



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**TEMA:**

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UNA RED WDM PARA MEDIR EL EFECTO  
NO LINEAL DE LA FIBRA ÓPTICA MONOMODO DENOMINADO  
DISPERSIÓN ESTIMULADA DE RAMAN A TRAVÉS DE SOFTWARE  
OPTISYSTEM.**

**AUTORA:**

**Alvarado Centeno, Diana Elizabeth**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de:  
INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES CON MENSIÓN EN GESTIÓN  
EMPRESARIAL**

**TUTORA:**

**Ing. Ruilova Aguirre, María Luzmila**

**Guayaquil, Ecuador**

**11 de Marzo del 2019**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Alvarado Centeno, Diana Elizabeth**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniería en Telecomunicaciones con mención en gestión empresarial**.

### **TUTORA**

f. \_\_\_\_\_  
**Ing. Ruilova Aguirre, María Luzmila**

### **DIRECTOR DE LA CARRERA**

f. \_\_\_\_\_  
**M.Sc. Ing. Heras Sánchez, Miguel Armando**

**Guayaquil, a los 11 del mes de Marzo del año 2019**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Alvarado Centeno, Diana Elizabeth**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación, **ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UNA RED WDM PARA MEDIR EL EFECTO NO LINEAL DE LA FIBRA ÓPTICA MONOMODO DENOMINADO DISPERSIÓN ESTIMULADA DE RAMAN A TRAVÉS DE SOFTWARE OPTISYSTEM** previo a la obtención del Título de **Ingeniera en Telecomunicaciones con mención en gestión empresarial**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 11 del mes de Marzo del año 2019**

**AUTORA:**

f. \_\_\_\_\_  
**ALVARADO CENTENO, DIANA ELIZABETH**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Alvarado Centeno, Diana Elizabeth**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UNA RED WDM PARA MEDIR EL EFECTO NO LINEAL DE LA FIBRA ÓPTICA MONOMODO DENOMINADO DISPERSIÓN ESTIMULADA DE RAMAN A TRAVÉS DE SOFTWARE OPTISYSTEM**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 11 del mes de Marzo del año 2019**

**AUTORA:**

f. \_\_\_\_\_  
**ALVARADO CENTENO, DIANA ELIZABETH**

## REPORTE DE URKUND

**URKUND**

**Documento** [Alvarado Diana v2.docx](#) (D48332335)

**Presentado** 2019-02-25 20:48 (-05:00)

**Presentado por** dianamir1292@hotmail.com

**Recibido** edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com

**Mensaje** Alvarado\_Diana\_v2.docx [Mostrar el mensaje completo](#)

4% de estas 29 páginas, se componen de texto presente en 13 fuentes.

80% # 1 Activo

TEMA: ANALISIS Y SIMULACION DE UNA RED WDM PARA MEDIR EL EFECTO NO LINEAL DE LA FIBRA OPTICA MONOMODO DENOMINADO DISPERSION ESTIMULADA DE RAMAN A TRAVES DE SOFTWARE OPTISYSTEM.

AUTOR: Alvarado Centeno, Diana Elizabeth

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de: INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES CON MENSION EN GESTION EMPRESARIAL

TUTOR: Ing. Ruilova Aguirre, Maria Luzmila

Guayaquil, Ecuador (día) de (mes) del 2019

FACULTAD DE EDUCACION TECNICA

PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES CERTIFICACIÓN

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco en primer lugar a Jehová Dios porque gracias a él, todo esto se ha hecho posible, por haberme dado la vida, por guiarme y sobre todo por brindarme su amor que se ve reflejado en mí día a día.

También agradezco infinitamente a mi familia que desde un principio fueron uno de los pilares fundamentales para mi desarrollo como una profesional, a mi madre que ha sido mi mejor amiga y guía en este largo camino.

Agradezco a mi Tutora por ser paciente y un excelente ser humano a la hora de aconsejar y también a ciertos profesores de la Facultad Técnica para el Desarrollo que me han brindado su ayuda, que más allá de ser solo docentes han sido amigos que me han aconsejado para prepararme profesionalmente.

