rápidos.
- La baja atenuación de la señal es otra ventaja, consiguiendo distancias entre repetidores superiores a 100 Km en tercera ventana. Las tasas de error de los sistemas de comunicaciones ópticas son menores de 10^{-17} . Por lo tanto, el cable de fibras ópticas puede transportar más datos en mayores distancias, reduciendo el número de equipos, complejidad y coste del sistema.

- Pequeño tamaño y peso. Lo cual facilita la instalación y transporte, frente a los gruesos y pesados cables coaxiales.
- Inmunidad a interferencias. Las fibras ópticas, por su naturaleza dieléctrica, son insensibles a interferencias electromagnéticas.
- Aislamiento eléctrico. Puesto que las fibras ópticas se construyen a partir de silicio, que es un aislante eléctrico, no hay que preocuparse con llevarlos a tierra o por la diafonía eléctrica.
- Seguridad de la señal. La fibra óptica supone una mayor seguridad ante ataques de intrusos en busca de la información transmitida, pues la señal óptica queda muy bien confinada en las guías de ondas, y las pequeñas emanaciones son rápidamente absorbidas por un recubrimiento opaco alrededor de la fibra.
- Abundante presencia de los materiales en la naturaleza. El Silicio, material que principalmente constituye las fibras ópticas, es muy abundante y barato, ya que se encuentra en la arena ordinaria. Lo que si resulta caro es el proceso de purificación de dicho semiconductor.

Posibilidad de integración. Se están consiguiendo grandes avances en la integración óptica, miniaturizando todos los componentes que componen el sistema de transmisión, e insertarlos en un chip o pastilla de alrededor de 1 cm^2 de un material adecuado.

2.2.3. Dispersión Cromática

Los dos efectos lineales más importantes que rigen la propagación de la señal en una fibra óptica del tipo monomodo son la atenuación y la dispersión cromática, Gualda (2000), afirma que:

La magnitud de ambos efectos depende de la longitud de onda de la señal y determinan de manera importante las características de

la propagación. La elección de la longitud de onda, o longitudes de onda, centrales de trabajo está estrechamente relacionada con estos dos efectos lineales. Las fibras ópticas utilizadas actualmente, especialmente en sistemas de larga distancia, presentan mínimos de la atenuación en la banda de frecuencias alrededor de 1550 nm, y se diseñan con un perfil de índice adecuado para controlar la dispersión cromática de la fibra.
(p. 29).

La dispersión cromática es uno de los factores determinantes de la degradación de las señales que se han presentado en las áreas de las telecomunicaciones basadas en fibra óptica. En esta investigación se presenta un análisis del efecto de la dependencia del índice de refracción del material constitutivo de una fibra, con la frecuencia de la señal óptica. Ésta dispersión elementalmente del modo y los materiales con que fueron fabricados la fibra óptica, y por lo general son dos tipos de fuentes que nos llevan a esta dispersión: la dispersión debida al material y la dispersión debida a la guía de onda.

La dispersión debida al material proviene de la dependencia en frecuencia que hay en la respuesta de los materiales con respecto a ondas. La dispersión debida a la guía de onda ocurre cuando la velocidad de una onda en una guía de onda depende de su frecuencia debido a razones geométricas, independientemente de cualquier dependencia en frecuencia de los materiales con los cuales se fabrica. (Ayala, 2011, p. 23).

De manera más específica, la dispersión debida a la guía de onda puede ocurrir para ondas proyectándose a través de cualquier estructura no homogénea, no importando si las ondas están siendo ubicadas en la misma región. La combinación de estas dos fuentes con llevan a la degradación de la señal en fibras ópticas utilizadas en telecomunicaciones.

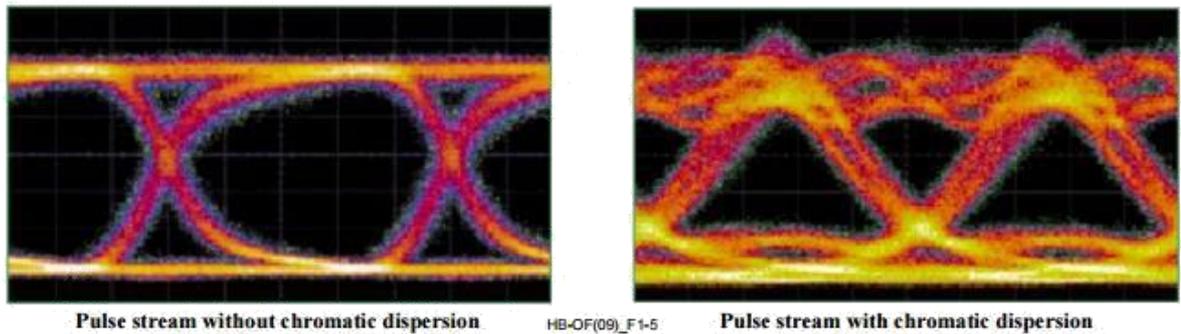


Figura 2.5: Efecto de dispersión cromática: amplificación del pulso y cierre del ojo.

Fuente: Optical fibres, cables and systems, ITU (2009)

2.2.3.1. Dispersión Guía de Onda

Para comprender esta componente hay que recordar que la potencia de un modo se propaga parcialmente por el núcleo y parcialmente por el revestimiento.

El índice efectivo de un modo se sitúa entre el índice de refracción del núcleo y del revestimiento, acercándose más a uno u otro dependiendo de cuál sea el porcentaje de la potencia que se propaga por ellos (si la mayor parte de la potencia está contenida en el núcleo, el índice efectivo estará más cerca del índice de refracción del núcleo). Como la distribución de la potencia de un modo entre el núcleo y el revestimiento depende de la longitud de onda, si la longitud de onda cambia, la distribución de potencia también cambia, provocando un cambio en el índice efectivo o constante de propagación del modo. (Gonzales, 2007, p.14).

2.2.3.2. Dispersión Material

Es el principal causante de la dispersión, según Gonzales (2007), afirma que:

Ésta dispersión consiste en que el índice de refracción de la sílice, material usado para fabricar las fibras ópticas, depende de la frecuencia óptica. Por ello, las componentes de distintas frecuencias viajan a velocidades diferentes por la sílice. (p. 14).

Como se explicó en el planteamiento del problema, según López, J. (2011), en la revista DIALNET dice: “Existe una dependencia marcada de la dispersión cromática de algunos efectos no lineales.” (párr.9).

Nos dice que el ensanchamiento del pulso que es provocado por la dispersión cromática, debido a la dependencia que existe de la longitud de la onda del índice de refracción, causa que el pulso aumente su duración temporal, resultando ésta en una Interferencia Interesimbólica (ISI – Intersymbol Interference).

2.2.4. Interferencia Intersimbólica

Cuando deseamos transmitir un mensaje, el objetivo principal es que éste pueda ser recibido de manera completa y perfecta. Sin embargo, debido a ciertas limitaciones en los sistemas, se dan los casos en el que el mensaje llega completamente distorsionado. Supongamos que tenemos una señal a la entrada de un filtro pasabajos, el caso ideal sería un filtro que no produce ningún tipo de distorsión de fase o amplitud a la señal, por lo que la señal a la salida del filtro debería ser igual a la señal de entrada.

Pero, en el caso real, el filtro es imperfecto, por lo que la respuesta de salida se aproximará a la parte derecha de la imagen mostrada. Se observa que los pulsos de salida se 'chorrean' en el tiempo, interfiriendo con los pulsos siguientes. Dicho de otra manera, los extremos de los pulsos se solapan, interfiriendo con el lóbulo

principal del pulso. Esto es lo que se conoce como *Interferencia Intersimbólica* (*intersymbol interference, ISI*): los pulsos rectangulares no mantendrán su forma siempre que el ancho de banda para el proceso de transmisión sea finito. Mientras más pequeño sea el ancho de banda, los pulsos se dispersarán, interfiriendo con el siguiente pulso transmitido. Esta interferencia puede atribuirse a cuatro causas principales: problemas de sincronismo, distorsión de amplitud o de fase, o limitación del ancho de banda del canal. (Mezoa, 2011, p.2).

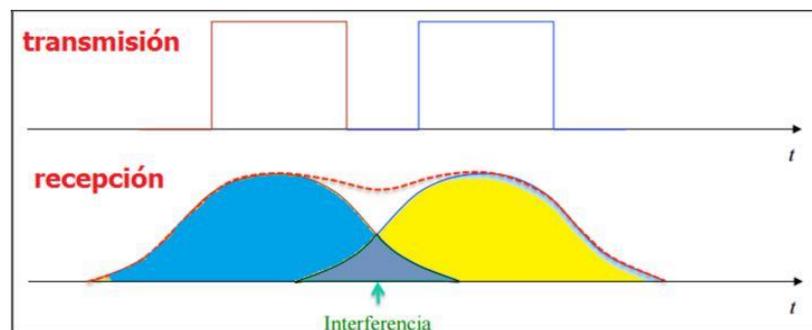


Figura 2.6: Interferencia en señal transmitida

Fuente: Elaboración propia

Una de las formas de poder interpretar estas interferencias intersimbólicas conjuntamente con el ruido encontrado en estas señales transmitidas es mediante el Diagrama de Ojo, medio por el cual utilizaremos en la presente investigación debido a su particular forma y facilidad que nos permitirá realizar una mejor interpretación de éstas interferencias.

2.2.4.1. Diagrama de Ojo

Un diagrama de ojo es una herramienta útil para comprender las deficiencias de una señal en la capa física de sistemas de datos digitales de alta velocidad, cuyo diagrama está presente en la **Figura 2.7**, verifica el cumplimiento de la salida del transmisor y revelar los elementos de

distorsión de amplitud y tiempo que degradan el BER con fines de diagnóstico.

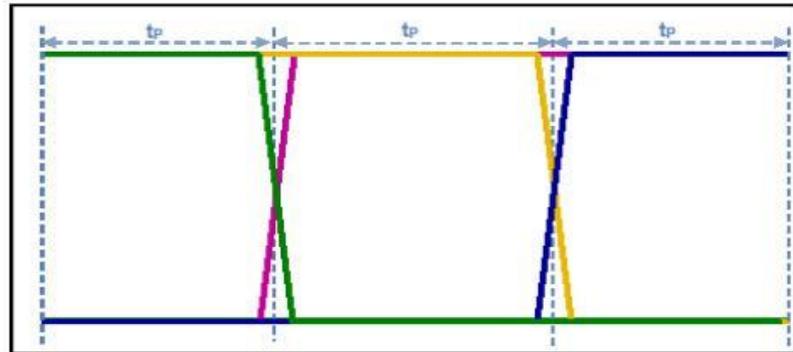


Figura 2.7: Diagrama de ojo

Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. *Digital Waveform Timing*, Austin Texas

Tomando muestras instantáneas de gran ancho de banda de una señal digital de alta velocidad, un diagrama de ojo es la suma de muestras de superponer las medidas de transición de 1's y 0's correspondientes. Lo que resulta es una imagen que revela el "ojo" del diagrama del ojo, como se muestra en la **Figura 2.8**.

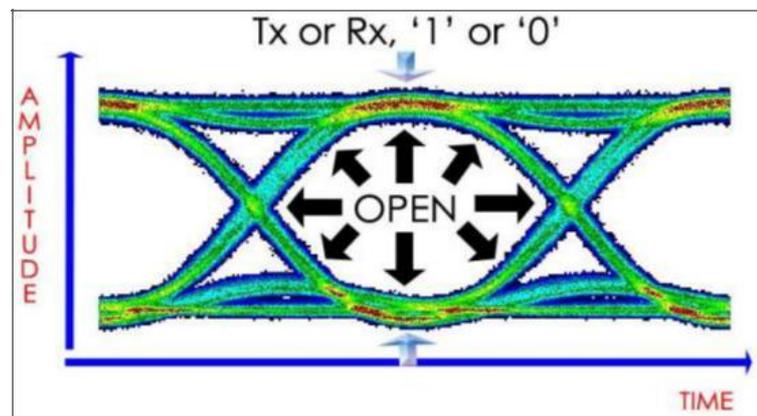


Figura 2.8: Diagrama de ojo apertura

Fuente: Poveda, G.; Carrera, C.; (2015).

Para facilitar la visualización, el eje de tiempo de la **Figura 2.8** se normaliza para 2 bits, con 1 "apertura de ojo" en el centro de la pantalla y 1/2 bit a la

izquierda y la derecha del ojo central para capturar las transiciones de subida / caída-tiempo. Se observa que cualquier bit de datos en las transiciones de subida / caída de la señal digital que infrinjan el centro de la apertura del ojo puede causar errores de datos. Aunque el patrón ocular de la **Figura 2.8** representa ruido y jitter, otros ejemplos próximos mostrarán (**Figura 2.9**) formas de onda del sistema de datos con considerablemente más ruido y un ojo central que se cierra de manera más significativa.

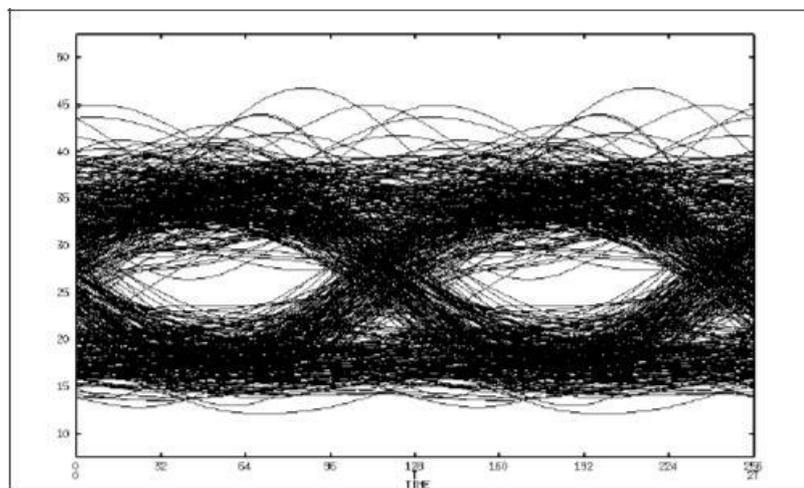


Figura 2.9: Enlace expuesto a ruido
Fuente: Muntakim, H. (2010)

En general, cuanto más abierto esté el ojo (indicado por las flechas en el diagrama de arriba), menor será la probabilidad de que el receptor en el sistema de transmisión confunda un lógico 1 bit con un bit lógico 0 viceversa. Estas decisiones lógicas requieren un cierto margen de señal diferencial entre el 0 y el nivel 1. El ruido, tanto de amplitud como de fluctuación de tiempo, reduce ese margen y se representa lógicamente en la **Figura 2.9** como un cierto cierre de la abertura del ojo. La relación de bits que tienen errores, en comparación con la Bits globales, se denomina BER. El diagrama de ojo no muestra problemas de protocolo o lógicos. Sin embargo, permite al ingeniero ver más fácilmente las deficiencias de señal en la capa física en términos de distorsión de amplitud y tiempo. El diagrama de Ojo o patrón de Ojo, es muy requerido y utilizado para los análisis de formas de ondas en telecomunicaciones digitales,

corresponde esencialmente, a un diagrama que muestra la superposición de las distintas combinaciones posibles de unos y ceros en un rango de tiempo o cantidad de bits determinados. Dichas señales transmitidas por el enlace, permiten obtener las características de los pulsos que se propagan por el medio de comunicación, sean estos por medio de fibra óptica, coaxial, par trenzado, enlaces satelitales, etc. Evalúa los siguientes parámetros:

- i. La apertura del ojo define el intervalo del tiempo en el que la señal recibida puede ser muestreada sin error a ISI.
- ii. La sensibilidad del sistema a los errores de temporización, está dada por el ancho de la apertura del ojo.
- iii. La separación respecto del valor central, especificado para el instante de muestreo define el margen de ruido del sistema.

Los parámetros del pulso que permiten analizar el diagrama de ojo son los siguientes, en la **figura 2.10** mostramos el diagrama de parámetros de pulso:

- a. **Sobretensión** superior/inferior: Porcentaje de amplitud excedente del nivel de 1 (sobretensión superior) o 0 (sobretensión inferior).
- b. **Vamp**: Amplitud del pulso.
- c. **Vmax**: Amplitud máxima.
- d. **Tiempo de subida/bajada**: Para obtenerlo, primero se ubican los niveles de cero y uno lógico, luego se obtiene el tiempo relacionado entre el 10% y 90% del valor máximo de amplitud del pulso (nivel de 1). El tiempo entre ambos rangos es el que se conoce como tiempo de subida. De la misma forma se

obtiene el tiempo de bajada, en el extremo de descenso del pulso.

- e. **Intervalo unitario:** tiempo entre dos transiciones de señal adyacentes.

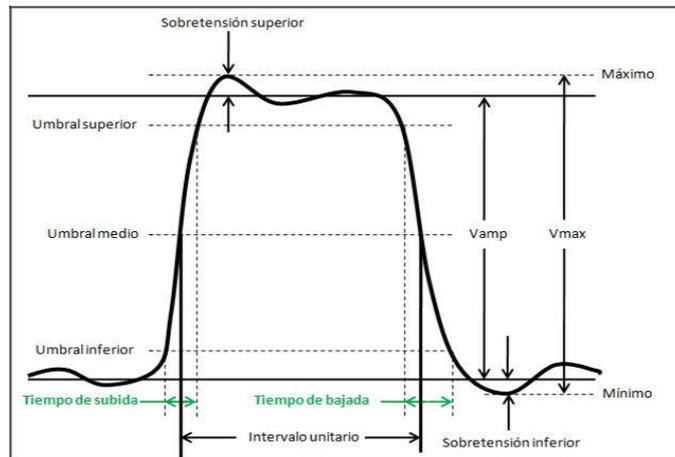


Figura 2.10: Parámetros del Pulso

Fuente: Optical fibres, cables and systems, ITU (2009)

2.2.4.1.1. Análisis de los Parámetros de Ojo

Son de dos tipos, por las características de la onda de pulso, y por la comparación de máscaras.

a. Por las características de la onda de pulso:

a.1. Nivel de 1 lógico: Corresponde a la medición del valor promedio del nivel de un uno lógico. Esto se debe a que el diagrama de ojo utiliza métodos estadísticos en la construcción del patrón, es decir, se genera un histograma con los distintos valores del pulso y luego se considera una zona reducida del ancho del pulso, con lo que se logra obtener el promedio del nivel uno de dicho pulso.

a.2. Nivel de 0 lógico: Corresponde a la medida del valor medio del nivel cero lógico. Al igual que en el caso del nivel de uno las técnicas de medición del nivel de cero son las mismas.

a.3. Cruce de amplitud: se refiere al nivel de voltaje en el cual se produce la apertura del ojo y su posterior cierre.

a.4. Cruce de tiempo: se refiere al tiempo en el que se produce la apertura del ojo y su posterior cierre.

a.5. Periodo de bit: período entre la apertura y cierre del ojo. Se obtiene a partir del cruce de amplitud y el cruce de tiempo.

a.6. Jitter: Corresponde básicamente a una desviación de fase respecto de la posición ideal en el tiempo de una señal digital que se propaga en un canal de transmisión. Es un efecto completamente indeseable en cualquier sistema de comunicaciones porque introduce una serie de problemas al canal, que de no ser tratado adecuadamente puede degradar completamente la calidad y desempeño del enlace.

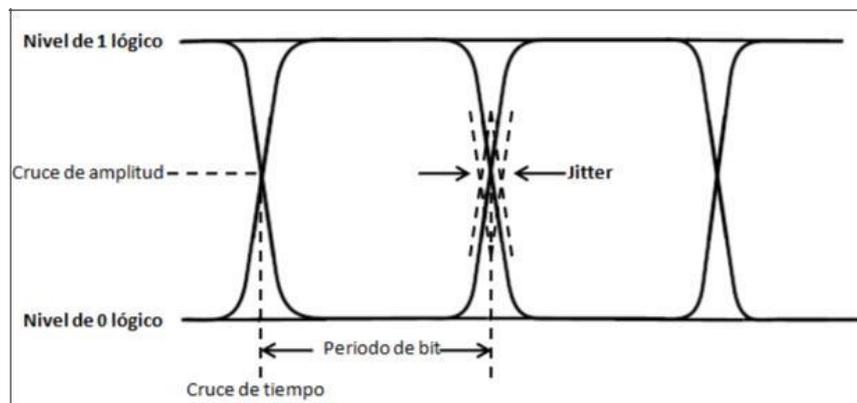


Figura 2.11: Característica de los parámetros de la onda de pulso
Fuente: Optical fibres, cables and systems, ITU (2009)

b. Por Comparación de Máscaras:

Técnicamente, las máscaras preestablecidas definen regiones específicas en el diagrama de ojo, dentro de las cuales los pulsos u ondas no deben introducirse. Dichas máscaras son

muy útiles, ya que se utilizan en el diseño de canales de transmisión, especificando por medio de ellas zonas no permitidas para las señales. Con ello se logra preestablecer un diseño óptimo de enlaces que cumplan ciertas características, ya que si la señal digital que se propaga por el canal se introduce en dichas regiones, se observa n claramente problemas y errores en la transmisión

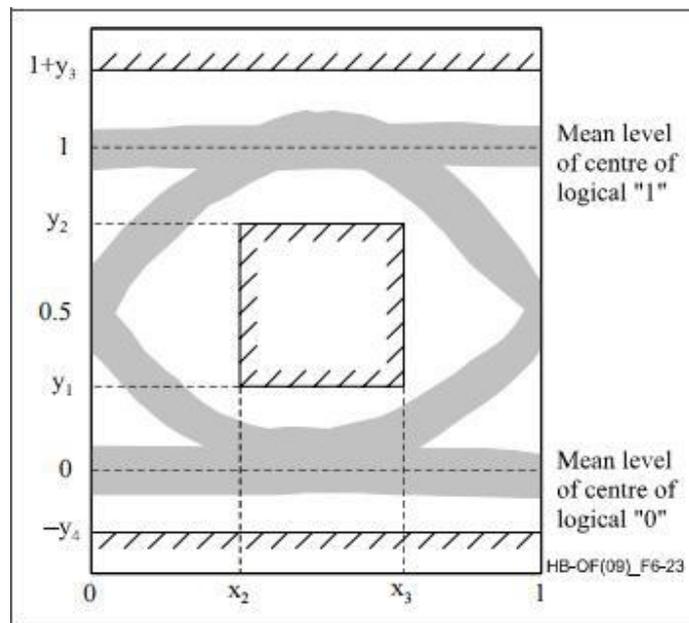


Figura 2.12: Máscara del diagrama de ojo para señales de transmisión óptica.