AUTORA

---

ALVARADO CENTENO, DIANA ELIZABETH

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi abuela materna Rosa Sandoval que siempre estuvo ahí apoyándome e inculcándome valores, responsabilidad, honestidad y sobre todo amor. También a mi madre Mireya Centeno que jamás dejó de apoyarme y siempre estuvo a mi lado dándome ánimos y fuerzas para culminar con una meta más en la vida, quien ha sido mi ejemplo para jamás dejarme vencer por los obstáculos y quien me ha enseñado que siempre hay que poner en primer lugar a Jehová Dios en todo, porque de esta manera las cosas saldrán mejor.

A mis hermanos Fernando y Giorgio que siempre me han visto como un ejemplo de esfuerzo y superación, a mi Tía Máxima Centeno que ha sido una gran ayuda en lo largo de mi carrera, a mi esposo Ricardo Armijos por estar a mi lado apoyándome en cada paso que he ido dando, por el amor y la paciencia que me ha sabido tener y por último a mi pequeño hijo que es el responsable de hacerme llegar esas fuerzas que necesito para continuar en este camino que no termina aquí.

AUTORA

---

ALVARADO CENTENO, DIANA ELIZABETH



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**M.Sc. Ing. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS**  
DECANO

f. \_\_\_\_\_

**M.Sc. Ing. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO**  
COORDINADOR DE ÁREA

f. \_\_\_\_\_

**M.Sc. Ing. ROMERO ROSERO, CARLOS BOLÍVAR**  
OPONENTE

# ÍNDICE GENERAL

Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
RESUMEN.....	XVI
ABSTRACT.....	XVII
<b>CAPÍTULO 1: EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>2</b>
1.1    Introducción.....	2
1.2    Antecedentes.....	3
1.3    Definición del problema.....	4
1.4    Justificación del problema.....	4
1.5    OBJETIVOS.....	5
1.5.1    Objetivo General.....	5
1.5.2    Objetivos Específicos.....	5
1.6    Tipos de Investigación.....	5
1.7    Hipótesis.....	6
1.8    Metodología.....	6
<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>7</b>
2.1    Fibra Óptica: Historia.....	7
2.1.1    Principios Generales.....	8
2.2    Estructura de la Fibra Óptica.....	9
2.2.1    Fibras monomodo (Single mode SM).....	12
2.3    Tipos de Fibra Monomodo.....	15
2.4    Comunicaciones por Fibra Óptica.....	15
2.4.1    Efectos no lineales en la fibra óptica.....	18
2.4.2    Sistema de Comunicación Óptico.....	19

2.5	Wavelength Division Multiplexing (WDM) .....	21
2.5.1	Multiplexación y Demultiplexación por División de Longitud de Onda .....	26
2.5.2	Tipos de WDM.....	27
2.5.3	Ventajas de la WDM.....	28
2.5.4	Desventajas de la WDM.....	28
2.6	Diseño de un sistema de Multiplexación por divisor de longitud de frecuencia.....	29
2.6.1	Parámetros de transmisión .....	29
2.6.2	Diagrama de Bloque.....	31
2.7	Stimulated Raman Scattering (SRS) .....	31
2.7.1	Representación matemática de Dispersión Estimulada de Raman .....	38
2.7.2	Frecuencia Raman .....	40
2.8	Diagrama de Ojo.....	40
<b>CAPÍTULO 3:</b>	<b>SIMULACIÓN .....</b>	<b>42</b>
3.1	Software de Simulación elegido.....	42
3.2	Pasos de cómo se debe descargar de forma correcta el software y de cómo realizar una simulación en software Optisystem para redes ópticas. . .....	43
3.3	Diseño de simulación del sistema WDM 1 canal .....	45
•	Receptor .....	47
3.4	Análisis de resultados obtenidos 1 canal.....	48
3.5	Análisis obtenidos de simulación 4 canales.....	50
3.6	Demostración de Hipótesis .....	55
<b>CAPÍTULO 4:</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>57</b>
4.1	Conclusiones .....	57
4.2	Recomendaciones.....	58
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>59</b>

GLOSARIO DE TÉRMINOS .....	64
ANEXO .....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Fibra Óptica.....	10
Figura 2.2: Esquema de Fibra Monomodo.....	12
Figura 2.3: Fibra Monomodo de índice escalonado .....	13
Figura 2.4: Espectro de atenuación y de longitud de onda de una red WDM .....	16
Figura 2.5: Diseño de un Sistema de Comunicación Óptico .....	19
Figura 2.6: Esquema de como deber ser un sistema de comunicación óptico en una red WDM.....	21
Figura 2.7: Esquema de un sistema WDM punto a punto.....	22
Figura 2.8: Multiplexación por división de longitud de onda.....	24
Figura 2.9: Diseño de un Sistema WDM.....	24
Figura 2.10: Ancho de Banda de un canal de transmision en una red WDM. ....	26
Figura 2.11: Demultiplexación por refracción por medio de prisma .....	26
Figura 2.12: Multiplexación de una red por difracción.....	27
Figura 2.13: Diagrama de bloque de un sistema WDM .....	31
Figura 2.14: Principios del Efecto no Lineal denominado Dispersión Estimulada de Raman.....	32
Figura 2.15: Transferencia de potencia de señal en longitudes de onda menores a mayores .....	34
Figura 2.16: Diagrama de niveles, mostrando tres formas de dispersión ....	35
Figura 2.17: Experimento para la demostración de la dispersión inelástica	35
Figura 2.18: Representación de Ganancia Raman para fibra de sílice.....	38
Figura 2.19: Diagrama de Ojo y propiedades .....	41

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1: Interfaz Inicial de Optisystem.....	43
Figura 3.2: Interfaz gráfica de software Optisystem.....	44

Figura 3.3: Component Library .....	44
Figura 3.4: Realización de Búsqueda de Componentes .....	45
Figura 3.5: Simulación de red óptica WDM 1 Canal .....	45
Figura 3.6: Generador de señal óptica.....	46
Figura 3.7: Emisor: Generador, NRZ, Modulador .....	46
Figura 3.8: Canal Óptico .....	47
Figura 3.9: Receptor .....	47
Figura 3.10: Analizador de espectro óptico y analizador WDM .....	47
Figura 3.11: Analizador BER .....	48
Figura 3.12: Generador de señal .....	48
Figura 3.13: Espectro óptico .....	49
Figura 3.14: Analizador a la Salida con efecto SRS .....	49
Figura 3.15: Analizador BER .....	50
Figura 3.16: Simulación de una red WDM no lineal 4 canales.....	50
Figura 3.17: Transmisor WDM Mux Es .....	51
Figura 3.18: Modulador NRZ del transmisor .....	51
Figura 3.19: Medio de transmisión óptico .....	52
Figura 3.20: WDM Demux Es .....	52
Figura 3.21: Fotodiodo y filtro pasa bajo .....	52
Figura 3.22: Diferentes amplitudes en canal 1, 3, 4.....	53
Figura 3.23: Canal 1 .....	53
Figura 3.24: Canal 3 .....	54
Figura 3.25: Canal 4 .....	54
 <b>Anexo</b>	
Figura a 1.1: Simulación 1 Canal.....	66
Figura a 1.2: Conectores del Emisor 1 Canal.....	66
Figura a 1.3: Simulación 4 Canales.....	67

Figura a 1.4: Conectores del Emisor 4 Canales.....67

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO 2

Tabla 2.1: Enlace de Fibra Óptica.....	9
Tabla 2.2: Compuestos de la Fibra Óptica.....	10
Tabla 2.3: Fibra Monomodo: Ventaja y Desventaja.....	12
Tabla 2.4: Representación de cada ventana con sus respectivas bandas....	17
Tabla 2.5: Dimensiones de la Fibra Óptica.....	18

### CAPÍTULO 3

Tabla 3.1: Niveles de tasa de error bits (BER) en sistema de comunicación de 4 canales.....	55
Tabla 3.2: Resultados de variables obtenidos.....	55
Tabla 3.3: Variables Aceptables.....	56
Tabla 3.4: Validación de la Hipótesis.....	56