Fuente: Optical fibres, cables and systems, ITU (2009)

2.2.4.2. OSNR

La relación señal a ruido es un factor importante que se debe tener en cuenta para e diseño de estas redes ópticas y es una característica de cualquier sistema de comunicación. En un sistema de comunicación óptico en (dB) de una señal transmitida, por el nivel de potencia del ruido existente en el sistema (dB). La relación señal a ruido es una medida de cómo una buena señal óptica sobresale a cualquier luz que penetre por accidente en el sistema. La señal debe ser considerablemente más potente que el ruido subyacente. (Astuadillo, J., Ramirez, E., 2014).

La señal reduce su potencia con la distancia en una fibra óptica y debe ser necesariamente elevada en forma periódica, por medio de amplificadores ópticos. No obstante, la ganancia óptica asociada a esos amplificadores debe balancearse contra el ruido adicional que cada amplificador introduce. Los amplificadores ópticos amplían la señal, pero también el ruido indeseado. Mientras menos sea el nivel de la señal y mayor el nivel de ruido, menos será el OSNR. Los receptores aceptan sólo un determinado nivel de OSNR para distinguir las señales del ruido del sistema, lo que puede expresar de la siguiente manera. (Astuadillo, J., Ramirez, E., 2014).

$$\text{OSNR} = 10 \log(P_s/P_n) \quad \dots(1)$$

Donde P_s es la potencia de la señal y P_n es la potencia del ruido, la figura de ruido está dada por el fabricante para cada elemento del sistema como se observa en la siguiente imagen:

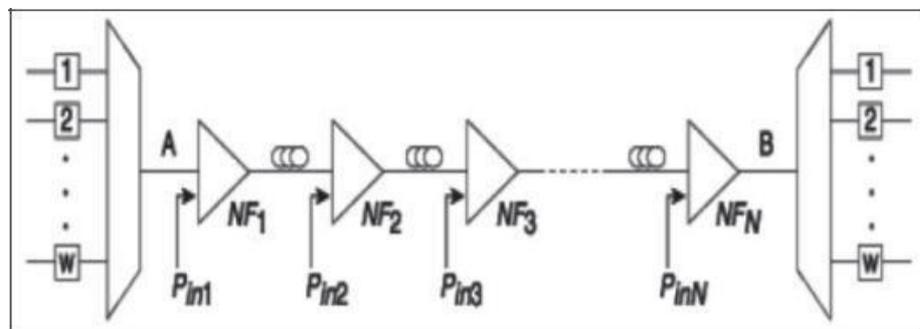


Figura 2.13: Figura de Ruido del sistema

Fuente: Astuadillo, J., Ramirez, E., (2014).

Otra manera para calcular el OSNR es a través del análisis del diagrama del ojo, como puede verse en la figura 2.14, un diagrama de ojo puede revelar información importante. Se puede indicar el mejor punto para el muestreo, divulgar la SNR (relación señal a ruido) en el punto de muestreo, e indicar la cantidad de fluctuación de fase y la distorsión. Además, se puede mostrar la variación de tiempo en el cruce por cero, que es una medida de la fluctuación de fase

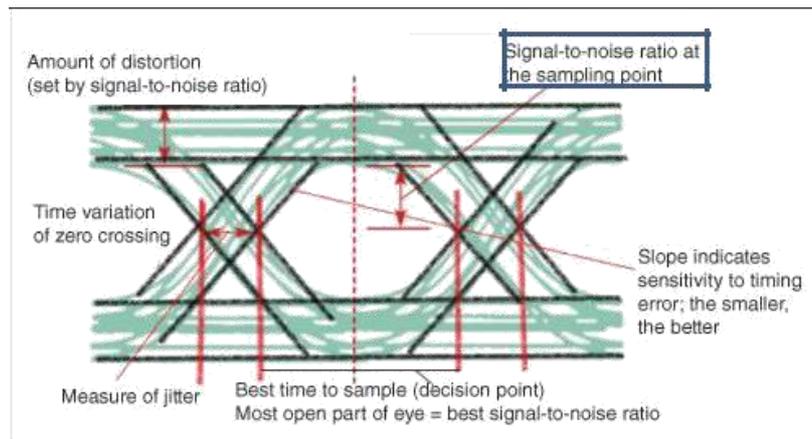


Figura 2.14: Cálculo OSNR del diagrama de ojo
Fuente: Behera, D., Varshney, S., Srivastava, S., and Tiwari S., (2011)

Para este cálculo se toma la distancia medida desde el punto central del patrón de ojo hasta el punto mínimo de la probabilidad de 1s, lo cual se señala en la **figura 2.14**. con un cuadro azul detallándose que el propio simulador da a conocer este resultado con unidad de medida igual a las A.U. (unidades de amplitud), siendo así que los resultados obtenidos por el OSNR deben ser en escala de dB y no en A.U. se utiliza una fórmula matemática detallada en la investigación de Wolfe. J(2017).

$$dB = 20 \log_{10} (\Delta amp.) \quad \dots(2)$$

2.2.4.3. BER – Tasa de bit errado

La tasa de bits errados (BER) es igual a la tasa de bits errados en un total de bits transmitidos, los valores de BER de 10^{-12} son características de la Red Óptica Sincrónica (Sonet) y 10^{-15} para redes DWDM. El valor de 10^{-15} quiere decir 1 bit errado en 10^{15} bits transmitidos. (Astuadillo, J., Ramirez, E., 2014).

$$\text{Bit Error Rate, BER} = \frac{\text{Number of errors}}{\text{Total number of bits sent}}$$

Figura 2.15: Fórmula Bit Error Rate, BER
Fuente: Astuadillo, J., Ramirez, E., (2014).

También mediante los valores obtenidos del OSNR propios de sistema óptico, se puede llegar a una aproximación de valores de probabilidad de bits erróneos. Según la información obtenida por Chakma, T. (2005), explica que mediante una fórmula matemática, se puede hacer el cálculo aproximado de BER directo del OSNR.

$$\text{Log}_{10}(\text{BER}) = 10.7 - 1.45 (\text{OSNR}) \quad \dots(3)$$

2.2.4.4. Factor de Calidad (Factor Q)

El factor Q mide la calidad de una señal de transmisión analógica en términos de su relación señal / ruido (SNR). Como tal, se tiene en cuenta las deficiencias físicas de la señal - por ejemplo, el ruido, la dispersión cromática y cualquier efecto de polarización o no lineal - que puede degradar la señal y, en última instancia, causar errores de bits. En otras palabras, cuanto mayor sea el valor del factor Q La mejor SNR y, por tanto, menor será la probabilidad de errores de bits.

Específicamente, Q-Factor representa la calidad de la SNR en el "ojo" de una señal digital - El "ojo" es el patrón en forma de ojo humano en un osciloscopio que indica Rendimiento del sistema de transmisión. El mejor lugar para determinar si un bit dado es un "1" o "0" es la fase de muestreo con la "apertura ocular" más grande. Cuanto mayor sea el ojo Mayor la diferencia entre los valores medios de los niveles de señal para una "1" y un "0". Cuanto mayor sea la diferencia, mayor será el factor Q y mejor BER rendimiento.

Definido en términos matemáticos a partir de la solución de $d\text{BER}(V_{th})/dV_{th} = 0$ donde:

$$BER(V_{th}) = \frac{1}{2} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{|\mu_1 - V_{th}|}{\sigma_1} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{|V_{th} - \mu_0|}{\sigma_0} \right) \right) \quad \dots(4)$$

Es la diferencia entre los valores medios de los niveles de señal para un '1' y un '0' (μ_1 y μ_0), dividido por la suma de los valores de ruido (σ_1 y σ_0) a esos dos niveles de señal suponiendo que el ruido gaussiano y la probabilidad de una transmisión '1' y '0' sean iguales {es decir. $P(1) = P(0) = 1/2$ }

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

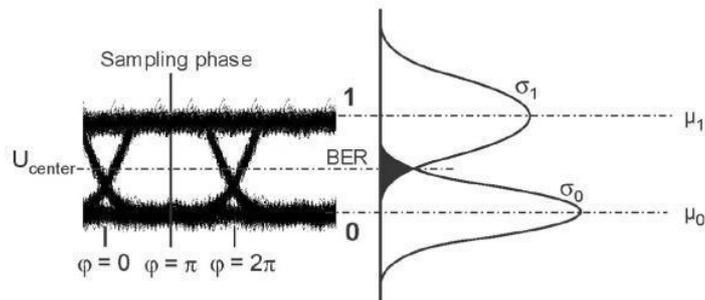


Figura 2.16: Representación del ruido en la señal

Fuente: Keith Willox. (2003).

2.3 Definición de términos básicos

WDM. - multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing*) es una tecnología que multiplexa varias señales sobre una sola fibra óptica mediante portadoras ópticas de diferente longitud de onda, usando luz procedente de un láser o un led.

ISI. – interferencia entre símbolos (*intersymbol interference*). Cuando en un sistema de transmisión digital, la distorsión de la señal recibida se manifiesta mediante ensanchamientos temporales, y el consecuente solapamiento, de pulsos individuales hasta el punto de que el receptor puede

no distinguir correctamente entre cambios de estado, por ejemplo entre elementos individuales de la señal.

BER. – (*Bit Error Rate*) Tasa de errores de bits, BER se utiliza para cuantificar un canal que transporta datos contando la tasa de errores en una cadena de datos. Se utiliza en las telecomunicaciones, las redes y los sistemas de radio.

Multiplexación. – Es la combinación de dos o más canales de información en un solo medio de transmisión, permitiendo varias comunicaciones de forma simultánea, usando un multiplexor.

SNR. – (*Signal Noise Relation*) Relación señal-ruido, es una medida utilizada en la ciencia e ingeniería que compara el nivel de una deseada señal al nivel de fondo de ruido. Se define como la relación de potencia de la señal a la potencia de ruido, a menudo expresada en decibelios.

OSNR. – (*Optical Signal Noise Relation*) Las señales ópticas tienen una frecuencia portadora que es mucho mayor que la frecuencia de modulación (alrededor de 200 THz y más). De esta manera el ruido cubre un ancho de banda que es mucho más amplia que la propia señal. La influencia de la señal resultante se basa principalmente en el filtrado del ruido.

Dispersión Cromática. – Se refiere al retardo (deformación) espectral de un pulso óptico conforme se propaga por la fibra. La Fibra Óptica convencional tiene un coeficiente de dispersión positivo; Esto quiere decir que a mayores longitudes de ondas se tiene un mayor tiempo de tránsito a través de la fibra

Fibra Óptica. – Filamento de material dieléctrico, como el vidrio o los polímeros acrílicos, capaz de conducir y transmitir impulsos luminosos de uno a otro de sus extremos; permite la transmisión de comunicaciones telefónicas, de televisión, etc., a gran velocidad y distancia, sin necesidad de utilizar señales eléctricas.

Ancho de Banda o Bandwidth. – se conoce como la capacidad para transportar información en telecomunicaciones.

Hertz. – Unidad física usada para medir la frecuencia de ondas y vibraciones de tipo electromagnética.

Jitter. – Es la desviación o desplazamiento de un impulso o señal en una alta frecuencia digital de señal, el cual puede ser en amplitud, tiempo de fase o anchura de impulso.

Modulación. – Es una técnica que se usa para transportar información sobre una onda portadora.

Estimación. – Es el proceso de encontrar una aproximación acerca de parámetros u magnitudes.

Distorsión. – Es la deformación que sufre una señal tras su paso por un sistema.

CAPÍTULO III

MATERIAL Y

MÉTODOS

3.1 Material

3.1.1. Población y muestra

La población está constituida por todas las observaciones de parámetros de Interferencia Intersimbólica que pueden realizarse para cada variación de longitud de enlace.

Al tratarse de una condición no determinística, no hay un número determinado de observaciones que puedan realizarse, por lo cual tomando en cuenta las limitaciones de la herramienta de simulación, se va observar el comportamiento de 32 longitudes de onda (DWDM) al variar 10 veces la longitud del enlace, con lo cual se tendrían 320 observaciones por cada parámetro de interferencia intersimbólica.

Tomando en cuenta que se observarán 04 parámetros ISI, se tendría en total 1280 observaciones, lo cual constituye la población y muestra.

3.1.2. Unidad de Análisis

Se busca hacer un análisis de los parámetros de BER, OSNR, Jitter y factor Q en un sistema DWDM.

3.2. Método

3.2.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación propuesto en el presente proyecto es de tipo descriptiva. Se busca caracterizar los parámetros de Interferencia Intersimbólica en un sistema óptico DWDM con respecto a diferentes longitudes de enlace.

3.2.2. Diseño de Investigación

El diseño de la investigación se caracteriza por ser una investigación documental. Se trabajó con los reportes de parámetros de Interferencia Intersimbólica obtenidos de la simulación de un sistema óptico DWDM al variar la longitud de enlace.

Etapas:

1. Recopilación de documentación e información sobre interpretación de diagramas de ojo y parámetros de Interferencia Intersimbólica.
2. Simulación de un sistema óptico DWDM mediante el simulador Optisystem y 32 longitudes de onda.
3. Recopilación los reportes de simulación respecto de los parámetros obtenidos de OSNR, Jitter, Factor Q y BER.
4. Elaboración de curvas de la relación de longitud de onda con cada parámetro respecto al comportamiento de la ISI con la longitud del enlace óptico.

3.2.3. Variables de estudio y Operacionalización

a. Variable Independiente

- Longitud de enlace

Indicadores:

- Longitud de fibra óptica (Km.)

b. Variable Dependiente

- Interferencia Intersimbólica en los sistemas ópticos DWDM

Indicadores:

- OSNR
- JITTER
- Factor Q
- BER

a. Definición operacional

Tabla 3.1. Operacionalización de la Variable Independiente

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	UNIDADES MEDIDA
Longitud de enlace	Es la longitud de la fibra óptica que se utiliza como medio de transmisión para enlazar dos Multiplexores DWDM bajo un escenario de Simulación	Se realizará la simulación de diferentes longitudes de fibra óptica en el mismo sistema DWDM.	Longitud de la fibra óptica	Reporte simulación	kilómetros

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.2. Operacionalización de la Variable Dependiente

VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	UNIDADES MEDIDA
<p>Parámetros de Interferencia Intersimbólica en un sistema óptico DWDM simulado</p>	<p>Es la cuantificación de datos específicos de las señales ópticas para un sistema DWDM simulado, por medio los cuales se puede evaluar la calidad de la señal recibida</p>	<p>La cuantificación de retardos, distorsión, bits erróneos y la relación entre ellos, permite obtener una referencia de la calidad de señal recibida.</p>	OSNR	<p>Reportes de simulación</p>	Decibelios (dB)
			JITTER		Segundos (periodos de bit)
			FACTOR Q		Adimensional
			BER		Unidades de Amplitud

Fuente: Elaboración Propia

3.2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

- **Reportes de simulación obtenidos del Simulador OptiSystem Optiwave.**

Herramienta de simulación

Para el desarrollo de ésta investigación, se optó por una herramienta de simulación que estuvo al alcance en su versión demo en la cual permitió trabajar dentro de lo requerido para nuestra investigación y así lograr objetivos planteados en el presente trabajo, por tal motivo se optó por este programa.

La herramienta de simulación escogida fue **OPTISYSTEM 7.0** de OPTIWAVE, con la cual se pueden realizar simulaciones de sistemas ópticos WDM, permitiendo disminuir la separación de las longitudes de onda hasta formar un sistema más denso tal como DWDM). La herramienta ofrece reportes gráficos que facilitan el análisis de los parámetros tales como **BER**, **OSNR** y **Jitter** mediante los diagramas de ojo y las opciones de librería, además de mostrar los niveles de calidad del sistema simulado (**Factor Q**).

El simulador incluye instrumentos virtuales como osciloscopios, analizadores de espectros ópticos y eléctricos, o diagramas de ojo; aunque su principal instrumento virtual es un estimador de la tasa de error de bit (BER), parámetro de calidad básico en los sistemas de transmisión digital. (Poveda, G.; Carrera, C.; 2015). Dentro de sus características podemos encontrar las siguientes presentadas en la **Tabla 3.3**.

Tabla 3.3. Características principales del Optisystem 7.0.

Característica	Descripción
Librería de Componentes	Incluye más de 200 módulos, los cuales han sido validados para entregar resultados de cuidado que son comparables con aplicaciones reales.

<p>Componentes de medición</p>	<p>Permite gestionar los parámetros que pueden ser medidos con dispositivos reales. También se integra con equipos de medición de prueba de diferentes proveedores.</p>
<p>Algoritmos de calidad y Rendimiento</p>	<p>Calcula parámetros como el BER y el Factor Q utilizando análisis numérico o técnicas semi-analíticas para sistemas limitados por interferencia inter-símbolos y el ruido.</p>
<p>Herramientas avanzadas de Visualización</p>	<p>Estas herramientas de visualización producen espectros OSA, señales con "chirp", diagramas del ojo, estado de polarización, diagramas de constelación. Herramientas de análisis WDM, que muestran la fuerza de la señal, la ganancia, factor de ruido, y la relación señal a ruido óptico OSNR.</p>
<p>Monitores de datos</p>	<p>Permite el procesamiento de los datos después de la simulación sin tener que volver a calcular. También puede adjuntar un número arbitrario de las pantallas en el mismo puerto.</p>
<p>Múltiples diseños</p>	<p>Se puede crear muchos diseños utilizando el mismo archivo del proyecto, lo cual permite crear y modificar sus diseños de manera rápida y eficiente. Cada archivo de proyecto OptiSystem puede contener muchas versiones de diseño. Las versiones de diseño se calculan y se modifican de forma independiente, pero los resultados del cálculo se pueden combinar en diferentes versiones, lo que permite la comparación de los distintos diseños.</p>

Gráfico y administración de resultados	Es posible graficar casi cualquier conjunto de parámetros disponibles en el diseño. Los gráficos producidos se pueden guardar y volver a utilizar. La herramienta de creación gráfica compara cualquier resultado contra cualquier parámetro de barrido.
-----------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Poveda, G.; Carrera, C.; (2015).

Además según Aniel López (2014), nos dice que éste software brinda ingeniosas facilidades para experimentar con los parámetros físicos de los componentes del sistema y observar gráfica y cuantitativamente los resultados a través de los instrumentos de visualización que ofrece.

- **Reportes de la herramienta OPTISYSTEM 7.0.**

La herramienta optisystem presenta diferentes formas de reportar los análisis de parámetros de ISI, tanto así como también se pueden analizar de los diagramas de ojo resultantes, los parámetros a evaluar en esta investigación son los siguientes:

- OSNR
- Jitter
- Factor Q
- BER

a.1. OSNR

El concepto de OSNR es clave en la caracterización de una red WDM. Es una medida cuantitativa de cuánto la señal ha sido dañada por el ruido, durante la propagación en una fibra. Se calcula dividiendo la potencia de señal total por la potencia de ruido.

$$\text{OSNR} = 10\text{dB} * \log(\text{Ps}/\text{Pn}) \dots(5)$$

Siendo P_s la potencia de señal, y P_n la potencia de ruido. Estos valores los podemos encontrar en los diagramas espectrales en el momento de la multiplexación lo cual se representa en la **Figura 3.1**.

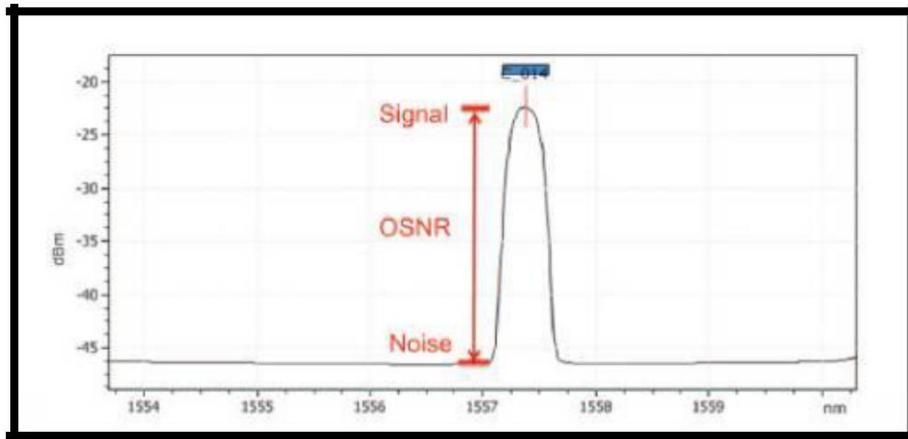


Figura 3.1. Ejemplo de la relación óptica Señal a Ruido

Fuente: Muntakim, H. (2010)

Esta relación de señal a ruido se puede calcular a partir del diagrama del ojo midiendo la distancia hallada desde el punto central del patrón de ojo hasta el punto mínimo de la probabilidad de 1s, graficada en la **Figura 3.2.**, de lo cual se obtiene una unidad de medida de unidades de amplitud.

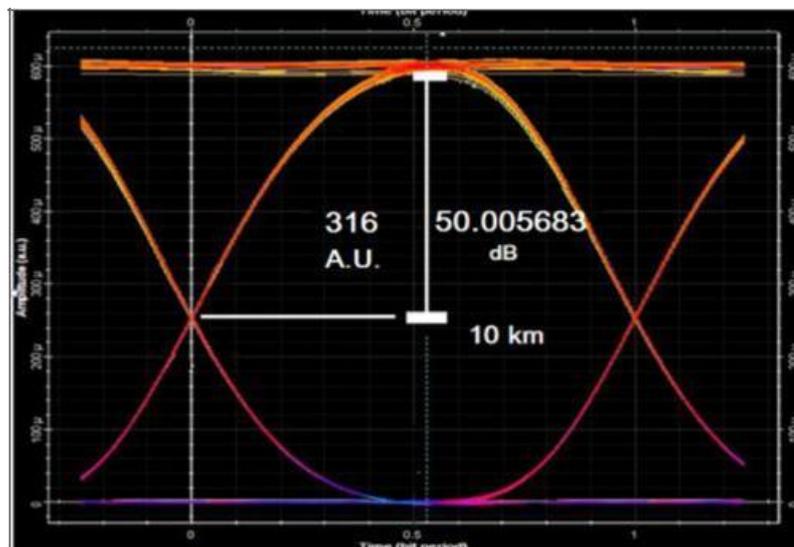


Figura 3.2. Cálculo de OSNR diagrama de ojo

Fuente: Elaboración Propia

Del resultado obtenido del diagrama de ojo, se tiene un OSNR en unidades de amplitud, el cual posteriormente convertimos estas unidades en decibelios.