## RESUMEN

Actualmente los sistemas de comunicación se han hecho tan necesarios e importantes y para esto se necesita equipos de alta tecnología que soporten velocidades de transmisiones altas y un gran ancho de banda, y para ello se ha empleado el uso de la fibra óptica que brinda muchas ventajas a la hora de transmitir información. Como ya se ha visto la fibra atribuye muchas ventajas pero así mismo por el hecho de ser un dieléctrico se ve afectado por este efecto no lineal que empiezan aparecer cuando se sobrepasa velocidades superiores a 10 Gbps, en este trabajo de investigación se ha analizado y simulado una red WDM donde se le ha inducido el efecto no lineal denominado Dispersión Estimulada de Raman en una fibra monomodo para de esta manera poder determinar los parámetros principales de transmisión que degradan el desempeño de la red WDM.

La profundidad de la investigación con respecto a los efectos no lineales me ha permitido poder minimizar este efecto mediante el equilibrio entre la velocidad de transmisión y la separación entre los canales para así poder tener un buen desempeño en el enlace óptico. La simulación se realiza con el propósito de poder apreciar el efecto Dispersión Estimulado de Raman y mediante pruebas poder observar los parámetros de velocidad de transmisión, ancho de banda, degradación de la señal, etc.

**Palabras Claves:** Efecto no lineal, WDM, Dispersión Estimulada de Raman, Transmisión, Ancho de Banda, Fibra Óptica.

## **ABSTRACT**

Currently communication systems have become so important and for this we need high-tech equipment that supports high transmission speeds and high bandwidth for this has been used the use of fiber optic that provides many advantages when transmitting information. As we have already seen, fiber attributes many advantages, but also because it is a dielectric it is affected by this non-linear effect that begins to appear when speeds exceeding 10 Gbps are exceeded, in this research work it has been analyzed and simulated a WDM network where the non-linear effect Raman Stimulated Dispersion has been induced in a fiber, in order to determine the main transmission parameters that degrade the performance of the WDM network.

The depth of the investigation with respect to the nonlinear effects has allowed me to be able to minimize this effect by means of the balance between the speed of transmission and the separation between the channels in order to have a good performance in the optical link. The simulation is carried out with the purpose of being able to appreciate the Raman Stimulated Dispersion effect and through tests it is possible to observe the parameters of transmission speed, bandwidth, signal degradation, etc.

**Keywords:** Non-Linear Effect, WDM, Stimulated Raman Scattering, Transmission, Bandwidth, Optical Fiber.

# **CAPÍTULO 1: EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN**

## **1.1 Introducción**

En la actualidad las redes son el medio por el cual se transporta información, datos enviados-recibidos por varios medios ya sea por cableado o inalámbrico a través de técnicas que van mejorando los procesos de comunicación con el fin de satisfacer las necesidades de las demandas de sus usuarios. El presente y el futuro de las Telecomunicaciones tienen como protagonista a la Fibra Óptica, actualmente se está migrando todo para fibra óptica: redes telefónicas locales, de televisión por cable y redes de datos de área local. A medida que va pasando el tiempo se va dando paso a la vanguardia tecnológica cada vez la población demanda más velocidad, conectividad y digitalización.

La fibra óptica ha avanzado de manera impresionante y con este avance también van apareciendo estos efectos y parámetros que no se pueden percibir fácilmente. Tenemos el efecto de las no linealidades en un sistema de comunicación donde este se ve afectado al momento de transmitir información de un emisor a un receptor, para esto es necesario contar con el correcto programa o algoritmo que nos facilitará la visualización de los daños que estos efectos producen.

En los sistemas de comunicaciones por fibra óptica de largas distancias es necesario utilizar técnicas de multiplexación como WDM (Wavelength Division Multiplexing) la cual facilita el envío de información a largas distancias a través de varias portadoras con diversas longitudes de ondas, haciendo que estos efectos no lineales sean cada vez más importantes, para así poder analizarlos a fin de identificar que métodos o técnicas usar para poder corregir este efecto que se presentan en los tramos de la señal de manera inevitable. (Guano, Molina, & Jiménez, 2014).

Los efectos no lineales son originados por niveles de potencias excesivos a los 10Gb/s y se producen en todo dieléctrico cuanto más elevada sea la intensidad del campo que se propaga en la fibra más son

las probabilidades de poder observar la no-linealidad. El objetivo de este trabajo es mejorar el desempeño de una red WDM identificando los parámetros de transmisión del efecto no lineal para así poder minimizar o evitar que degradan el desempeño de la señal. Estos efectos se clasifican en dos tipos: lineales y no lineales.

Las no linealidades limitan la tasa y potencia de transmisión, los efectos no lineales dependen mucho de la intensidad de la señal, la Dispersión Estimulada de Raman es una técnica que se utiliza para el estudio de los modos vibracionales de un sistema, donde la dispersión inelástica de la luz se originada por la interacción entre el láser con el sistema (Montes, Herrera, Gómez, Pacheco, & Sarmiento, 2012, p. 300).

## **1.2 Antecedentes**

En la actualidad los equipos y servicios relacionados con las telecomunicaciones han desarrollo de manera impresionante como: avances técnicos, el internet. Nos encaminamos a la era de la información y las comunicaciones, para esto es necesario mejorar infraestructuras que soporten servicios de multimedia de diversa índole, esto depende de instalación de redes de bajo coste y gran capacidad siendo la fibra óptica un medio importante para los sistemas de telecomunicación.

La multicanalización por división de longitud de onda (WDM) permite la incrementación de transmisión del número de canales de comunicaciones por una sola fibra óptica, a cada canal se lo asocia con una longitud de onda luminosa logrando una mejor optimización del ancho de banda de la fibra y teniendo como resultado una mayor tasa de transmisión. (Gaxiola, 2005, p. 79)

El éxito de Multiplexación por división de longitud de onda depende mucho de la tecnología de dispositivos ópticos. Los fotodiodos emisores de luz tienen como valores típicos una potencia de salida de 1 mW, frecuencia de modulación 50 GHz y su anchura espectral 50 nm son utilizadas en fibras monomodos.

El efecto Dispersión Estimulada de Raman proviene de movimientos de vibración moleculares esto se debe a las variaciones de la polarizabilidad de la frecuencia entre un fonón óptico y el haz intenso de bombeo, al darse estos cambios vibracionales se crea una redistribución de carga conocida como polarizabilidad de la molécula. (Guano et al., 2014)

### **1.3 Definición del problema**

Las telecomunicaciones ha llevado a emplear la convergencia de voz, datos y videos en una sola red conmutada de paquetes, para esto se emplea la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) donde varias señales ingresan al transmisor para transmitir las en un solo medio.

Los efectos de dispersión no lineales son los que se van produciendo en los primeros tramos de la fibra, a medida que la señal va recorriendo una mayor distancia su potencia empieza a verse afectada, esta degradación de la onda es producto de los efectos no lineales que se reflejan en la amplitud, forma y el desplazamiento temporal con respecto a la señal original a lo cual aparecerán las no linealidades que son SBS (Dispersión Estimulada de Brillouin) y SRS (Dispersión Estimulada de Raman). Estos efectos se verán presente en todo dieléctrico.

### **1.4 Justificación del problema**

Los principales efectos de propagación a través de una fibra óptica son la atenuación, la dispersión, las no linealidades. Las atenuaciones pueden compensarse mediante la amplificación óptica. Las tasas de transmisión y distancias empleadas por los sistemas de comunicaciones actuales, la dispersión y el efecto no lineal, son los que influyen en gran medida en el desempeño en un sistema de comunicaciones óptico. (Alzate & Fernández, 2012, p. 71)

Se ha podido observar que la comunicación por medio de la fibra óptica es un medio que ofrece muchas ventajas como efectividad, velocidad y calidad al momento de transmitir información, pero cuando sobrepasa ciertos niveles de

potencia la señal empieza a degradarse y es ahí donde empiezan aparecer estos efectos que perjudican a la señal, este trabajo de titulación trata que de por medio de una y simulación medir en que tramo estos efectos empiezan aparecer y tratar de minimizarlos para así poder tener un mejor desempeño en la red WDM.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 Objetivo General**