Ésta es la forma en que la investigación recopiló los datos y reportes del parámetro OSNR, siendo luego estos almacenados en una tabla de hoja de cálculo de Excel.

a.2. Jitter

Jitter es la desviación de tiempo de la sincronización ideal de un evento de bit de datos- es tal vez uno de los temas más importantes en las señales de datos digitales de alta velocidad. Para calcular la fluctuación de fase, las variaciones de tiempo de los bordes ascendentes y descendentes de un diagrama de ojo en el punto de cruce se capturan como se muestran en la **Figura 3.3** y en la **Figura 3.4**. Las fluctuaciones pueden ser aleatorias y/o deterministas.

Esta variación de retardo se analiza en el mismo diagrama de ojo midiendo el ancho de cada uno de los puntos de cruce que se encuentran en los extremos derecho e izquierdo del ojo, teniendo como unidad de medida los segundos (s), siendo determinado por el eje x (Time – bit period).

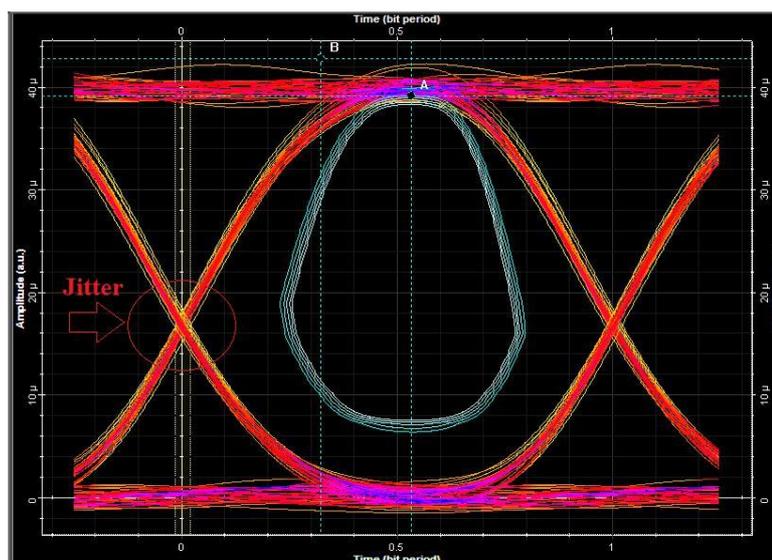


Figura 3.3. Jitter – Diagrama de Ojo
Fuente: Fuente Propia



Figura 3.4. Medición de Jitter
Fuente: Fuente propia

Posteriormente se recopiló de las simulaciones y los reportes, todos los 32 valores del Jitter de cada diagrama de ojo correspondiente a su propia cada una de las 10 longitudes de enlace.

a.3. **BER**

Se utiliza para cuantificar un canal que transporta datos contando la tasa de errores en una cadena de datos. Es un parámetro clave que se utiliza en la evaluación de los sistemas que transmiten datos digitales de un lugar a otro.

Una tasa de error de bits se define como la velocidad a la que se producen errores en un sistema de transmisión. Esto puede traducirse directamente en el número de errores que se producen en una cadena de un número indicado de bits. La definición de la tasa de error de bits se puede traducir en una fórmula simple:

Tasa de error de bit es igual al número de errores de bit dividido por el número total de bits enviado.

Si el medio entre el transmisor y el receptor es buena y la relación señal a ruido es alto, entonces la tasa de error de bit será muy pequeña – posiblemente insignificante y tener ningún efecto notable sobre el sistema global sin

embargo, si el ruido puede ser detectado, entonces hay posibilidad de que tendrá la tasa de error para ser considerado.

Esta relación no tiene manera directa en la cual se pueda analizar, por lo cual hacemos uso de un instrumento en nuestra herramienta de simulación llamado BER Analyzer, el cual en su función de BER Pattern nos muestra el comportamiento del BER en el sistema, el cual está señalado de celeste en la **Figura 3.5**.

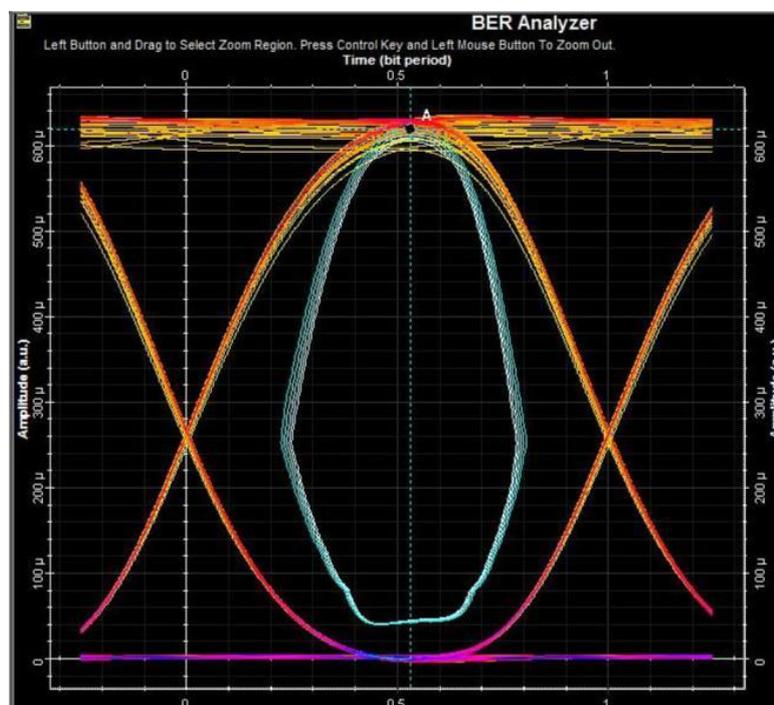


Figura 3.5. Comportamiento del parámetro BER
Fuente: Fuente propia

Del cual tomamos el punto más alto en el que el BER tomaría su valor máximo, tal y como se ve en la **Figura 3.6.**, punto en el cual nos centraremos para considerar la mayor tasa de error de bit posible en el sistema.

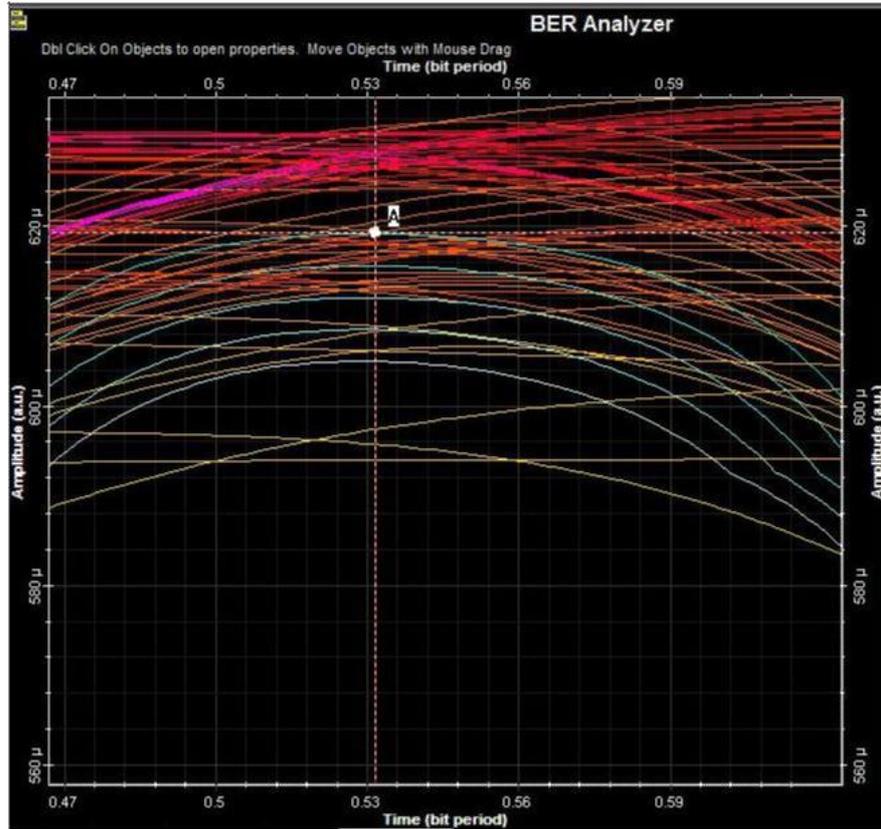


Figura 3.6. Punto del BER máximo.

Fuente: Fuente propia

a.4. Factor Q

El factor Q brinda la mínima relación señal a ruido óptica (OSNR) requerida para obtener una BER específica tomando como referencia la señal eléctrica transmitida, la señal óptica transmitida y la señal eléctrica recibida.

OptiSystem utiliza un algoritmo para calcular el valor de Q basado en la siguiente expresión (OptiSystem, 2007).

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad \dots(6)$$

donde I_1 e I_0 son los valores del flujo de unos y ceros; y σ_0 y σ_1 , desviaciones estándar del flujo de unos y ceros, respectivamente.

Para la medición de este parámetro necesitamos hacer uso de ciertas formulas y hacer ciertas mediciones, pero en nuestro trabajo hemos hecho uso del instrumento BER Analyzer en el cual podemos encontrar el Factor Q máximo. El cual esta contorneado con rojo en la siguiente figura.

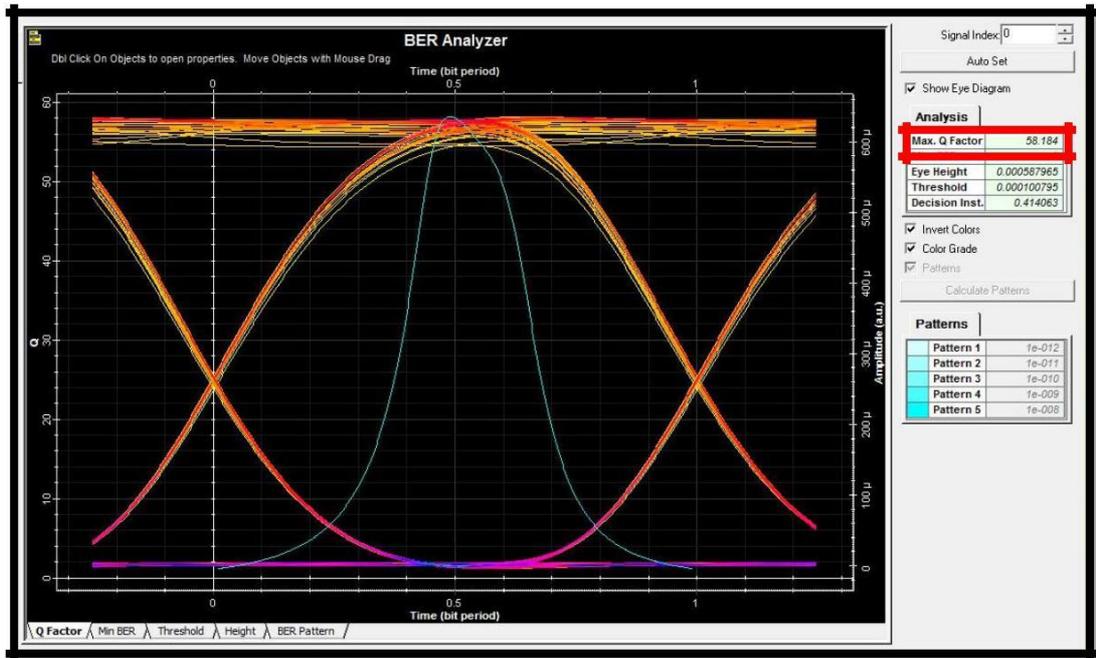


Figura 3.7. Máximo Factor Q

Fuente: Fuente propia

3.2.5. Técnicas de procesamiento de datos

a. Modelo del sistema DWDM elegido para la simulación

Para el procesamiento de los datos se tomó como base un enlace modelo, basado en los antecedentes mencionados en esta investigación y usando lo necesario para poder demostrar los parámetros requeridos.

Para definir el diseño que seleccionamos nos basamos en la **Figura 3.10.** donde encontramos las características físicas de los sistemas DWDM.

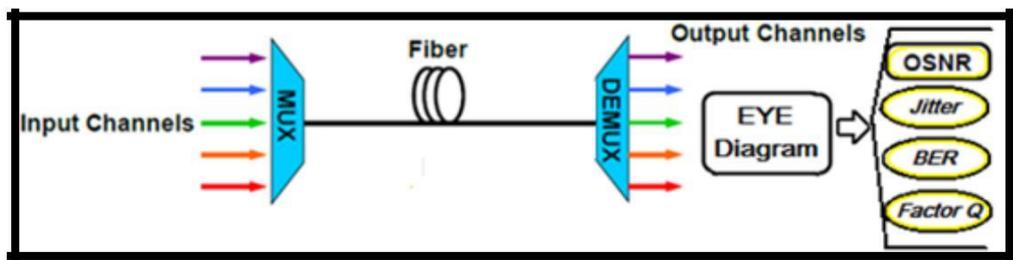


Figura 3.8. Características de la simulación a nivel físico de DWDM

Fuente: Elaboración Propia

Basándose en el diseño anterior, se realizó el esquema en el simulador OPTISYSTEM, en el cual definiremos los instrumentos que se usaron y de los parámetros dependiendo de equipos que trabajen en dicho rango de los parámetros.

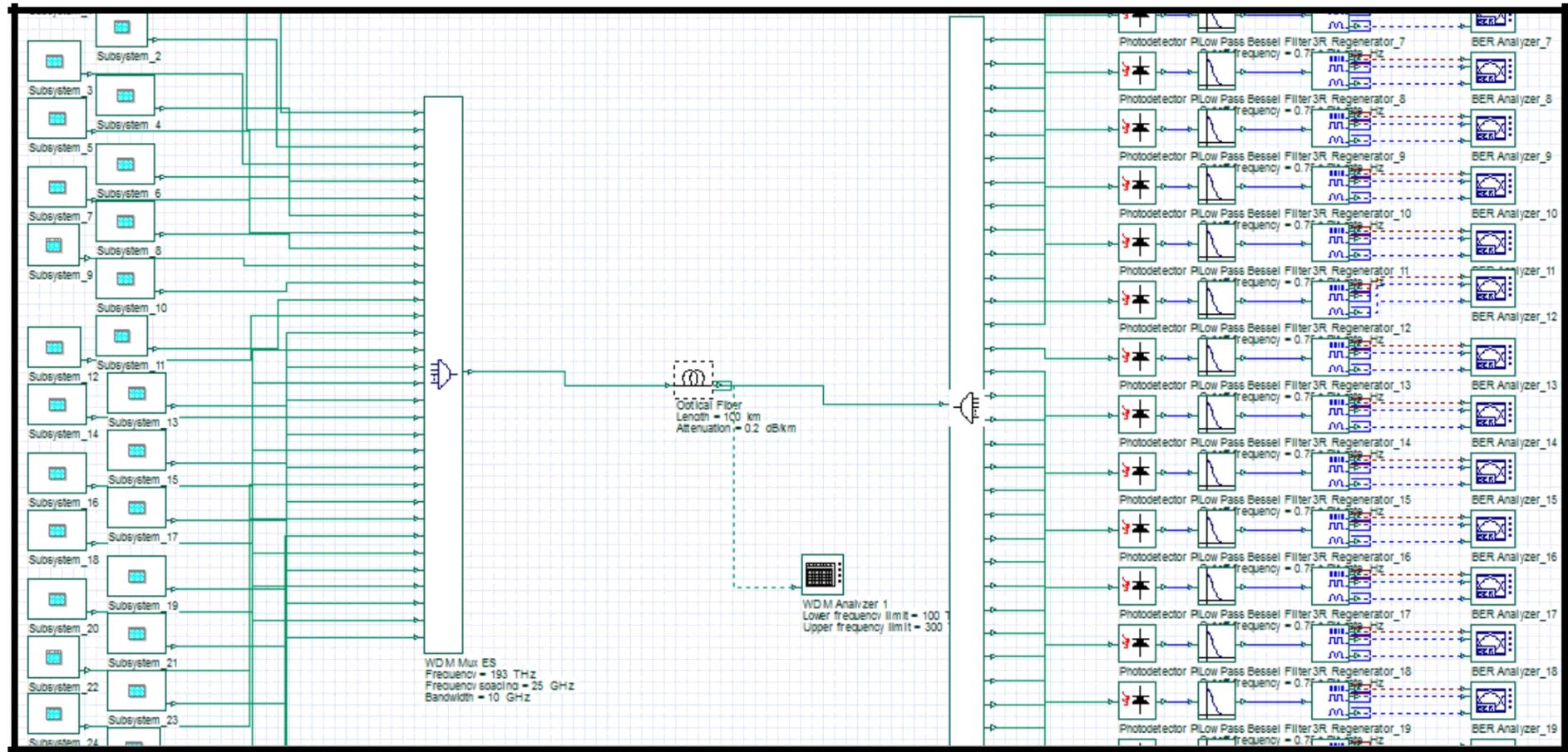


Figura 3.9. Diseño completo de la simulación
Fuente: Fuente propia

El diseño completo de esta investigación consta de etapas o fases en las que se deben cumplir para lograr analizar los parámetros propuestos.

En la etapa inicial, se tiene la entrada de las señales a través de los 32 canales, las cuales estarán designadas cada una a una longitud de onda específica, desde los 193 THz, hasta los 193,775 THz, teniendo una separación entre ellas de 0.025 THz. Mediante el software, se hizo una interpretación de la señal de entrada en los canales, que se podría comparar con las señales recibidas de los módulos ADM SDH, que podrían ser provenientes de diferentes troncales o nodos, por ejemplo aquellas que transmiten internet, telefonía y cable. Entonces esta parte constituye la etapa de la generación de la señal, simulando dicha señal a través de un láser, pulsos ópticos, etc.

La siguiente etapa es de la multiplexación, en donde se unificaron las 32 señales de entrada en una sola para poder ser enviadas a través de un medio óptico llamado fibra óptica.

La etapa de la fibra óptica es importante ya que se evaluará 10 diferentes longitudes de enlaces, para poder analizar los parámetros de OSNR, Jitter, Factor Q y BER, en la etapa final, comenzando desde los 10km hasta los 100km.

Para la siguiente etapa, se hará uso del demultiplexor, necesario para poder separar las 32 longitudes de onda que vinieron juntas a través de la fibra óptica y así poder analizarlas cada una.

En la etapa final, se hace uso de un componente de la librería llamado BER Analyzer, que es aquella que podrá analizar cada una de las 32 señales demultiplexadas mediante los diagramas de ojo respectivos para cada uno, y así poder analizar sus parámetros.

- **Instrumentos seleccionados en Optisystem para cada etapa o fase de la simulación.**

1.- Generación de señal

En la fase de generación se hace uso de 4 componentes, los cuales podemos observar en la **figura 3.10**:

- 1 generador de secuencias óptico
- 1 generador de pulsos ópticos
- 1 generador laser
- 1 modulador mach-zehnder

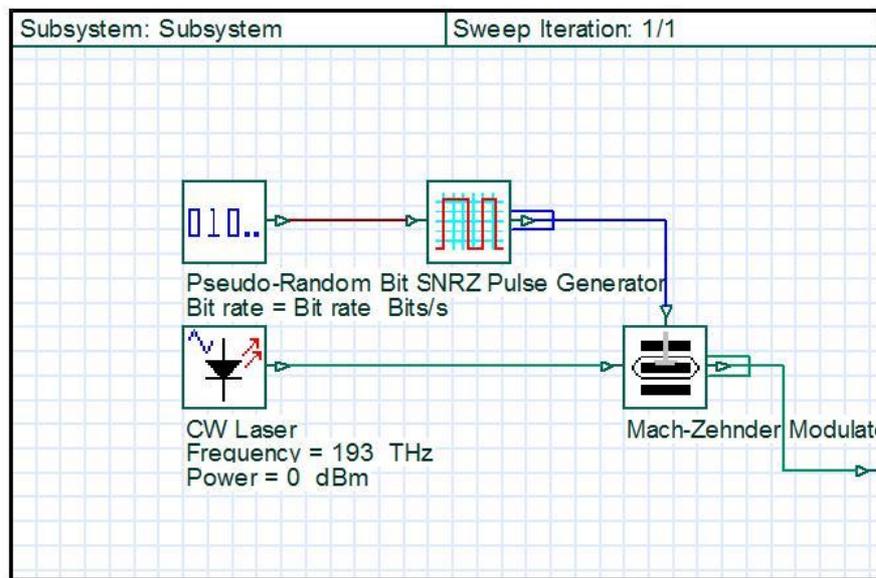


Figura 3.10. Fase de generación
Fuente: *Elaboración Propia*

2.- Multiplexación/ Demultiplexación

En la etapa de multiplexación y en la de demultiplexación se hace uso de un sistema capaz de soportar los 32 canales de transmisión y que puedan ser transmitidas y recibidas a través de una sola fibra óptica.