Analizar y diseñar por medio de la plataforma Optisystem la simulación de un sistema WDM de una red Óptica para medir el efecto no lineal denominado Dispersión Estimulada de Raman.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Analizar por medio de la investigación teórica el sistema WDM y sus sistemas de comunicación ópticos.
- Evaluar el desempeño de la comunicación óptica para así poder visualizar el efecto no lineal Dispersión Estimulada de Raman (SRS).
- Validar mediante el analizador BER los resultados que se ha obtenido de la simulación.

## **1.6 Tipos de Investigación**

El presente trabajo de titulación se hizo referencia al método Cualitativo y Cuantitativo.

**-Cualitativa:** porque se basa en la obtención de datos basados en la observación, describe hechos y realidades por medio de la recopilación de información, además no nos permite explicar algunos fenómenos de forma muy clara. Aunque los datos no están del todo precisos se puede utilizar para su respectivo análisis y así poder obtener una mejor explicación sobre el fenómeno que se esté estudiando.

**-Cuantitativa:** Se basa en estudios y análisis en la parte real y hace el uso de distintos procesos para obtener mediciones, a través de simulaciones experimentales se puede obtener información para obtener resultados.

## **1.7 Hipótesis**

A través de la simulación del sistema WDM en una red óptica monomodo se podrá evidenciar el efecto no lineal para poder minimizar esta degradación de la señal y poder tener un mejor rendimiento de las redes de Telecomunicaciones.

Variable Dependiente: Redes de Telecomunicaciones

Variable Independiente: Sistema WDM

## **1.8 Metodología**

En el presente trabajo de titulación se ha recopilado los fundamentos teóricos necesarios para conocer más de cerca las ventajas que ofrece la fibra óptica y de cómo este dieléctrico se ha vuelto tan necesario para la transmisión de información de un punto a otro, y de cómo la tecnología WDM puede transmitir muchas señales totalmente independientes por medio de un sola fibra a través de portadoras ópticas con distintas longitudes de onda. Este trabajo es realizado con la finalidad de obtener una base y una guía para poder comprender de una mejor manera el funcionamiento de las redes ópticas, además con el desarrollo de la simulación se puede diseñar una red óptica que permita evaluar y conocer la forma correcta de evaluar parámetros y la configuración de todos los componente que conformar la red y como resultado visualizar.

## **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Fibra Óptica: Historia**

La fibra óptica se basa en las siguientes leyes: reflexión y refracción las cuales fueron se dieron a conocer 1626 por Snell.

Refracción: La ondas cambian de dirección al pasar de un punto a otro

Reflexión: La onda cambia de dirección pero esta vez hacia el origen.

En 1668: Isaac Newton descubrió que la luz se propaga por ondas sonoras.

En 1790: La construcción del telégrafo óptico por Claude Chappe.

En 1810: Fressnell establece leyes matemáticas sobre propagación.

En 1854: Jhon Tyndall descubre la proyección de la luz a través de chorros de agua.

En 1873: El científico James Maxwell pudo demostrar su teoría, que la luz se puede conducir mediante ondas electromagnéticas.

En 1880: Graham Bell inventó el fonógrafo dispositivo que permitió la transmisión de sonido (voz) a través de rayos de luz.

En 1966: Científicos propusieron una guía óptica para la comunicación, para uso de las comunicaciones a través de láser. Ya para el año de 1970 se empiezan a fabricar las primeras fibras con baja atenuación y láseres de semiconductores, a pesar del desarrollo tecnológico en la producción, la baja atenuación en la fibra óptica y desarrollo de nuevas tecnologías para láseres de semiconductores no se ha podido evitar las limitaciones debido a estos efectos de linealidad y no-linealidad a los que están sometidos los pulsos eléctricos al viajar por medio de una fibra óptica.

Debido al masivo crecimiento del tráfico en las redes de comunicación y la creciente demanda de altas tasas de transmisión el uso de la fibra óptica ha incrementado en el área de las telecomunicaciones convirtiéndose en el medio de transmisión que ofrece la mayor cantidad de tasa de bits. La gran capacidad que ofrece la fibra óptica hace que sea el mayor medio de transmisión empleado en las redes de gran capacidad y alcance. Al incrementarse el número de usuarios que accede al internet, esto ha llevado a buscar nuevos métodos que permita incrementar la capacidad de las redes ópticas, hay que tener en consideración que la máxima tasa de incremento de bits y el alcance

obtienen limitaciones por los diferentes efectos de propagación de la señal a través de la fibra óptica. (Alzate & Fernández, 2012, p. 70)

La Fibra óptica puede ser de vidrio o de plástico muy fina (aproximadamente de 8 a 10 micrómetros de diámetro) por donde los datos digitales son transmitidos a manera de impulsos luminosos moderados, donde el diodo de láser es el encargado de emitir la señal luminosa que llega al receptor donde el fotodiodo transforma la señal luminosa en señal eléctrica. (Dordoigne, 2015, p. 179)

La fibra hoy en día es muy utilizada y se la está empleando para la conexión hasta los hogares de esta forma se está esparciendo su uso a un infinito abanico de aplicaciones, la fibra cuenta con muchas propiedades favorables como: gran capacidad de transmisión, cable óptico de pequeño diámetro, bajo coste potencial (a causa de la abundancia de su material básico), liviano para poder transportar, etc. (Boquera, 2005)

Los efectos no lineales en la fibra son debido a la interacción de la luz y el material de transmisión y la fibra óptica no es la excepción pues los efectos de no-linealidad son el resultado de cualquier dieléctrico cuando estos son sometidos a intensos campos electromagnéticos. Se han descubierto varios efectos de no-linealidad y cada uno afecta de manera distinta a los sistemas de transmisión óptica.

### **2.1.1 Principios Generales**

Es un sistema de transmisión de información que es el encargado de llevar dicha información en formas de haces de luz, la luz puede sufrir efectos de reflexión cuando rebota y cambia de dirección (cuando se refleja en un espejo), o de refracción cuando pasa de un medio a otro y continua su propagación, eso produce un cambio en su velocidad, en su dirección.

El sistema por fibra óptica funciona mediante el envío de información por medio de rayos de luz, este se compone de un dispositivo (Foto-emisor) que se encarga de convertir pulsos eléctricos en rayos de luz, un canal óptico

(medio por el cual transita la luz) y un Foto-detector (transforma la señal luminosa en impulsos eléctricos).

A continuación, en la Tabla 2.1 se detallará como está compuesto un enlace de fibra óptica.

Tabla 2.1: *Enlace de Fibra Óptica*

Circuitos Electrónicos	Transmisor Óptico	Cable de Fibra	Receptor Óptico	Circuitos Electrónicos
Interfaz Eléctrica	LED	-Índice Escalonado -Índice Gradual	-Fotodiodo -Diodo PIN	-Interfaz Eléctrica  -Regeneración de Reloj  -Conversión de código

Elaborado por: *Autor*

## 2.2 Estructura de la Fibra Óptica

La fibra es una hebra muy fina de plástico o de vidrio, también hay variaciones con el diámetro correspondiente al tipo ya sea este monomodo o multimodo que puede ser sumamente delgado del espesor de una hebra de cabello (125 micras). La luz está conformada por ondas electromagnéticas que son transmitidas en un alto índice de refracción. Algunas fibras de vidrio con índice de refracción tipo gradual poseen un núcleo de 50  $\mu$ , es importante que el núcleo posea un mayor ancho de banda con respecto al otro y que su índice de refracción sea idéntico. (Córdoba, 2003, p. 6)

La fibra está compuesta por: núcleo, revestimiento y cubierta. (Mendoza, 2016)

- Núcleo: puede ser sílice, cuarzo fundido o plástico con un diámetro de 9 mm para la fibra monomodo y es por donde viaja el haz de luz.
- Revestimiento: está compuesto por los mismos materiales del núcleo pero posee un índice refractante muy distinto al del núcleo, esta capa retiene las ondas ópticas al núcleo.
- Cubierta: que es la capa que asegura la protección mecánica de la fibra y la protege de la humedad.