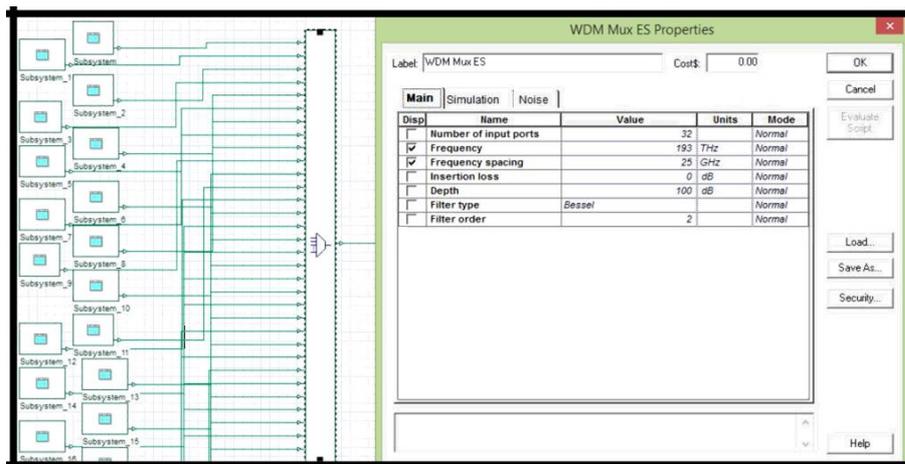


Figura 3.11. Diseño del sistema de Multiplexación
Fuente: Fuente propia

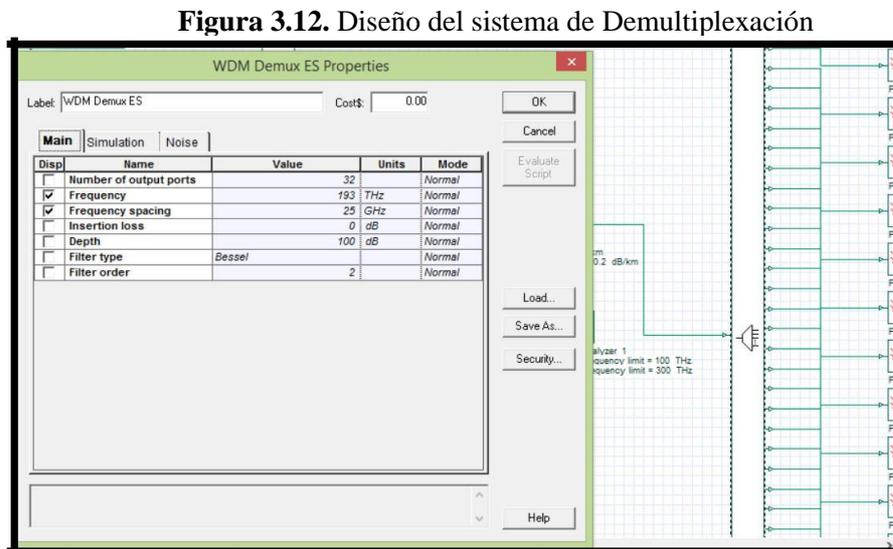


Figura 3.12. Diseño del sistema de Demultiplexación

Fuente: Fuente propia

3.- Fibra Óptica Monomodo

Se seleccionó el tipo de fibra monomodo porque puede propagar una alta tasa de datos y tiene una atenuación más baja que las multimodo. Se utiliza frecuentemente para aplicaciones de transmisión de datos a alta velocidad o para largas distancias. En esta etapa se colocaron los parámetros principales en la fibra óptica y los de Dispersión, tales como se puede observar en las Fig. 3.13 y Fig. 3.14

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	User defined reference w	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Reference wavelength	1550	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Length	50	km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation effect	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation data type	Constant		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	0.2	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation vs. wavelengt	Attenuation.dat		Normal

Figura 3.13. Parámetros principales de conexión fibra monomodo
Fuente: Fuente propia

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Group velocity dispersion	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Third-order dispersion	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion data type	Constant		Normal
<input type="checkbox"/>	Frequency domain param	<input type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion	4	ps/nm/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion slope	0.09	ps/nm^2/k	Normal
<input type="checkbox"/>	Beta 2	-20	ps^2/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Beta 3	0	ps^3/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion file format	Dispersion vs. wavelength		Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion file name	Dispersion.dat		Normal

Figura 3.14. Parámetros de Dispersión de conexión fibra monomodo
Fuente: Fuente propia

Para la realización de la investigación, se optó por usar parámetros reales en la etapa de la fibra monomodo, provenientes de la fibra monomodo G652.B, tal y como podemos ver la hoja técnica en la **fig. 3.15**.

Product Type: G.652.B Coating Type: ColorLock-X3 and Natural		Issue date: 08/10 Supersedes: 05/09	
Optical Specifications			
Attenuation			
Attenuation at 1310 nm	0.33 – 0.35 dB/km		
Attenuation at 1383 nm	1 dB/km		
Attenuation at 1550 nm	0.19 – 0.22 dB/km		
Attenuation at 1625 nm	0.21 – 0.24 dB/km		
Other values available on request			
Attenuation vs. Wavelength			
Maximum attenuation change over the window from reference			
Wavelength range (nm)	Reference λ (nm)	(dB/km)	
1285 - 1330	1310	≤ 0.03	
1525 - 1575	1550	≤ 0.02	
1550 - 1625	1550	≤ 0.03	
Point discontinuities			
No point discontinuity greater than 0.05 dB at 1310 nm and 1550 nm.			
Attenuation with Bending			
Number of Turns	Mandrel Radius (mm)	Wavelength (nm)	Induced Attenuation (dB)
100	25	1310	≤ 0.05
100	25	1550	≤ 0.05
100	30	1625	≤ 0.05
Cutoff Wavelength			
Cable Cutoff wavelength (λ_{cc})	≤ 1260 nm		
Mode Field Diameter			
Wavelength (nm)	MFD (μ m)		
1310	9.0 \pm 0.4		
1550	10.1 \pm 0.5		
Chromatic Dispersion			
Wavelength (nm)	Chromatic Dispersion (ps/nm.km)		
1285 - 1330	≤ 3		
1550	≤ 18.0		
1625	≤ 22.0		
Zero Dispersion Wavelength (λ_0)	1300 - 1322 nm		
Slope (S_0) at λ_0	≤ 0.090 ps/(nm ² .km)		
Polarization Mode Dispersion (PMD)			
PMD Link Design Value* (ps \sqrt km)	≤ 0.08		
Max. Individual Fiber (ps \sqrt km)	≤ 0.20		
* According to IEC 60794 -3, Ed 3 (Q=0.01%)			
Mechanical Specifications			
Proof Test			
The entire length is subjected to a tensile proof stress ≥ 0.7 GPa (100 kpsi); 1% strain equivalent			
Tensile Strength			
Dynamic tensile strength (0.5 meter gauge length):			
Aged** and unaged:	median > 3.8 GPa (550 kpsi)		
** Aging at 85°C, 85% RH, 30 days			
Dynamic and Static Fatigue			
Dynamic fatigue, unaged and aged**	$n_f \geq 20$		
Static fatigue, aged**	$n_f \geq 23$		
Coating Performance			
Coating strip force unaged and aged***:			
- Average strip force:	1 N to 3 N		
- Peak strip force:	1.2 N to 8.9 N		
*** Aging:			
	• 0°C and 45°C		
	• 30 days at 85°C and 85% RH		
	• 14 days water immersion at 23°C		
	• Wasp spray exposure (Telcordia)		
Environmental Specifications			
Attenuation			
Environmental Test	Test Conditions	Induced Attenuation at 1310, 1550 nm (dB/km)	
Temperature cycling	-60°C to 85°C	≤ 0.05	
Temperature-Humidity cycling	+10°C to 85°C, 4-98% RH	≤ 0.05	
Water Immersion	14 days; 23°C	≤ 0.05	
Dry Heat	30 days; 85°C	≤ 0.05	
Damp Heat	30 days; 85°C; 85% RH	≤ 0.05	
Typical Values			
Miscellaneous			
Nominal Zero Dispersion Slope	0.085 ps/(nm ² .km)		
Effective group index @ 1310 nm	1.467		
Effective group index @ 1550 nm	1.468		
Effective group index @ 1625 nm	1.468		
Rayleigh Backscatter Coefficient for 1 ns pulse width:			
@ 1310 nm	-79.4 dB		
@ 1550 nm	-81.7 dB		
@ 1625 nm	-82.5 dB		
Median Dynamic Tensile Strength	5.3 GPa (750 kpsi)		

Figura 3.15. Hoja Técnica de Fibra monomodo subcategoría G.652B.

Fuente: Draka Communication Datasheet single mode optical fiber G.652B

4.- Transducción de señal

Para la etapa de traducción de la señal recibida, tal y como se muestra en la **Figura 3.16.**, se hace uso de:

- Fotodetector
- Filtro de Bessel (pasa bajos)
- 3R Regenerador

Éste último ayudara a analizar la señal recibida enlazándose a un componente de la librería llamado **BER ANALIZER**, el cual se encargará de analizar la señal mediante los diagramas de ojo respectivos de cada uno de los 32 canales y en donde se determinará los valores de los parámetros del OSNR, Jitter, BER y Factor Q.

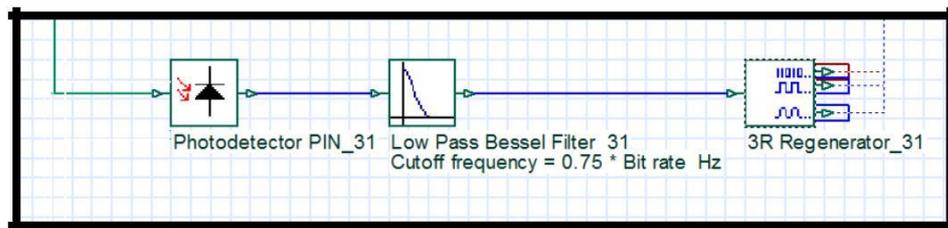


Figura 3.16. Etapa de transducción de señal

Fuente: Elaboración Propia

En la etapa final del enlace del 3R Regenerator y BER Analyzer, se utilizan 3 tipos de conexiones: la señal binaria a transmitir, la señal eléctrica a transmitir y la señal eléctrica recibida. En conjunto estas conexiones, mostradas en la **Figura 3.17.**, permitirán el funcionamiento del BER Analyzer para la muestra del diagrama o patrón de ojo.

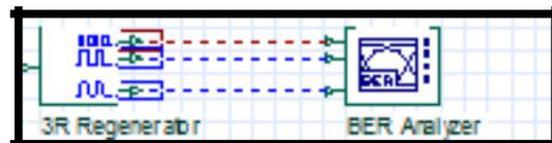


Figura 3.17. Enlace 3R Regenerator y BER Analyzer

Fuente: Elaboración Propia

Especificando así los componentes usados, se puede observar que los valores utilizados en la simulación fueron basados mayormente de los antecedentes y en los valores reales encontrados en el datasheet del tipo de fibra óptica monomodo utilizado.

b. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE DATOS

- **Tablas de tendencia de cada parámetro de Interferencia Intersimbólica evaluado con respecto a la longitud de enlace comparando las diferencias encontrada en cada longitud de fibra.**

Una tabla de tendencia hace referencia al comportamiento que mostrara cierto parámetro con respecto o a través de un intervalo de una magnitud (tiempo, longitud, etc.) esto permite evaluar los parámetros y obtener relaciones y conclusiones respecto a las magnitudes evaluadas, determinando así que dicho comportamiento debe seguir un patrón respecto a sus magnitudes.

Estas tablas de tendencia se pueden elaborar en diversos programas donde se pueda trabajar sobre temas estadísticos y tablas estadísticas, por lo cual se hace uso de la herramienta Excel. Dicha herramienta permitirá agrupar los datos anteriormente tomados y colocarlos en nuestras tablas para poder elaborar las tablas de tendencias. Por ejemplo en el siguiente cuadro de la **tabla 3.4**, se muestra la tabla de datos tomada para los diferentes parámetros con la longitud de enlace igual a 10 km.

Tabla 3.4. Datos de parámetros ISI con longitud de enlace de 10 km

10 km	OSNR	FACTOR Q	JITTER	BER
193	50.37	58.18	0.0162	619.23
193.025	50.06	67.26	0.0093	631.64
193.05	50.88	90.14	0.0102	651.64
193.075	51.01	54.33	0.0125	620.73
193.1	51.20	64.81	0.0089	624.06
193.125	51.19	125.52	0.0037	673.08
193.15	51.10	159.77	0.0045	685.35
193.175	51.09	172.70	0.0040	690.64
193.2	51.08	81.63	0.0093	652.12
193.225	51.06	69.33	0.0093	645.50
193.25	51.00	119.72	0.0058	678.89
193.275	50.22	90.93	0.0075	658.82
193.3	51.03	102.11	0.0081	663.19
193.325	51.03	66.87	0.0091	634.65
193.350	51.20	120.07	0.0047	634.65
193.375	51.20	176.21	0.0035	691.01
193.4	51.32	193.89	0.0035	694.50
193.425	51.18	211.50	0.0029	645.13

193.45	51.22	209.49	0.0028	694.02
193.475	51.29	210.38	0.0042	690.98
193.5	51.27	145.91	0.0043	686.29
193.525	51.27	60.32	0.0098	633.81
193.55	51.27	74.78	0.0082	645.67
193.575	51.27	74.59	0.0087	641.94
193.6	50.73	102.84	0.0078	668.03
193.625	50.73	100.59	0.0062	666.08
193.65	50.73	104.82	0.0070	669.01
193.675	51.02	107.85	0.0042	685.67
193.7	51.03	151.72	0.0039	685.44
193.725	51.02	118.31	0.0045	674.88
193.75	50.08	114.09	0.0048	657.97
193.775	50.01	101.82	0.0058	625.15

Fuente: Fuente propia

Siendo del mismo modo para las demás tablas extraídas de los reportes, que van desde las distancias restantes que son del kilómetro 20 al 100.

Luego se inserta una tabla y se coloca los datos de cada una de los parámetros con respecto a cada longitud de onda, obteniendo una tendencia por cada longitud de onda y al superponerlas podremos obtener una tendencia de cada parámetro a través de las diferentes longitudes de enlace con respecto a las longitudes de onda consideradas.

En los siguientes gráficos se muestran las tendencias de cada parámetro estudiado y su respectivo análisis entre la máxima y mínima distancia usada en cada parámetro en la investigación.

En la **figura 3.18** se presenta la curva final de tendencia del parámetro OSNR

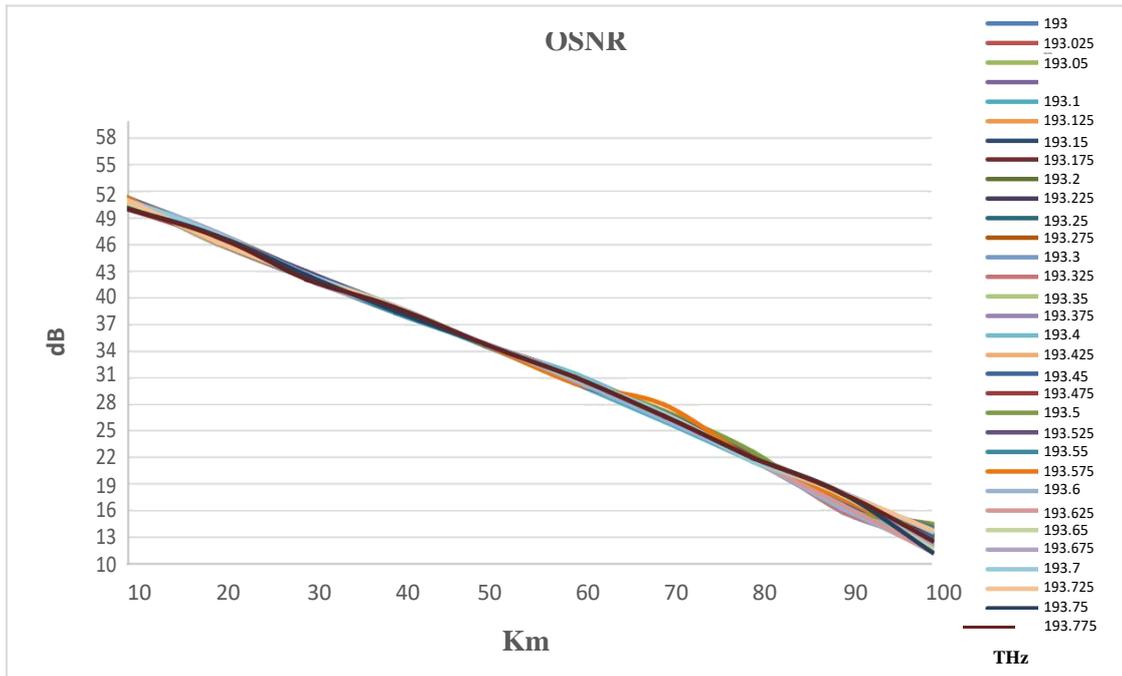
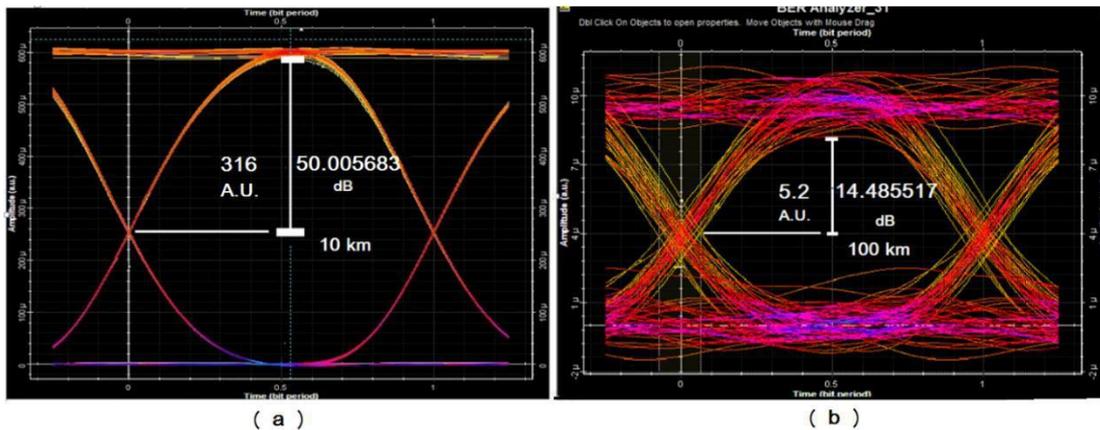


Figura 3.18. Curva de Tendencia Parámetro OSNR

Fuente: Diseño Propio

En las siguientes **figuras 3.19 (a) y (b)**, se presenta las diferencias entre el parámetro OSNR a las distancias 10 y 100 km.



Figuras 3.19. (a) OSNR a 10 Km. **Figuras 3.19. (b)** OSNR a 100 Km.

Fuente: Elaboración propia

En la **figura 3.20** se presenta la curva final de tendencia del parámetro Jitter.

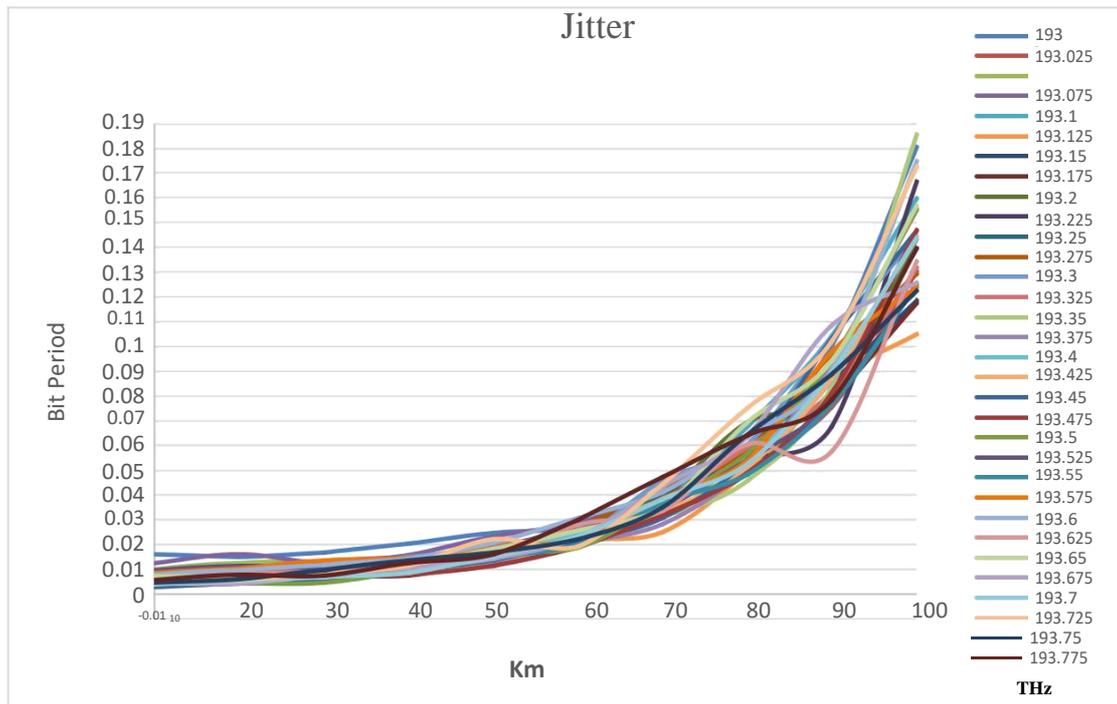
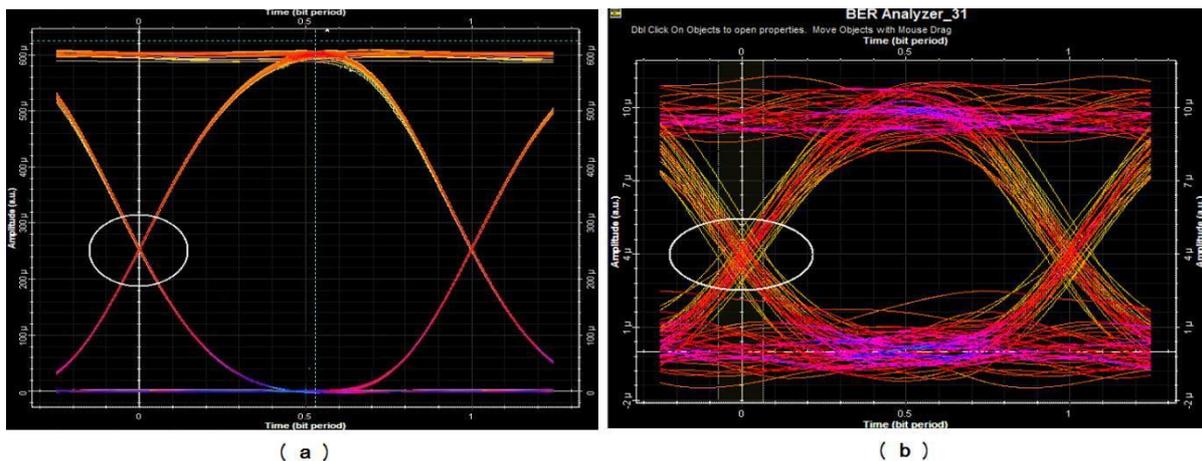


Figura 3.20. Curva de Tendencia Parámetro Jitter
Fuente: Diseño Propio

En las siguientes **figuras 3.21 (a) y (b)**, se presenta las diferencias entre el parámetro Jitter a las distancias 10 y 100 km.



Figuras 3.21. (a) Parámetro Jitter a 10 km **Figuras 3.21. (b)** Parámetro Jitter a 100 km
Fuente: Elaboración propia

En la **figura 3.22** se presenta la curva final de tendencia del parámetro Factor Q.

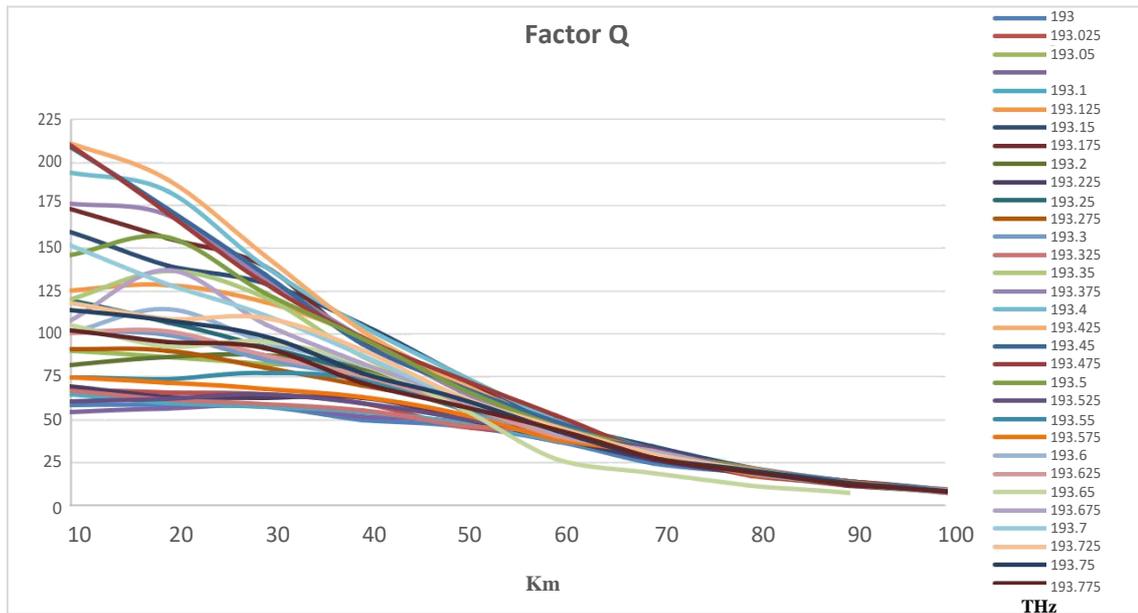
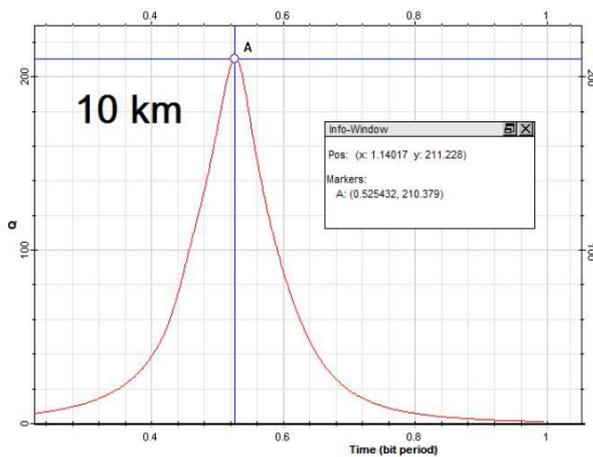
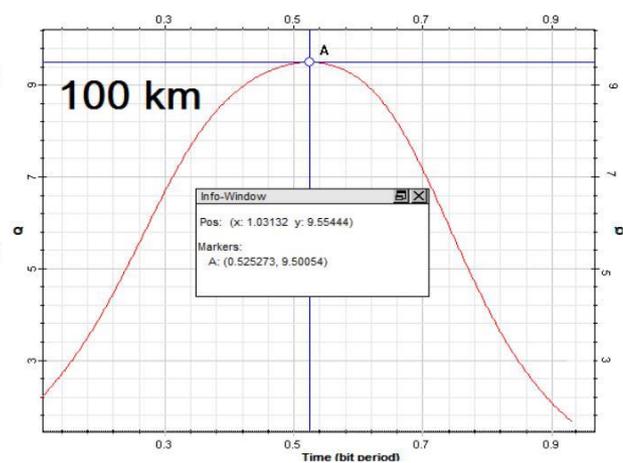


Figura 3.22. Curva de Tendencia Parámetro Factor Q
Fuente: Diseño Propio

En las siguientes **figuras 3.23 (a) y (b)**, se presenta las diferencias entre el parámetro Factor Q a las distancias 10 y 100 km.



(a)



(b)

Figuras 3.23. (a) Factor Q a 10km. Figuras 3.23. (b) Factor Q a 100km.
Fuente: Elaboración propia

En la **figura 3.24** se presenta la curva final de tendencia del parámetro BER

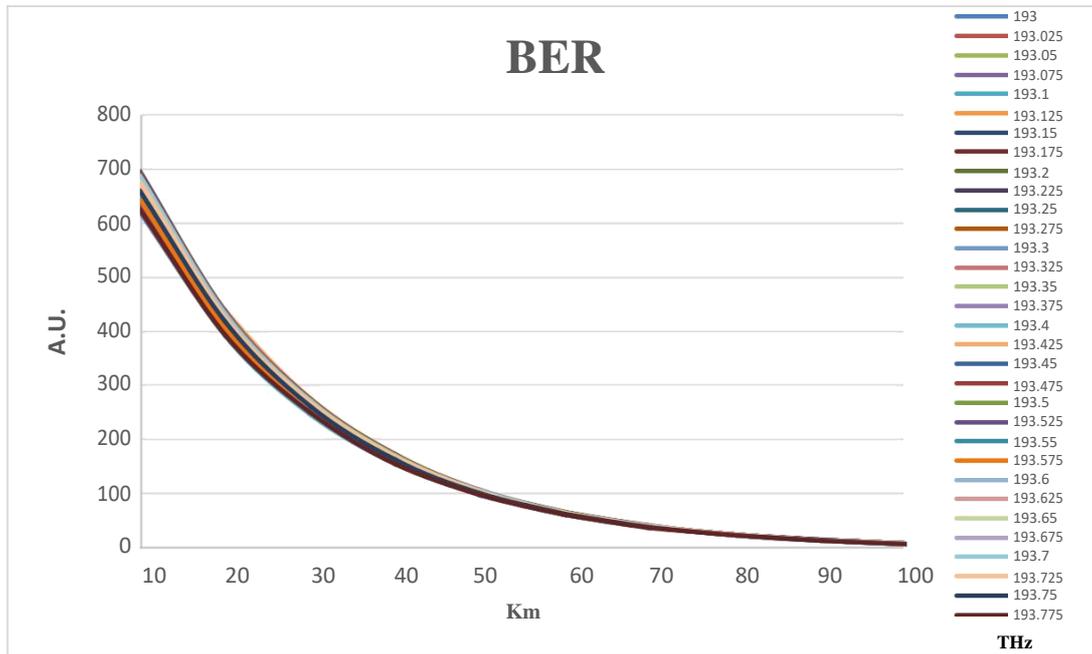


Figura 3.24. Curva de Tendencia Parámetro BER

Fuente: Diseño Propio

En las siguientes **fig. 3.25** y **fig. 3.26** se presenta las diferencias entre el parámetro Factor Q a las distancias 10 y 100 km.

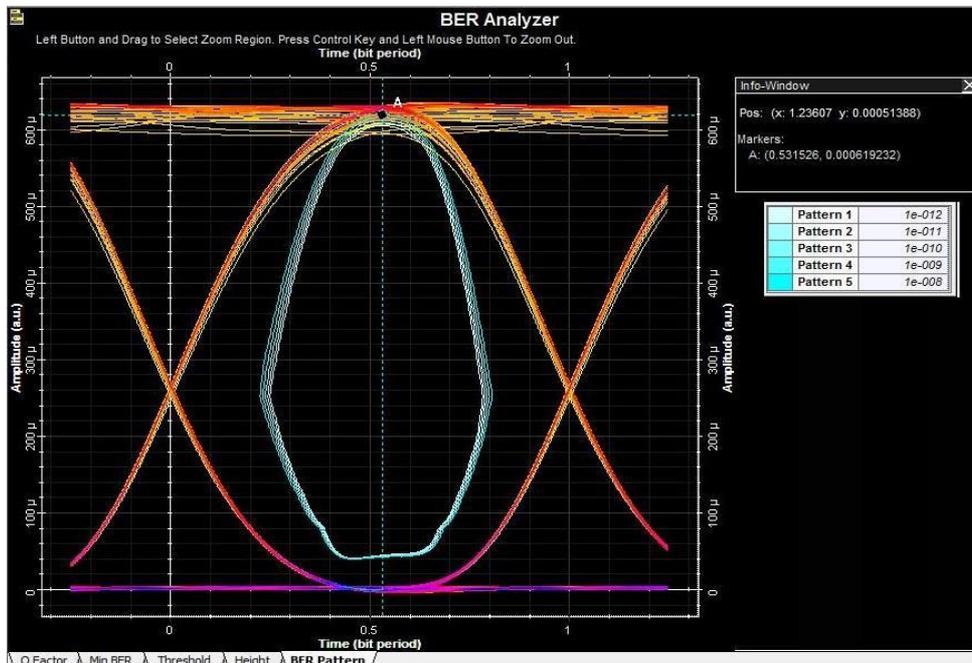


Figura 3.25. Parámetro BER a 10 km a 193 THz

Fuente: Elaboración Propia

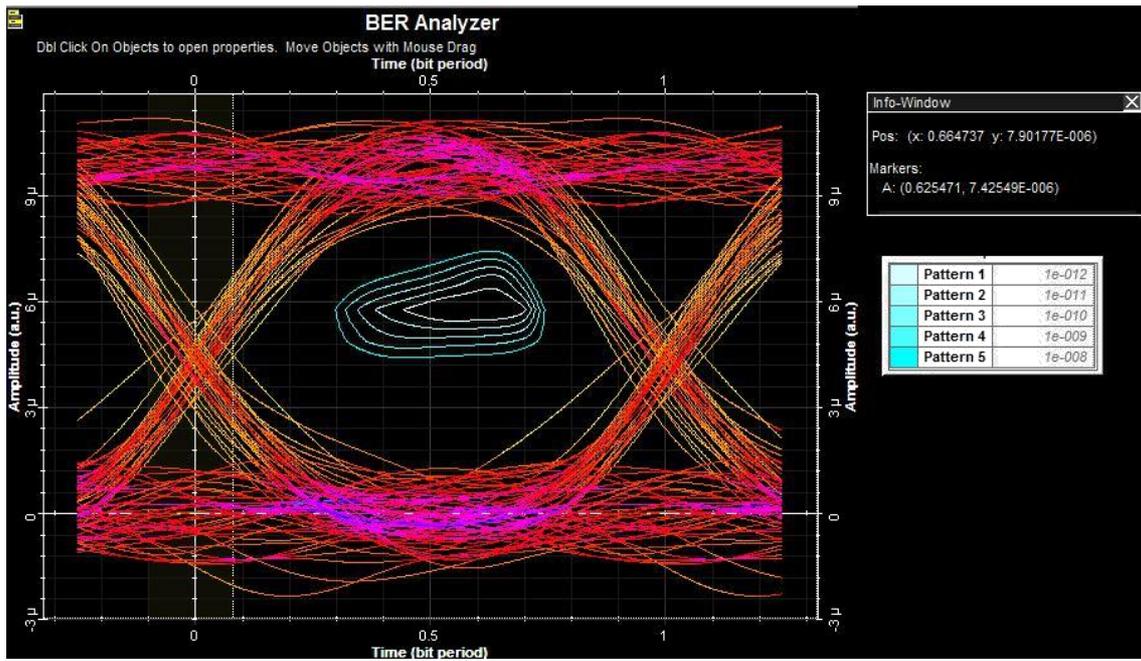


Figura 3.26. Parámetro BER a 100 km a 193 THz
Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Resultados

Luego de haber realizado el estudio de la influencia sobre los parámetros de interferencia Intersimbólica de acuerdo a las diferentes longitudes de enlace en un sistema óptico DWDM simulado, en este apartado se presentan los resultados obtenidos.

OSNR

Para el análisis del parámetro OSNR, se tomó en cuenta, al igual que con todos los parámetros, 10 longitudes de enlace. Para la longitud de 10 km, los valores de OSNR varían en un rango de 50.01 dB hasta 51.31 dB. Y para la distancia máxima de 100 km los valores obtenidos fueron de entre 11.36 dB y 14.48 dB.

JITTER

En el caso de Jitter en la menor longitud (10 km) se tiene una variación de retardo que llega hasta un 0.28% de periodo de bit. En cambio, para la mayor longitud (100 km), se obtuvieron valores de Jitter que llegan hasta el 18.57% de variación de retardo del periodo de bit.

FACTOR Q

En el caso del parámetro Factor Q para la evaluación de la calidad del sistema, según los reporte obtenidos los resultados para la menor distancia de 10 km, el rango de calidad varía desde 58.18 hasta 211.5 y para la mayor distancia de 100 km, la reducción del factor Q llega hasta 8.17. Presentándose una notable diferencia entre la mínima y máxima distancia, conociéndose también que este parámetro no cuenta con unidad de medida.

BER

En el caso de BER en la menor longitud (10 km) se obtuvieron valores llegan hasta los 694 en Unidades de Amplitud; y para la mayor longitud (100 km) los valores obtenidos en Unidades de Amplitud se degradan hasta 7.56. Y usando los valores de OSNR obtenidos podemos mediante una fórmula matemática (3), obtener valores de BER para lo cual se agregó una escala logarítmica que se encuentra en el lado derecho de la **figura 4.1**, de esta manera podemos ver que a la distancia de 10 km tenemos un valor de 10^{-63} y a los 100 km tenemos un valor de 10^{-8} .

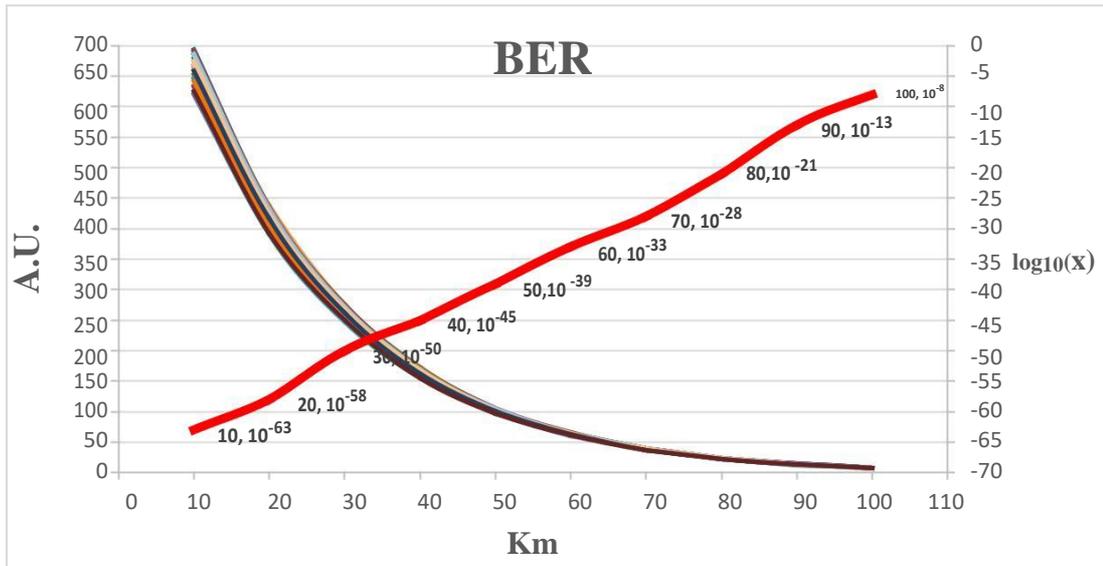


Figura 4.1. Relación BER entre unidades de amplitud y probabilidad
Fuente: Elaboración propia

4.2. Discusión de resultados

De los resultados anteriormente obtenidos, se puede resaltar que el comportamiento de cada parámetro de interferencia Intersimbólica es diferente, pero dejándose en claro que la intervención de las diferentes longitudes de enlace también es un tema de alta influencia sobre las dimensiones de los diagramas de ojo obtenidos, tal como se muestra en la siguiente **figura 4.2.**

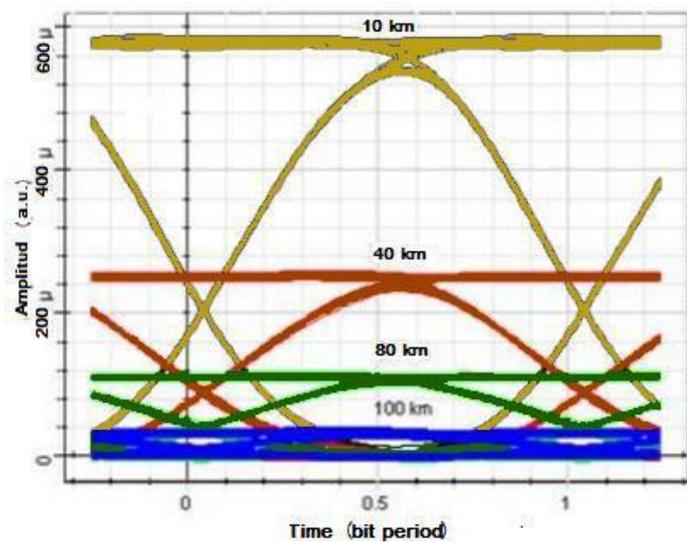


Figura 4.2. Diagramas de ojo de con Longitudes de fibra óptica de 10; 40; 80 y 100 km
Fuente: Elaboración Propia

OSNR

Para el parámetro OSNR, tomando en cuenta las 10 diferentes distancias en las que se analizó, se observó una variación notoria y descendente entre el punto de inicio (10 km) y el punto final (100 km). Según Sébastien, J.(2016), nos dice que para que un sistema funcione bien, requiere que los valores obtenidos por el parámetro OSNR estén por encima del umbral que este autor propone, que son mayor que 15 a 18 dB, en las simulaciones realizadas en el sistema evaluado se alcanza estos valores en la cercanía a los 90 km de longitud de enlace, tomándose esta distancia como punto crítico para el parámetro OSNR.

Respecto de la investigación realizada por López, A. (2014), para un sistema óptico WDM, también se presenta una tendencia decreciente pero se encuentra que la tendencia es más pronunciada para el sistema DWDM, lo cual se puede observar en la **fig.4.3.** donde se hace una comparación entre los resultados de un sistema WDM y un DWDM

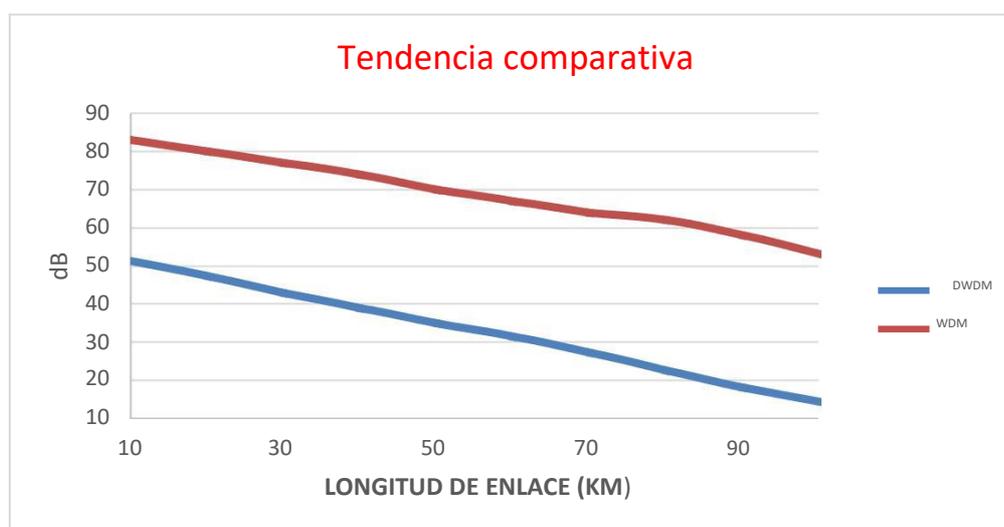


Figura 4.3. Comparación de las tendencias del parámetro OSNR de los reportes obtenidos del sistema DWDM y del sistema WDM de López, A. (2014).

Fuente: Elaboración Propia

Jitter

Para el análisis del parámetro Jitter los resultados dan una curva creciente con respecto a la distancia, la cual indica que a mayor distancia mayor es la variación de retardo presente en la transmisión de información. Según vemos en la curva de tendencia del Jitter en la **fig.3.20**, se observa que el comportamiento de la curva es notoriamente creciente de forma exponencial a partir de los 50 km y según lo planteado por Ab-Rahmam, M. y Shuhaimi, N en su publicación “Temperature Effect on Uncooled Semiconductor Laser Diode to the Network Performance System” del año 2012, proponen que el máximo valor permisible para el Jitter es de 0.2 UI o 20% de Periodo de Bit. Usando esta información como referencia, se observó que los valores del Jitter obtenidos de los reportes llegan a un máximo de 18.5% de Periodo de Bit, significando así que en esta investigación, el Jitter no sobrepasa el máximo umbral de 20% de Periodo de Bit.

Factor Q

Para el Factor Q, los valores representados en la curva de tendencia, vistas en la **fig. 3.22**, tuvieron un comportamiento descendente, mostrando una forma convergente a partir de los 60 km hasta llegar a la distancia máxima. Ab-Rahmam, M. y Shuhaimi, N especifican un valor crítico de Factor Q de 6 lo cual equivale a un valor de BER igual a 10^{-9} , extrapolando los resultados obtenidos en esta publicación hacia valores empleados para un sistema de telecomunicaciones terrestres, el BER crítico es de 10^{-12} se puede estimar un Factor Q crítico de 15, el cual en la presente investigación es alcanzado a una distancia de aproximada de 90 km de longitud de enlace, indicándose así que, según los reportes obtenidos para la calidad del sistema en este estudio, se sobrepasó el umbral permisible a los 90 km de longitud de enlace.

BER

Para el análisis de los resultados del parámetro BER, se observó que sus valores tienen el mismo comportamiento que del OSNR y muy similar al del Factor Q, descendiendo con respecto a las longitudes de los enlaces. Ab-Rahmam, M. y Shuhaimi, consideran que el umbral para este parámetro en sistemas de telecomunicación terrestres es de un BER de 10^{-12} . Realizando la comparación con los reportes de simulación obtenidos con la escala adicional de probabilidad de errores se tiene que a los 90 km de distancia se llega a alcanzar el nivel de umbral para este. Haciéndose las comparaciones entre unidades de amplitud (A.U.) y los valores obtenidos de probabilidades de BER, en la **fig.4.1**, se indica que para una distancia de 10 Km, se tiene un aproximado de probabilidad de BER de 10^{-63} , y para los 100 km, la probabilidad es de 10^{-8} .

CAPITULO V
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- En la presente investigación, se logró realizar una simulación de enlace óptico DWDM utilizando un software llamado Optisystem de versión Demostrativa. La herramienta OPTISYSTEM permitió realizar el análisis del sistema DWDM utilizando las diferentes longitudes de onda y permitiendo el ingreso de parámetros específicos principalmente en la fibra óptica monomodo tales como valores de atenuación y valores de dispersión.
- Mediante el proceso de simulación se analizaron los parámetros OSNR, BER, Jitter, y factor Q, para 32 longitudes de onda DWDM, en 10 diferentes longitudes de enlaces, teniendo como conclusión que en este sistema los valores tienden degradarse con el aumento de la distancia.
- Para el análisis de tendencia de las curvas obtenidas de los parámetros de interferencia intersimbólica, los resultados mostraron que a partir de una distancia aproximada de 90 Km de enlace óptico, se degradan significativamente los parámetros OSNR, factor Q y BER llegando hasta sus límites de calidad determinados por el nivel de umbral. En el caso del parámetro de variación del retardo (Jitter), sus valores se degradaron sin llegar al nivel de umbral de calidad hasta la distancia de 100 Km.

5.2. Recomendaciones

1. En la presente investigación se utilizó una versión demostrativa de la herramienta de simulación Optisystem en la cual se configuró un módulo WDM con separaciones de longitud de onda equivalentes a un sistema DWDM (WDM denso), sin embargo se recomienda emplear las librerías específicas DWDM en una versión completa del simulador.
2. Las estimaciones del parámetro OSNR empleadas en la presente investigación se obtuvieron a partir del análisis de los diagramas del ojo reportados por la herramienta Optisystem. Sin embargo se recomienda hacer una comparativa con el parámetro OSNR reportado por la librería propia del simulador, con una tasa de transmisión de 40 Gbps. Esto con el fin de reducir las posibilidades de error en la estimación de este parámetro, que según Astudillo, J., Ramírez, E., (2014), ocurren a partir de las transmisiones a nivel STM-256.
3. Si bien es cierto la herramienta de simulación Optisystem ha reportado resultados coherentes con escenarios reales en la presente investigación, se recomienda evaluar otros simuladores para contrastar nuestros resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIBROS

- ITU-T Manual (2009). *Optical, fibres, cables and systems*. Switzerland: ITU
- Huidobro, J., (2006). *Redes y Servicios de Telecomunicaciones*. España. Editorial Thomson.
- Agrawal, G. P. (1992). *Fiber Optic Communications Systems*, WINLEY, J. & SONS.
- Agrawal, G. P. (1995). *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press.
- Tomasi, W., (2003), *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Arizona. Prentice Hall.
- Laude, J., (2002). *DWDM Fundamentals, Components, and Applications*. Boston

TESIS

- Millan, R. (1998). *Estudio y diseño de multiplexores por división en longitud de onda (WDM) mediante efectos electroópticos, termoópticos y acustoópticos*. Universidad de Valladolid.
- Gama, J. (2012). *Análisis del Desempeño de Sistemas WDM utilizando formatos avanzados de modulación óptica a tasas superiores a 10 Gb/s*. Universidad Autónoma de México.
- Chajon, M. (2015). *Redes Roadm Como Futuro De Las Redes Dwdm En Guatemala*. Universidad De San Carlos De Guatemala.

- López, A (2014). *Diseño, análisis y simulación de enlaces ópticos que utilizan Multiplexación por División en Longitudes de Ondas a través de la práctica de laboratorio*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas en Cuba
- Analui, B. (2005). *Signal Integrity Issues in High-Speed Wireline links: Analysis and Integrated System Solutions*. Instituto de Tecnología de California en Estados Unidos.
- Muntakim, H. (2010). *Performance Analysis of a DWDM Optical Transport Network with Crosstalk*. BRAC University, Dhaka, Bangladesh.
- Poveda, G., Carrera, G., (2015). *Estudio y simulación de la propagación de solitones en una fibra monomodo*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Ayala, B., (2011). *Implementación del Método de Cambio de Fase para la Medición de Dispersión Cromática en Fibras para Telecomunicaciones*. Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., División de Fotónica, Santiago de Querétaro.
- Gualda, E., (2000). *Optimización de las prestaciones de enlaces ópticos submarinos de gran capacidad y larga distancia mediante el control de la dispersión*. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Astudillo, J., Ramírez, E., (2014). *Manual para la caracterización de la fibra óptica en DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.

PUBLICACIONES

- Fundamental of Photonics (2000). *Fiber Optic Telecommunications*, Recuperado de: <https://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2008.pdf>
- OpenStax- CNX (2011). *Interferencia Intersimbólica (ISI)*.
- López, J. G., (2011). *Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM*. Dialnet. Vol. 20, Número 31.

- *Buelvas, D. A. (2009). Redes Ópticas Dwdm: Diseño E Implementación*
- Del Río, C., Rodríguez, P., (2013). *Fibras ópticas: Interacción dispersión-chirp en sistemas ópticos modulados directamente*. Óptica Pura y Aplicada. Vol. 46.
- Sébastien, J. (2016). *Fibre optic communication system design guides – Part 12: In-band optical signal-to-noise ratio (OSNR)*. Edición 1, pag. 33.
- Keith Willox. (2003). *Q Factor: The Wrong Answer for Service Providers and NEMs*.
- Behera, D., Varshney, S., Srivastava, S., Tiwari S. (2011, 16 de diciembre). *Eye Diagram Basics: Reading and applying eye diagrams*. EDN NETWORK.
Recuperado: <http://www.edn.com/design/test-and-measurement/4389368/Eye-Diagram-Basics-Reading-and-applying-eye-diagrams>
- Wolfe, J.(2017). dB: *What is a decibel?*. PHYSCLIPS.
<http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/dB.htm>

POWER POINT

- Chakma, T. (2005). Optical Signal to Noise Ratio (OSNR) [diapositivas de PowerPoint].Recuperado de: <http://cdn.optiwave.com/wp-content/uploads/2015/10/TC-Optical-Signal-to-Noise-Ratio-OSNR.ppt>

ANEXOS

ANEXO 1

REPORTES FINALES DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS OSNR, FACTOR Q, JITTER Y BER, ESTABLECIDOS EN 10 TABLAS DE EXCEL CON SU RESPECTIVA DISTANCIA EN KILÓMETROS.

Reporte final de parámetros a 10 km de longitud de enlace.

10 km	OSNR	FACTOR Q	JITTER	BER
193	50.37	58.18	0.0162	619.23
193.025	50.06	67.26	0.0093	631.64
193.05	50.88	90.14	0.0102	651.64
193.075	51.01	54.33	0.0125	620.73
193.1	51.20	64.81	0.0089	624.06
193.125	51.19	125.52	0.0037	673.08
193.15	51.10	159.77	0.0045	685.35
193.175	51.09	172.70	0.0040	690.64
193.2	51.08	81.63	0.0093	652.12
193.225	51.06	69.33	0.0093	645.50
193.25	51.00	119.72	0.0058	678.89
193.275	50.22	90.93	0.0075	658.82
193.3	51.03	102.11	0.0081	663.19
193.325	51.03	66.87	0.0091	634.65
193.350	51.20	120.07	0.0047	634.65
193.375	51.20	176.21	0.0035	691.01
193.4	51.32	193.89	0.0035	694.50
193.425	51.18	211.50	0.0029	645.13
193.45	51.22	209.49	0.0028	694.02
193.475	51.29	210.38	0.0042	690.98
193.5	51.27	145.91	0.0043	686.29
193.525	51.27	60.32	0.0098	633.81
193.55	51.27	74.78	0.0082	645.67
193.575	51.27	74.59	0.0087	641.94
193.6	50.73	102.84	0.0078	668.03
193.625	50.73	100.59	0.0062	666.08
193.65	50.73	104.82	0.0070	669.01
193.675	51.02	107.85	0.0042	685.67
193.7	51.03	151.72	0.0039	685.44
193.725	51.02	118.31	0.0045	674.88
193.75	50.08	114.09	0.0048	657.97
193.775	50.01	101.82	0.0058	625.15

Reporte final de parámetros a 20 km de longitud de enlace.

20 km	OSNR	FACTOR Q	JITTER	BER
193	46.53	58.28	0.0151	392.12
193.025	46.64	65.81	0.0106	398.95
193.05	46.75	86.25	0.0127	410.02
193.075	46.86	56.33	0.0161	393.85
193.1	46.77	59.55	0.0098	390.22
193.125	46.87	128.76	0.0042	426.90
193.15	46.98	140.07	0.0062	431.95
193.175	46.09	155.79	0.0057	433.57
193.2	47.16	86.48	0.0088	413.14
193.225	47.07	63.18	0.0103	405.80
193.25	47.07	106.83	0.0081	423.06
193.275	47.18	90.15	0.0089	415.66
193.3	46.85	99.21	0.0099	417.18
193.325	46.96	61.46	0.0095	397.75
193.350	46.06	136.67	0.0051	432.56
193.375	46.17	169.10	0.0044	435.34
193.4	47.38	183.27	0.0048	437.45
193.425	47.27	190.18	0.0041	438.40
193.45	47.16	173.08	0.0044	436.56
193.475	47.28	170.59	0.0060	435.83
193.5	46.93	156.20	0.0044	434.00
193.525	46.82	61.86	0.0113	401.33
193.55	46.26	73.70	0.0075	408.21
193.575	46.25	71.29	0.0104	405.72
193.6	47.00	114.43	0.0098	422.64
193.625	47.11	101.32	0.0082	419.38
193.65	47.00	92.71	0.0073	418.02
193.675	47.37	137.18	0.0042	432.24
193.7	47.23	128.84	0.0053	429.32
193.725	46.33	108.57	0.0059	424.20
193.75	47.01	107.81	0.0061	416.88
193.775	46.93	95.31	0.0078	392.97

Reporte final de parámetros a 30 km de longitud de enlace

30 km	OSNR	FACTOR Q	JITTER	BER
193	42.14	57.14	0.0170	246.84
193.025	42.26	64.53	0.0132	252.16
193.05	42.37	82.58	0.0132	257.69
193.075	42.48	58.07	0.0125	250.05
193.1	42.67	57.35	0.0117	246.75
193.125	42.88	118.43	0.0058	268.66
193.15	42.77	129.70	0.0058	272.01
193.175	42.60	139.27	0.0074	273.94
193.2	42.80	87.46	0.0114	264.69
193.225	42.36	62.81	0.0092	256.32
193.25	42.26	92.30	0.0104	263.89
193.275	42.36	80.13	0.0129	258.14
193.3	42.79	84.94	0.0104	258.25
193.325	42.65	59.14	0.0110	252.16
193.350	42.26	121.08	0.0070	272.78
193.375	42.15	132.27	0.0070	274.11
193.4	42.92	139.28	0.0075	275.20
193.425	42.88	145.72	0.0056	275.57
193.45	42.96	134.83	0.0060	274.41
193.475	42.86	129.32	0.0070	274.05
193.5	42.80	123.71	0.0046	271.77
193.525	42.96	64.67	0.0108	254.90
193.55	42.22	77.46	0.0081	260.54
193.575	42.37	67.69	0.0137	256.19
193.6	42.73	95.17	0.0120	263.93
193.625	42.33	87.32	0.0085	259.86
193.65	42.34	95.36	0.0076	264.99
193.675	42.13	105.82	0.0076	271.61
193.7	42.67	111.11	0.0068	270.56
193.725	42.39	109.17	0.0083	267.40
193.75	42.56	98.67	0.0098	260.94
193.775	42.14	91.61	0.0075	249.41

Reporte final de parámetros a 40 km de longitud de enlace

40 km	OSNR	FACTOR Q	JITTER	BER
193	38.79	49.87	0.0203	154.45
193.025	38.85	59.49	0.0151	158.58
193.05	38.62	79.13	0.0146	162.83
193.075	38.76	52.00	0.0157	157.68
193.1	38.59	54.46	0.0125	155.63
193.125	38.59	98.73	0.0085	168.39
193.15	38.66	105.61	0.0093	170.82
193.175	38.76	94.52	0.0076	170.61
193.2	38.99	80.33	0.0105	166.04
193.225	38.96	62.94	0.0113	161.79
193.25	38.76	76.96	0.0119	163.82
193.275	38.68	69.68	0.0130	162.49
193.3	38.69	73.94	0.0149	162.67
193.325	38.86	55.20	0.0129	158.91
193.350	39.00	86.82	0.0095	169.36
193.375	38.85	97.93	0.0094	171.22
193.4	38.79	104.47	0.0111	172.43
193.425	38.85	102.02	0.0087	172.23
193.45	39.00	94.26	0.0092	170.65
193.475	39.00	97.77	0.0080	171.70
193.5	38.69	97.54	0.0097	170.11
193.525	38.79	59.34	0.0139	160.91
193.55	38.25	73.44	0.0142	162.21
193.575	38.82	62.97	0.0145	161.31
193.6	38.89	81.95	0.0144	166.23
193.625	38.65	75.58	0.0119	162.94
193.65	38.70	82.07	0.0119	166.16
193.675	38.59	82.88	0.0106	167.24
193.7	39.08	87.55	0.0087	168.63
193.725	38.98	90.65	0.0116	167.71
193.75	38.52	77.22	0.0137	162.16
193.775	38.90	71.51	0.0126	154.47

Reporte final de parámetros a 50 km de longitud de enlace

50 km	OSNR	FACTOR Q	JITTER	BER
193	34.61	46.06	0.0247	97.93
193.025	34.63	46.23	0.0175	99.05
193.05	34.64	56.61	0.0159	102.03
193.075	34.72	48.70	0.0233	99.18
193.1	34.68	48.23	0.0166	98.77
193.125	34.72	70.52	0.0142	104.41
193.15	34.70	76.08	0.0143	105.43
193.175	34.75	73.63	0.0130	105.95
193.2	34.70	61.57	0.0174	103.52
193.225	34.80	50.81	0.0164	101.52
193.25	34.80	57.48	0.0181	102.58
193.275	34.78	58.43	0.0180	102.34
193.3	34.63	56.54	0.0177	102.37
193.325	34.65	46.85	0.0194	99.34
193.350	34.70	63.14	0.0154	103.56
193.375	34.65	66.72	0.0131	105.16
193.4	34.61	76.21	0.0162	106.44
193.425	34.70	71.72	0.0135	105.30
193.45	34.72	69.37	0.0138	104.70
193.475	34.73	73.87	0.0115	105.39
193.5	34.76	68.60	0.0166	104.39
193.525	34.79	50.60	0.0184	100.84
193.55	34.63	56.89	0.0151	101.86
193.575	34.71	53.33	0.0185	101.70
193.6	34.80	60.97	0.0206	101.99
193.625	34.82	59.04	0.0158	102.30
193.65	34.79	57.06	0.0181	103.17
193.675	34.92	62.72	0.0144	105.18
193.7	34.82	62.34	0.0151	104.06
193.725	34.72	63.56	0.0221	103.02
193.75	34.72	62.12	0.0169	101.07
193.775	34.72	57.75	0.0160	97.35

Reporte final de parámetros a 60 km de longitud de enlace

60 km	OSNR	FACTOR Q	JITTER	BER
193	30.63	37.14	0.0271	61.21
193.025	30.73	41.03	0.0196	62.54
193.05	30.84	43.98	0.0237	63.73
193.075	30.55	37.10	0.0288	61.63
193.1	30.37	37.70	0.0249	61.21
193.125	30.57	48.45	0.0216	64.39
193.15	30.66	49.15	0.0265	65.10
193.175	31.00	44.20	0.0197	65.22
193.2	31.13	47.70	0.0220	65.02
193.225	31.37	38.98	0.0245	63.37
193.25	31.27	45.05	0.0277	64.69
193.275	31.37	42.68	0.0272	64.03
193.3	30.63	41.28	0.0224	63.46
193.325	30.76	41.82	0.0256	62.29
193.35	30.90	43.76	0.0254	64.73
193.375	30.93	46.01	0.0204	65.55
193.4	31.48	49.91	0.0241	65.86
193.425	31.00	47.10	0.0208	65.80
193.45	31.02	48.74	0.0214	65.31
193.475	30.95	52.15	0.0191	65.84
193.5	30.91	46.31	0.0190	65.02
193.525	30.40	40.88	0.0270	62.81
193.55	30.40	45.40	0.0202	64.02
193.575	30.40	38.26	0.0225	63.31
193.6	30.63	43.11	0.0307	63.68
193.625	30.96	40.53	0.0281	62.97
193.65	30.97	39.11	0.0259	63.85
193.675	31.11	42.67	0.0229	64.76
193.7	31.13	43.10	0.0233	64.59
193.725	31.01	45.78	0.0194	64.49
193.75	31.01	43.26	0.0223	63.21
193.775	31.01	44.12	0.0302	60.99

Reporte final de parámetros a 70 km de longitud de enlace

70 km	OSNR	FACTOR Q	JITTER	BER
193	26.44	24.28	0.0400	37.48
193.025	26.17	31.15	0.0423	38.80
193.05	26.24	29.78	0.0387	39.14
193.075	26.32	29.94	0.0422	38.48
193.1	26.02	27.53	0.0368	37.33
193.125	26.44	32.43	0.0251	39.42
193.15	26.53	34.11	0.0362	40.48
193.175	26.62	30.44	0.0316	40.61
193.2	26.65	32.10	0.0391	39.19
193.225	26.76	26.34	0.0360	38.17
193.25	26.90	31.56	0.0400	39.72
193.275	26.93	32.48	0.0424	39.52
193.3	26.65	32.27	0.0458	39.59
193.325	26.93	30.97	0.0381	38.16
193.35	26.62	29.84	0.0315	39.62
193.375	26.77	31.74	0.0284	40.33
193.4	26.85	32.30	0.0365	39.95
193.425	26.83	31.07	0.0328	40.23
193.45	26.92	31.96	0.0307	39.89
193.475	27.13	30.09	0.0321	40.14
193.5	27.23	31.95	0.0368	39.96
193.525	27.02	32.45	0.0348	39.24
193.55	27.00	28.40	0.0370	38.56
193.575	27.93	30.06	0.0386	38.89
193.6	26.24	29.66	0.0411	38.41
193.625	26.83	31.33	0.0337	39.17
193.65	26.93	27.10	0.0351	39.02
193.675	26.56	31.14	0.0435	39.69
193.7	26.85	29.83	0.0383	39.74
193.725	26.66	29.76	0.0444	39.57
193.75	26.66	27.48	0.0350	37.73
193.775	26.66	27.64	0.0472	36.94

Reporte final de parámetros a 80 km de longitud de enlace

80 km	OSNR	FACTOR Q	JITTER	BER
193	21.58	18.63	0.0587	22.90
193.025	21.67	17.42	0.0538	22.89
193.05	21.75	19.43	0.0495	23.48
193.075	21.86	19.04	0.0586	23.41
193.1	21.51	18.79	0.0676	22.51
193.125	21.93	20.37	0.0496	23.59
193.15	21.60	21.77	0.0600	24.38
193.175	21.68	19.93	0.0488	23.75
193.2	21.58	19.85	0.0694	23.47
193.225	21.79	18.14	0.0540	23.33
193.25	21.86	20.81	0.0531	23.93
193.275	21.93	18.45	0.0582	23.77
193.3	22.28	17.98	0.0604	23.44
193.325	22.03	21.66	0.0593	23.70
193.35	22.13	18.54	0.0458	24.26
193.375	22.13	20.53	0.0508	24.08
193.4	22.28	20.72	0.0559	23.98
193.425	22.21	20.10	0.0511	24.22
193.45	22.21	20.64	0.0544	24.25
193.475	22.12	18.14	0.0491	23.78
193.5	22.61	21.12	0.0571	24.37
193.525	21.92	19.89	0.0542	24.08
193.55	21.65	20.64	0.0485	23.77
193.575	21.75	17.95	0.0542	23.15
193.6	21.59	18.61	0.0633	23.30
193.625	21.66	19.64	0.0607	23.60
193.65	21.79	18.83	0.0694	23.39
193.675	21.86	19.62	0.0640	24.05
193.7	21.58	19.91	0.0526	24.28
193.725	21.93	20.50	0.0751	24.24
193.75	21.97	20.23	0.0646	22.97
193.775	21.97	19.23	0.0643	22.55

Reporte final de parámetros a 90 km de longitud de enlace

90 km	OSNR	FACTOR Q	JITTER	BER
193	18.06	11.54	0.1002	13.15
193.025	18.00	12.58	0.0756	13.60
193.05	17.26	13.91	0.0871	14.27
193.075	17.36	12.06	0.0777	13.45
193.1	16.90	12.16	0.1043	13.07
193.125	16.25	13.03	0.0856	13.88
193.15	16.39	12.88	0.0854	13.95
193.175	17.39	13.63	0.0784	14.14
193.2	17.50	12.11	0.0804	13.67
193.225	17.24	12.15	0.0678	13.49
193.25	16.23	13.73	0.0902	14.44
193.275	16.37	13.27	0.0970	14.38
193.3	15.85	12.88	0.1037	13.90
193.325	15.95	14.14	0.0816	14.17
193.35	16.29	12.58	0.0840	14.10
193.375	16.93	13.73	0.0935	14.21
193.4	16.90	12.95	0.0863	13.79
193.425	17.27	12.92	0.0870	14.02
193.45	16.99	13.88	0.1031	14.46
193.475	18.01	11.68	0.0813	13.61
193.5	16.26	13.12	0.0947	14.30
193.525	17.26	14.16	0.0772	14.69
193.55	17.26	13.31	0.0765	13.73
193.575	17.26	13.31	0.0979	13.53
193.6	16.26	12.25	0.0906	13.41
193.625	16.60	12.29	0.0575	13.38
193.65	17.70	11.48	0.0941	13.54
193.675	18.06	12.28	0.1084	14.03
193.7	18.06	12.34	0.0895	13.85
193.725	17.93	12.48	0.1020	13.64
193.75	17.93	12.83	0.0888	13.24
193.775	17.93	11.99	0.0784	13.20

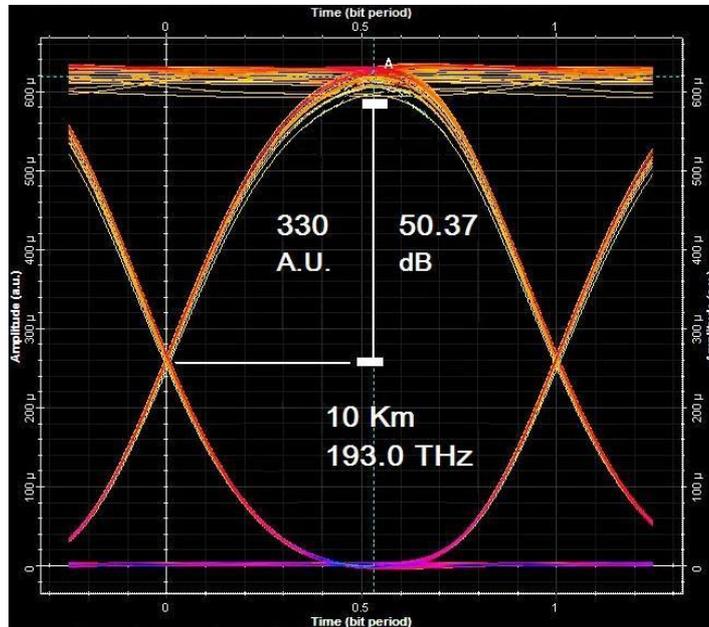
Reporte final de parámetros a 100 km de longitud de enlace

100	OSNR	FACTOR Q	JITTER	BER
193	13.06	7.75	0.1806	7.43
193.025	13.32	9.50	0.1304	8.27
193.05	12.69	8.95	0.1395	7.88
193.075	12.01	8.00	0.1454	6.73
193.1	12.46	8.12	0.1600	7.28
193.125	14.34	8.38	0.1049	7.52
193.15	13.37	8.01	0.1186	7.42
193.175	13.27	8.40	0.1175	7.86
193.2	12.46	7.97	0.1438	7.40
193.225	12.99	8.48	0.1665	7.84
193.25	13.03	8.82	0.1465	8.12
193.275	14.03	7.15	0.1295	7.11
193.3	12.46	8.60	0.1443	7.69
193.325	12.36	8.51	0.1319	7.65
193.35	12.36	8.07	0.1857	7.54
193.375	12.36	8.97	0.1551	8.04
193.4	12.46	8.06	0.1444	7.43
193.425	12.51	8.19	0.1443	7.71
193.45	13.05	8.90	0.1467	8.12
193.475	13.62	8.17	0.1469	7.51
193.5	14.49	8.17	0.1554	8.09
193.525	14.12	9.02	0.1254	8.12
193.55	14.06	8.96	0.1246	8.12
193.575	12.27	7.46	0.1241	7.47
193.6	11.36	7.13	0.1748	7.18
193.625	11.27	8.62	0.1344	7.56
193.65	11.93	7.17	0.1568	7.20
193.675	12.28	7.04	0.1256	6.79
193.7	13.62	8.13	0.1442	7.56
193.725	13.83	7.77	0.1726	6.92
193.75	11.30	8.03	0.1227	7.40
193.775	12.63	7.67	0.1397	7.09

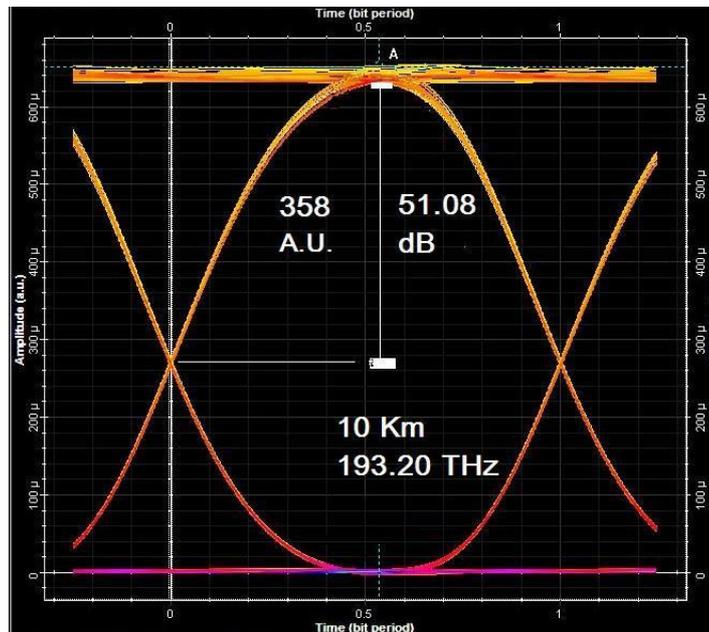
ANEXO 2

SIMULACIONES DEL PARAMETRO OSNR, ESPECIFICANDO DISTANCIA EN KILOMETROS Y LONGITUD DE ONDA EMPLEADA.

OSNR - 10 Km

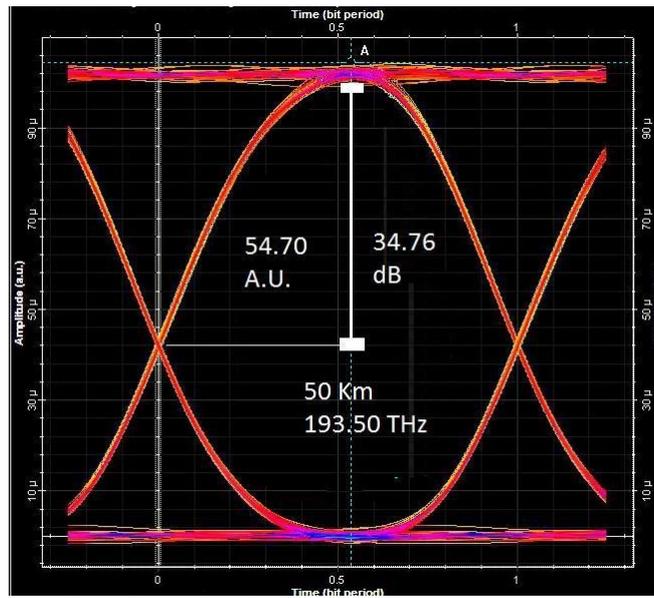


Simulación de OSNR a 10 Km con longitud de onda de 193 THz
Resultado: 50.37 dB

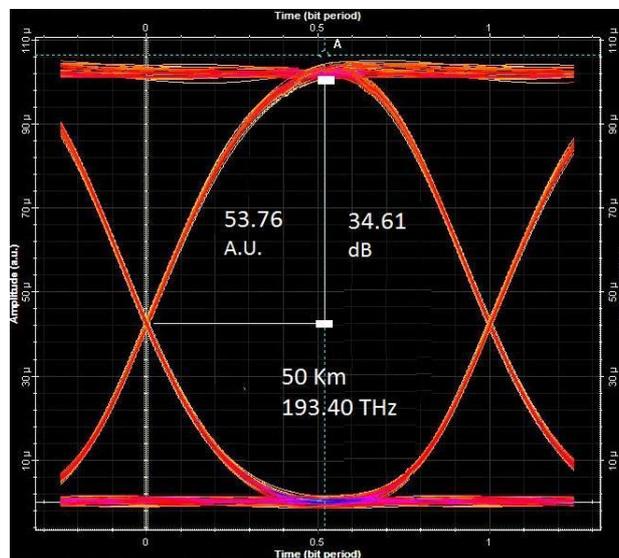


Simulación de OSNR a 10 Km con longitud de onda de 193.20 THz
Resultado: 51.08 dB

OSNR - 50 Km

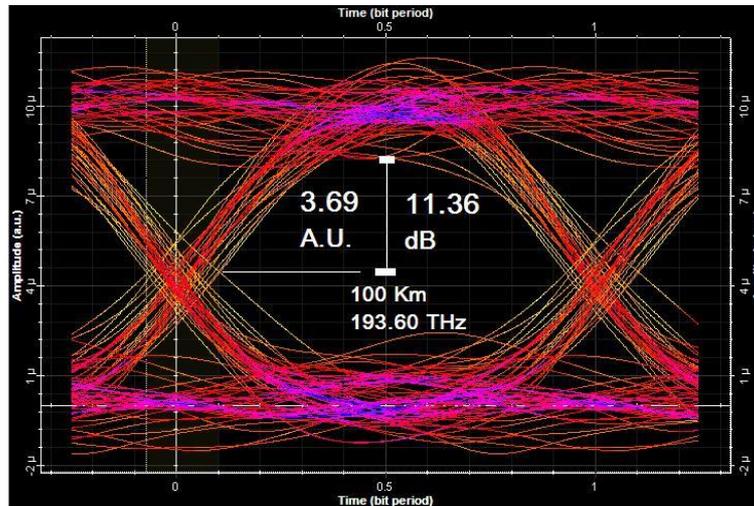


**Simulación de OSNR a 50 Km con longitud de onda de 193.50 THz
Resultado: 34.76 dB**

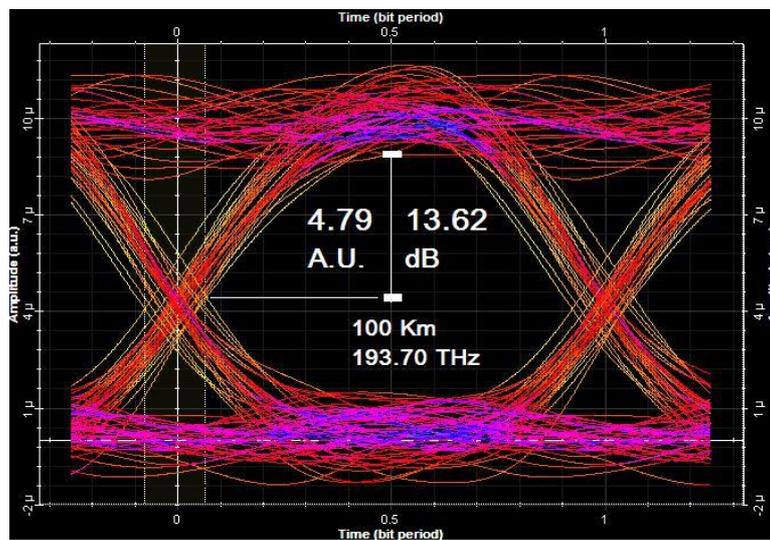


**Simulación de OSNR a 50 Km con longitud de onda de 193.40 THz
Resultado: 34.61 dB**

OSNR - 100 Km



Simulación de OSNR a 100 Km con longitud de onda de 193.60 THz Resultado: 11.36 dB

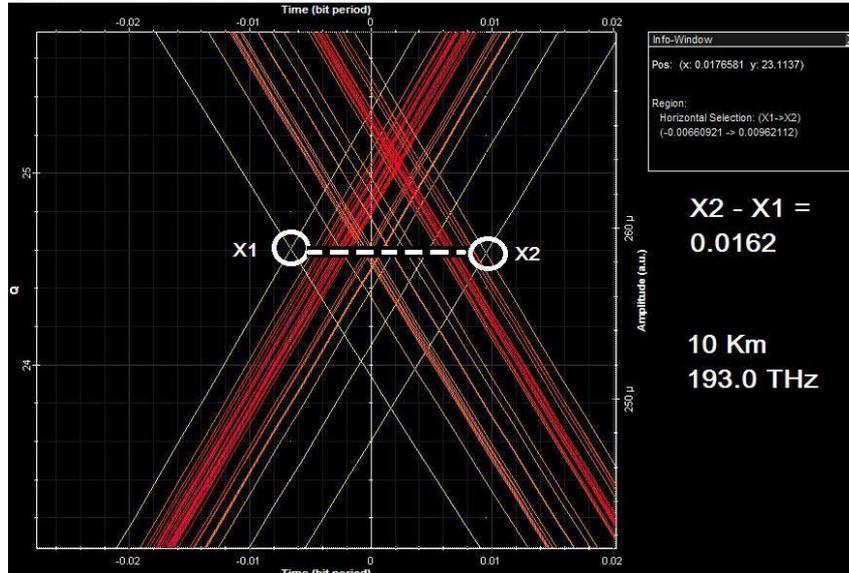


Simulación de OSNR a 100 Km con longitud de onda de 193.70 THz Resultado: 13.62 dB

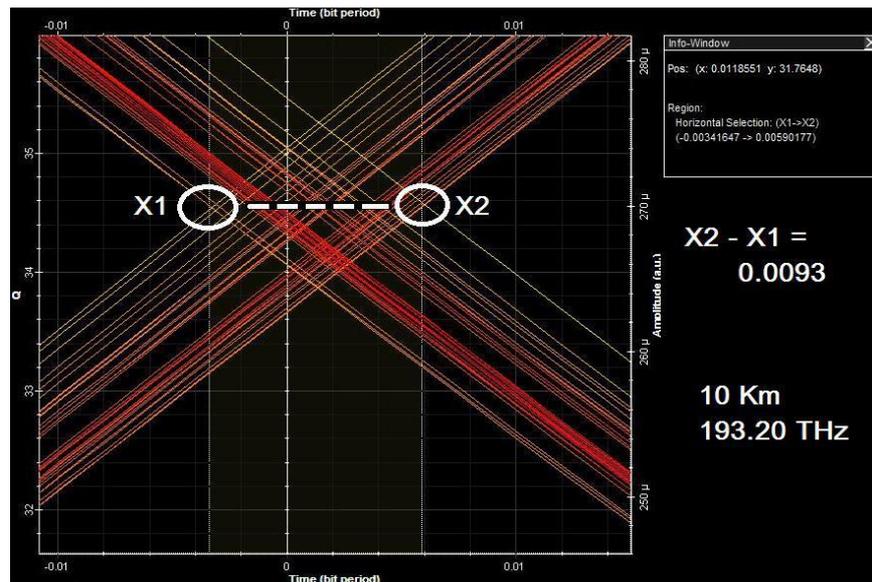
ANEXO 3

SIMULACIONES DEL PARAMETRO JITTER, ESPECIFICANDO DISTANCIA EN KILOMETROS Y LONGITUD DE ONDA EMPLEADA.

Jitter – 10 Km

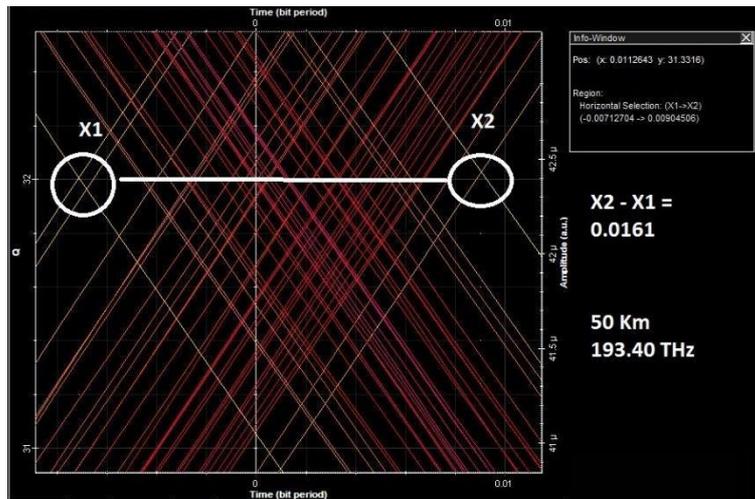


**Simulación de Jitter a 10 Km con longitud de onda de 193.0 THz
Resultado: 0.0162 = 1.62% de Periodo de Bit**

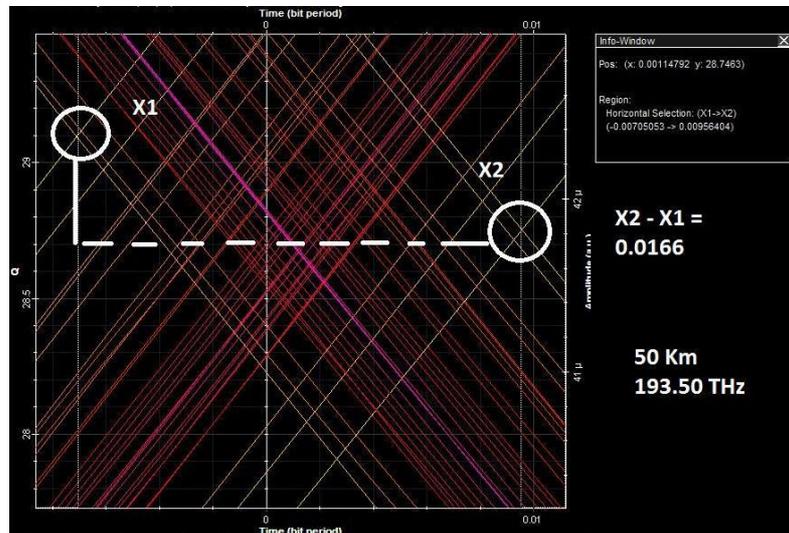


**Simulación de Jitter a 10 Km con longitud de onda de 193.20 THz
Resultado: 0.0093 = 0.93% de Periodo de Bit**

Jitter – 50 Km

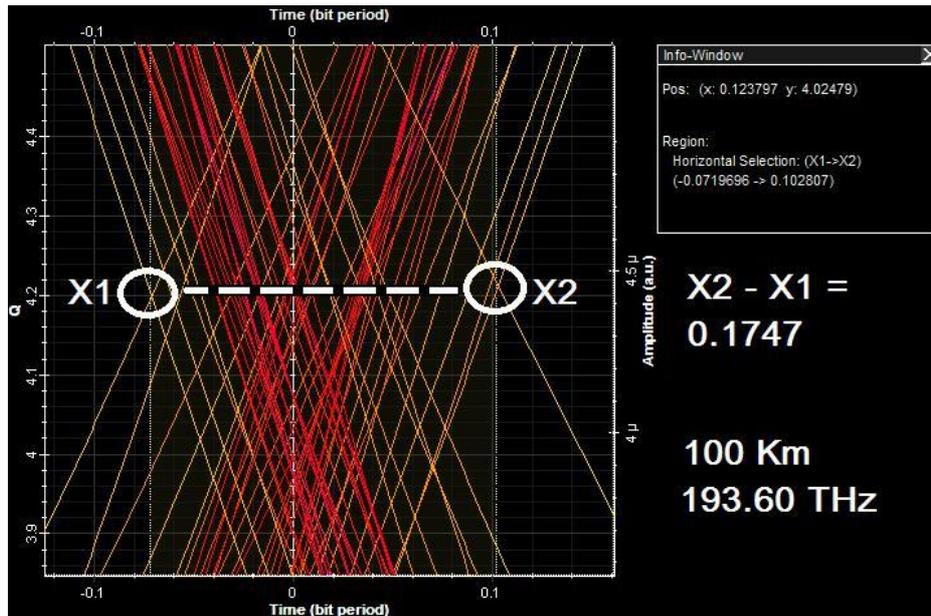


**Simulación de Jitter a 50 Km con longitud de onda de 193.40 THz
Resultado: 0.0161 = 1.61% de Periodo de Bit**

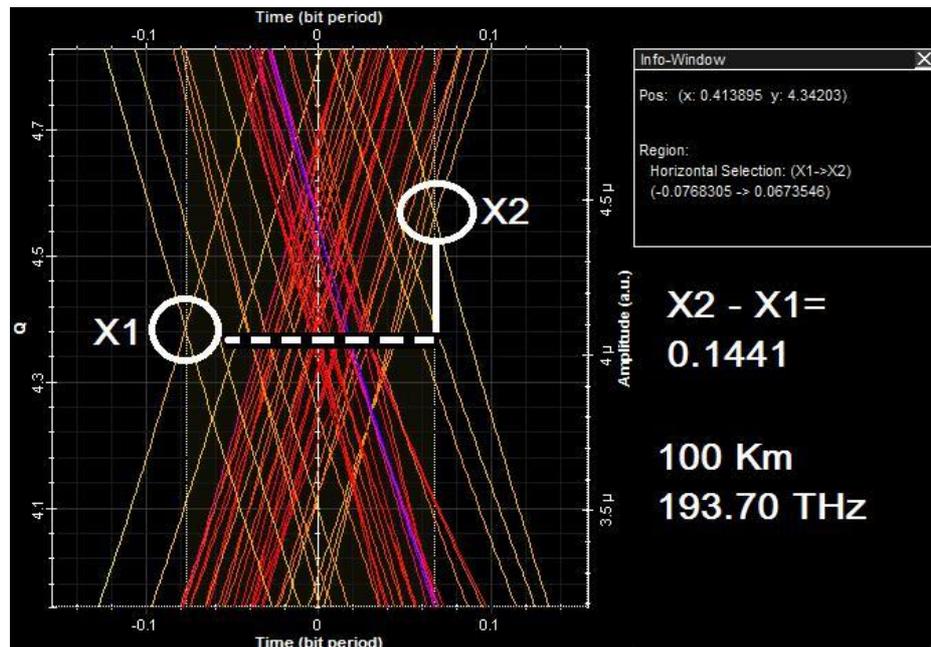


**Simulación de Jitter a 50 Km con longitud de onda de 193.50 THz
Resultado: 0.0166 = 1.66% de Periodo de Bit**

Jitter – 100 Km



Simulación de Jitter a 100 Km con longitud de onda de 193.60 THz
Resultado: $0.1747 = 17.47\%$ de Periodo de Bit

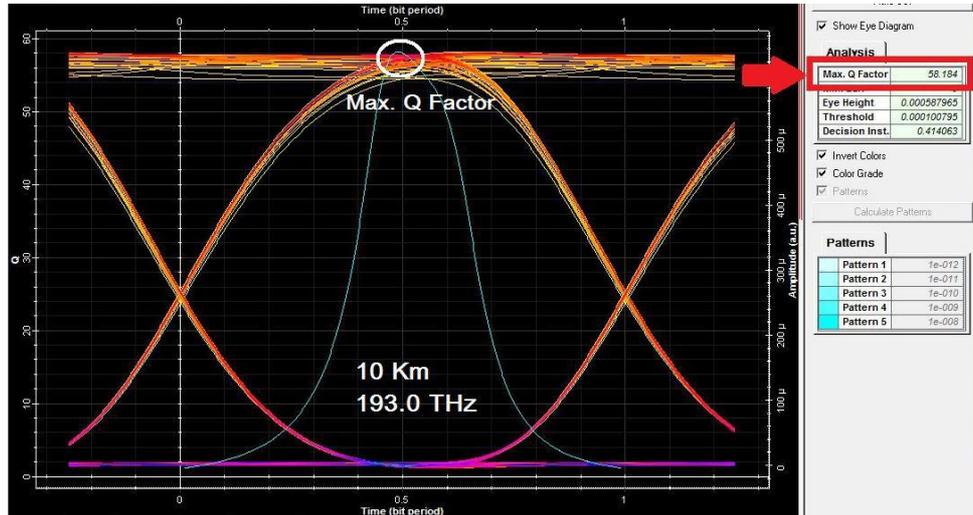


Simulación de Jitter a 100 Km con longitud de onda de 193.70 THz
Resultado: $0.1441 = 14.41\%$ de Periodo de Bit

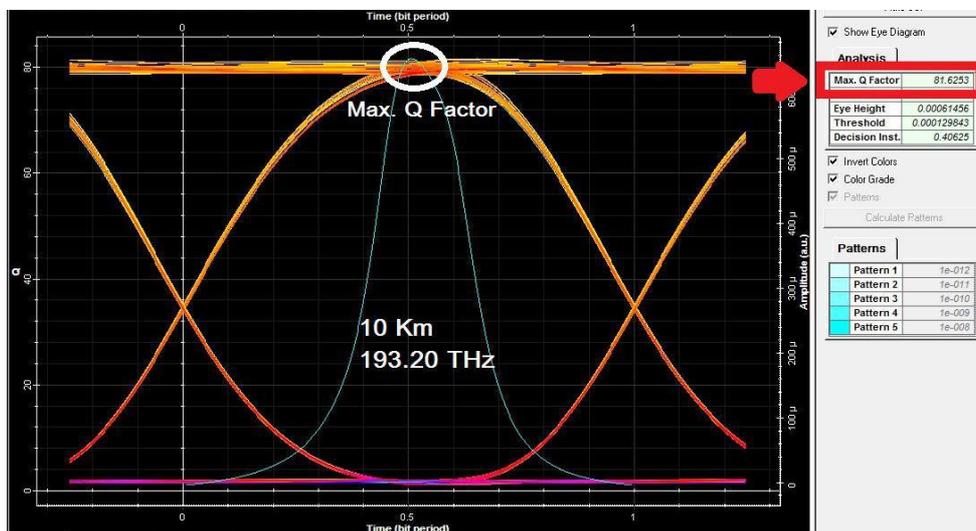
ANEXO 4

SIMULACIONES DEL PARAMETRO FACTOR Q, ESPECIFICANDO DISTANCIA EN KILOMETROS Y LONGITUD DE ONDA EMPLEADA.

Factor Q – 10 Km

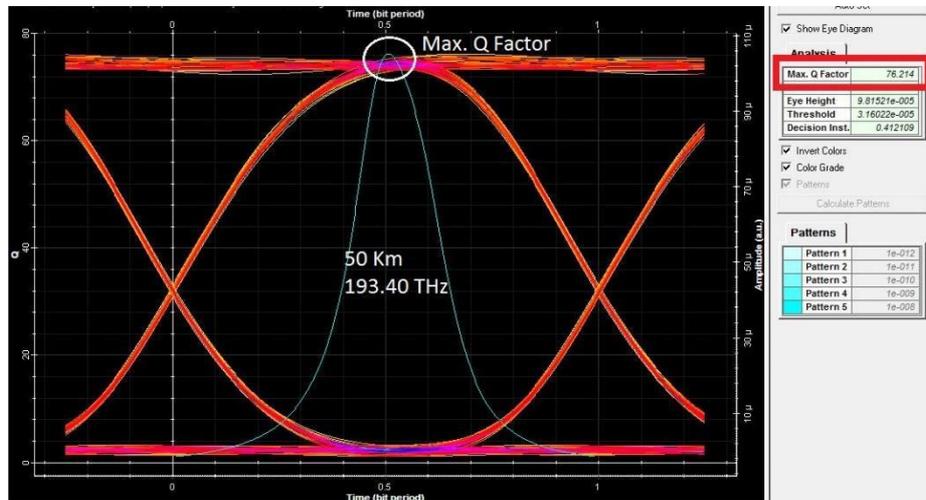


Simulación de Factor Q a 10 Km con longitud de onda de 193.0 THz
Resultado: 58.18

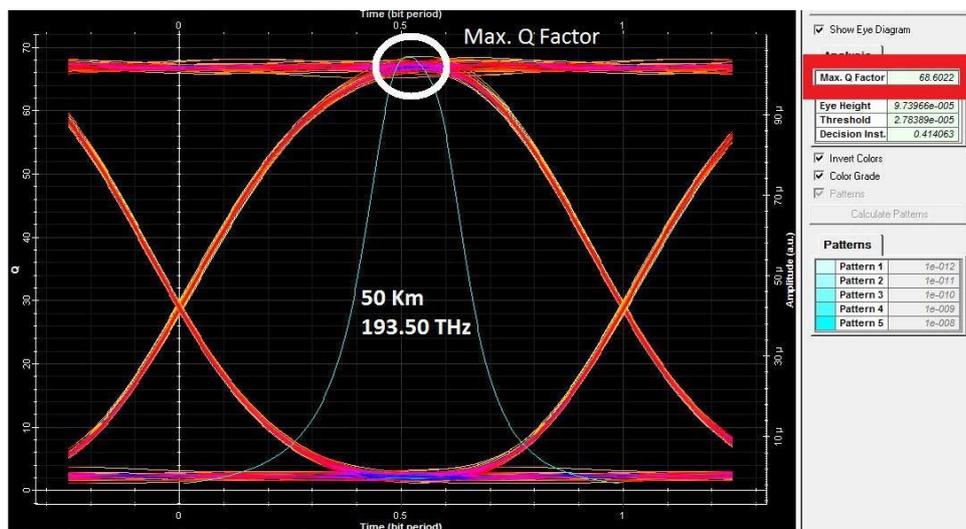


Simulación de Factor Q a 10 Km con longitud de onda de 193.20 THz
Resultado: 81.62

Factor Q – 50 Km

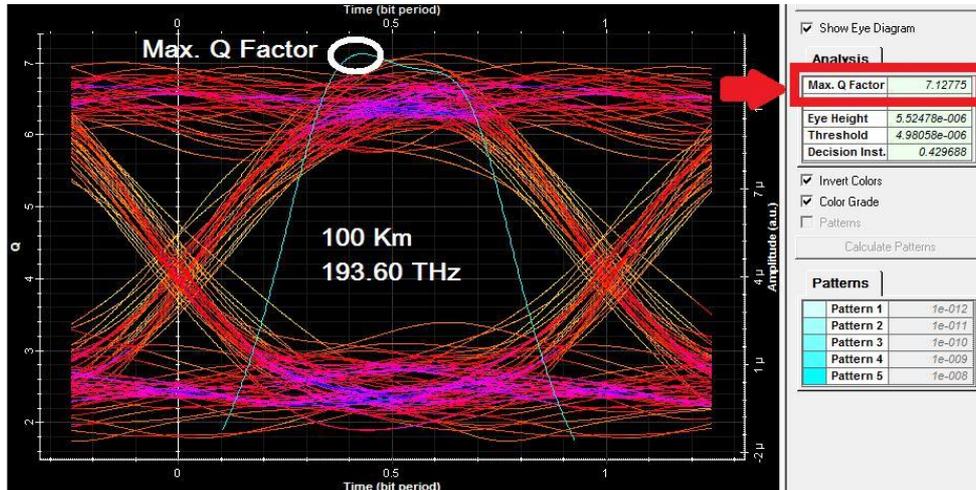


**Simulación de Factor Q a 50 Km con longitud de onda de 193.40 THz
Resultado: 76.21**

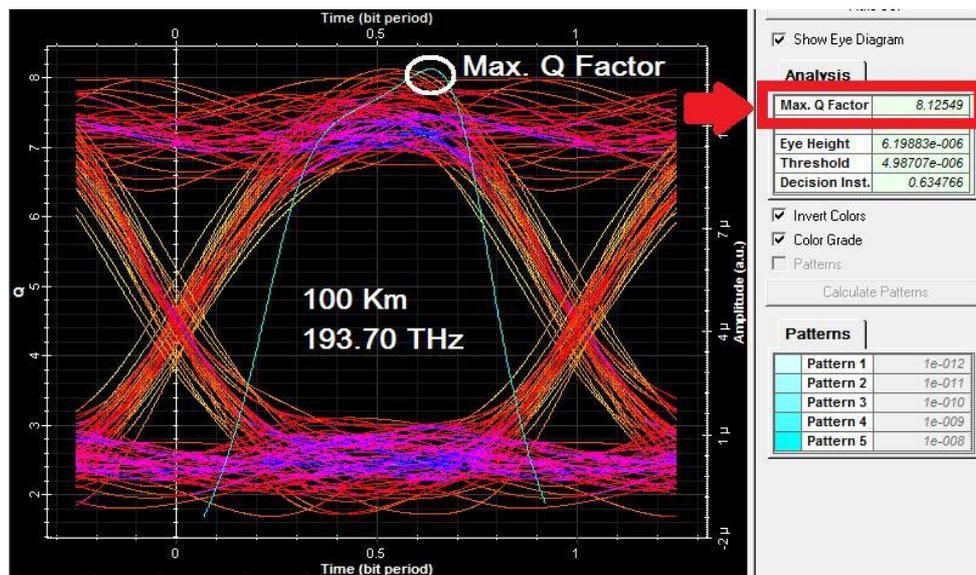


**Simulación de Factor Q a 50 Km con longitud de onda de 193.50 THz
Resultado: 66.60**

Factor Q – 100 Km



**Simulación de Factor Q a 100 Km con longitud de onda de 193.60 THz
Resultado: 7.12**

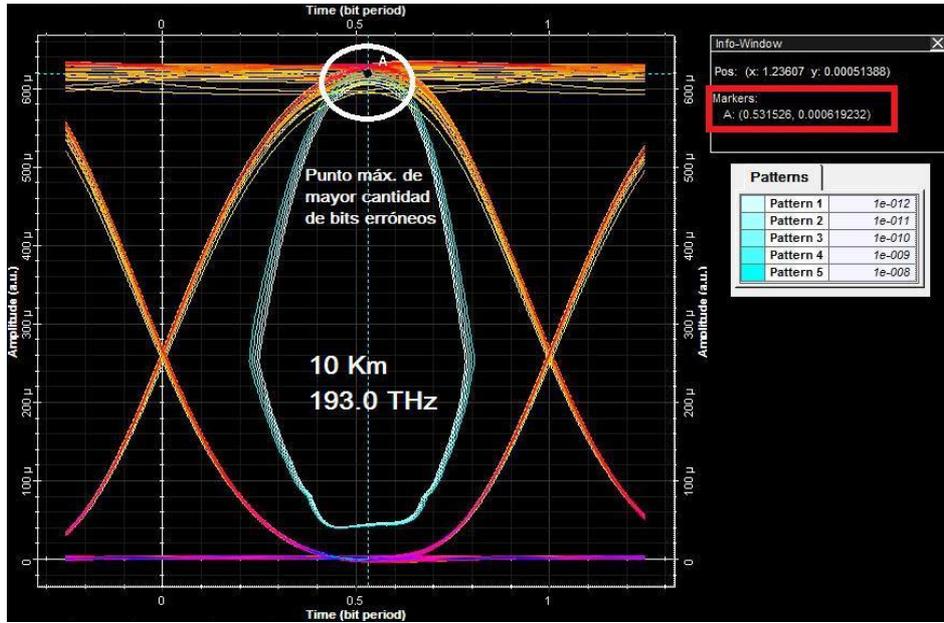


**Simulación de Factor Q a 100 Km con longitud de onda de 193.70 THz
Resultado: 8.12**

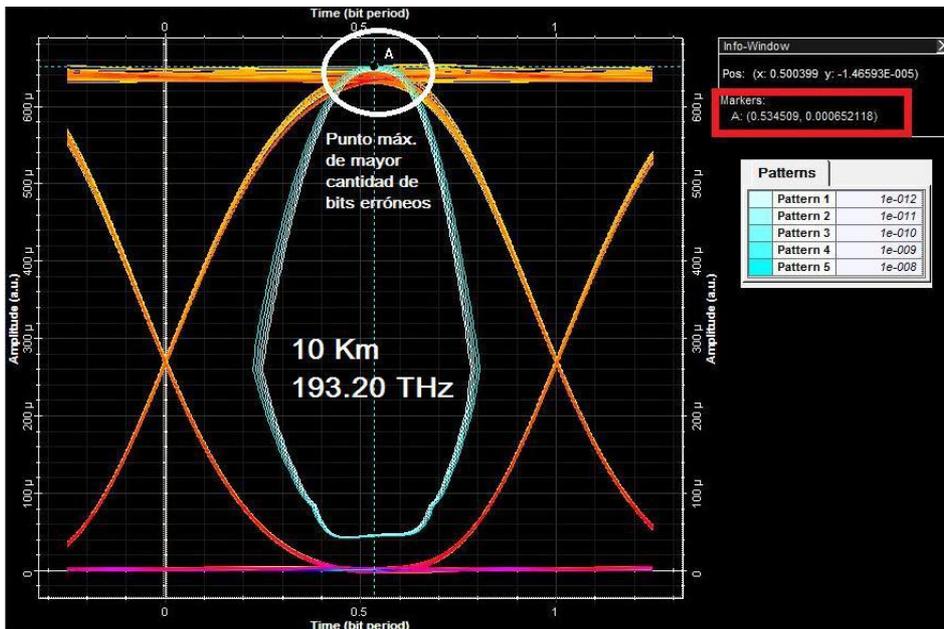
ANEXO 5

SIMULACIONES DEL PARAMETRO BER, ESPECIFICANDO DISTANCIA EN KILOMETROS Y LONGITUD DE ONDA EMPLEADA.

BER – 10 Km

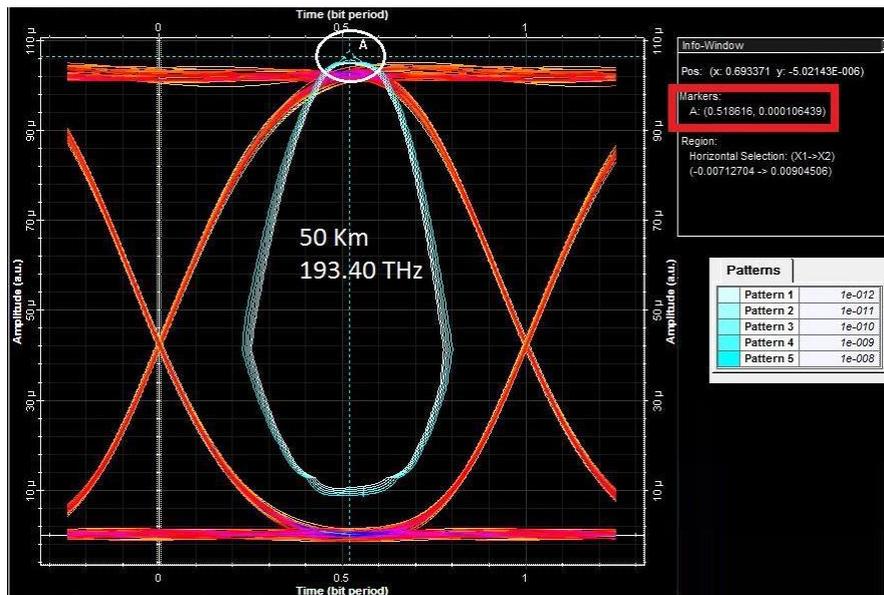


Simulación de BER a 10 Km con longitud de onda de 193.0 THz
Resultado: 619 A.U.

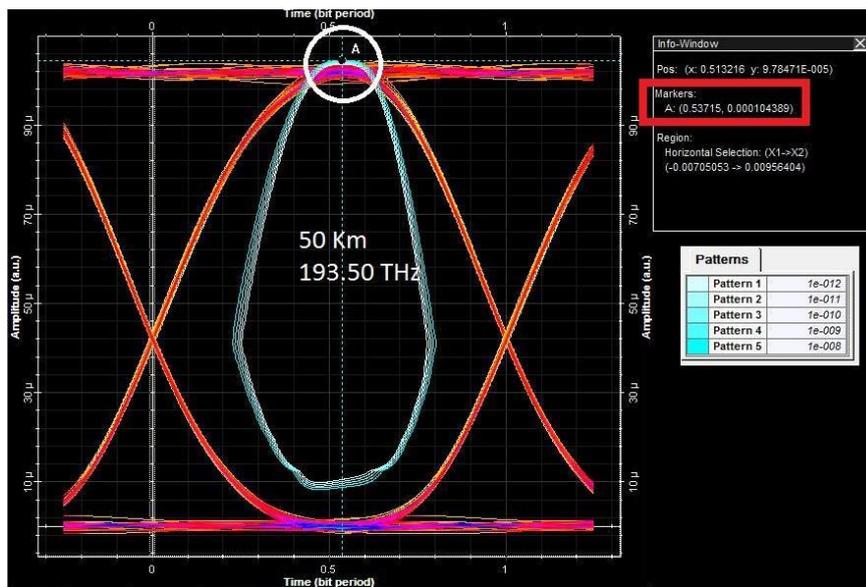


Simulación de BER a 10 Km con longitud de onda de 193.20 THz
Resultado: 652 A.U.

BER – 50 Km

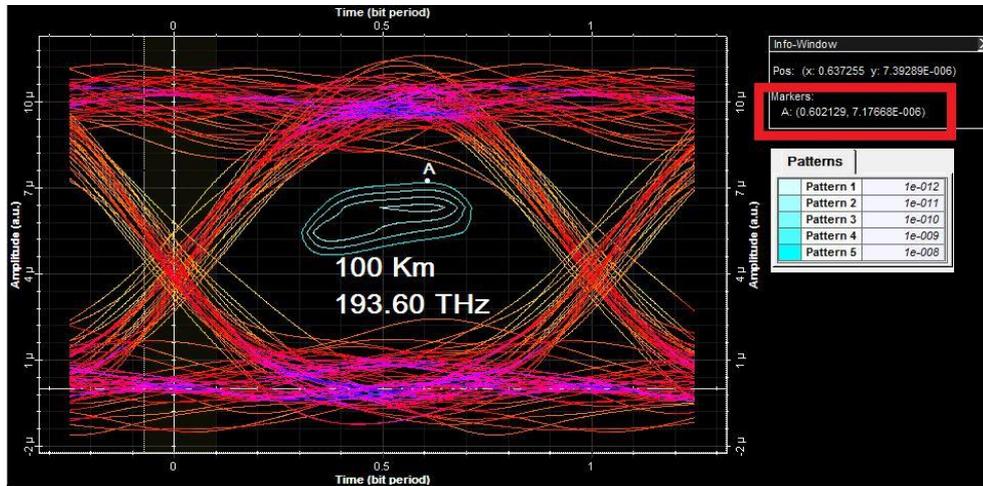


**Simulación de BER a 50 Km con longitud de onda de 193.40 THz
Resultado: 106 A.U.**

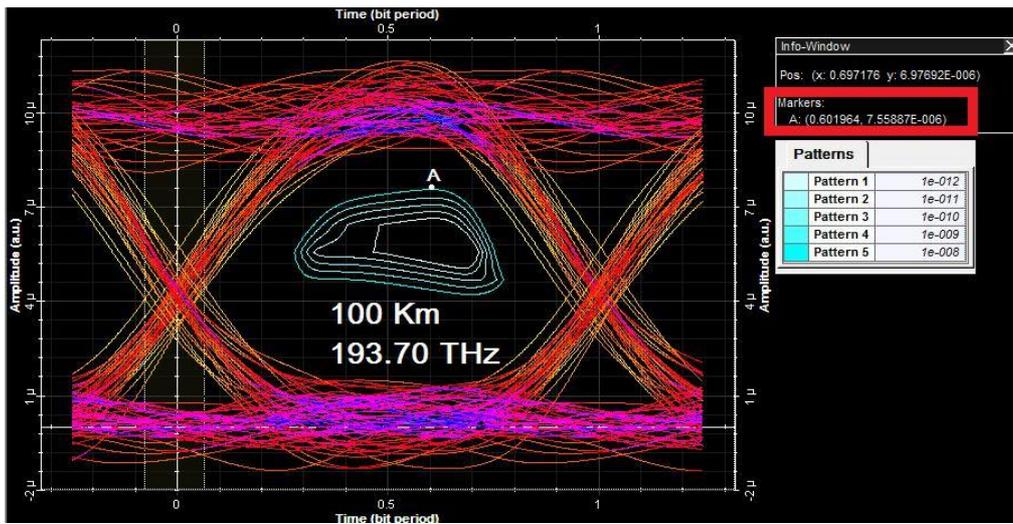


**Simulación de BER a 50 Km con longitud de onda de 193.50 THz
Resultado: 104 A.U.**

BER – 100 Km



Simulación de BER a 100 Km con longitud de onda de 193.60 THz Resultado: 7.17 A.U.



Simulación de BER a 100 Km con longitud de onda de 193.70 THz Resultado: 7.55 A.U.