En cada filamento de fibra óptica podemos observar 3 componentes:

- Fuente de Luz: LED o Laser
- Medio de transmisión: Fibra Óptica
- Detector de Luz: Fotodiodo

En la Figura 2.1, se puede visualizar las partes de la Fibra Óptica.

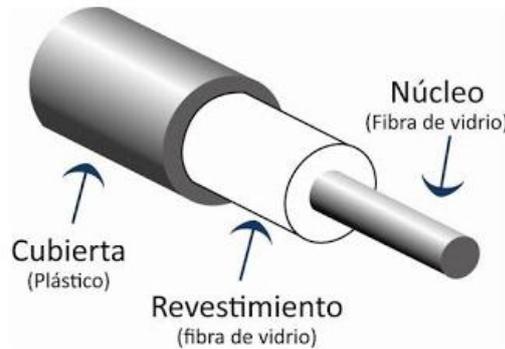


Figura 2.1: Fibra Óptica

Fuente: (Mendoza, 2016)

En la siguiente Tabla 2.2 Se detalla cada componente que conforma la fibra

Tabla 2.2: *Compuestos de la Fibra Óptica*

Núcleo	Cubierta	Revestimiento
-Formado por un cilindro de vidrio (Por donde viaja la señal).	-Tubo coaxial que se coloca alrededor del cilindro. -Su material es de vidrio y su función es asegurar la condición de la luz que se encuentra en el interior del núcleo. -Material de la envoltura tiene un índice de refracción distinto al del núcleo.	-Material de plástico que reviste a la fibra óptica.

Elaborado por: Autor

Las fibras ópticas son hechas de vidrio contaminada con cierta clase de impureza para poder controlar el índice de refracción, para esto se emplea Germanio (Ge), Fosforo (P) o Titanio (Ti) y para disminuirlo Boro (B) o Flúor (F). Las fibras de plástico son más económicas y flexibles y sobre todo más fáciles de instalar y conectar, una de sus ventajas es que resisten tensiones

en comparación con las fibras de vidrio, pero su mayor desventaja es la mala transmisión de luz y esto ocasiona grandes pérdidas por lo que es muy recomendable usar fibra con un núcleo de vidrio ya que la tasa de pérdida es mucho menor y la transmisión de la información es mucho mejor que en las fibras de plástico.

Los cables de fibra óptica son finos y largos de vidrio o de plásticos el diámetro menor al cabello de un ser humano, es un cilindro dieléctrico que permite guiar y limitar la onda de luz en su interior, los cables de fibra óptica solo permiten envío de señales en un solo sentido, también suelen haber con frecuencia de doble sentido (dos cables unidos) o versiones de doble núcleo para la transmisión y la recepción de la señal. La fibra es muy importante para los sistemas de comunicación de altas velocidades (10Gbps que pueden llegar a 10Tbps), ya que transmite la información de manera rápida y esto se debe a su pureza y también a la ausencia de atenuaciones e insensibilidad a las interferencias eléctricas, de esta forma la fibra es una excelente opción para transmisiones largas y de altas tasas de velocidad. (Quinzo, 2018, p. 16)

Se cataloga a la fibra óptica como el mejor medio de transmisión actualmente, y esto se debe a las siguientes características: (Boquera, 2005, p. 1)

- Reduce Atenuaciones de la señal óptica.
- Posee gran capacidad de transmisión debido a pulsos cortos y bandas de frecuencias elevadas.
- Diámetro pequeño, ligeros, flexibles y su tiempo de vida útil es mayor.
- Son muy económicos debido a la abundancia de su material.
- Es invulnerable a las frecuencias electromagnéticas.
- Mejor Ancho de Banda.
- Mejora la Calidad de Video y Sonido.
- Más Seguridad.
- Libres de conexión a tierra.

La Tabla 2.3 Se Describe las ventajas y desventajas más importantes de la Fibra Monomodo.

Tabla 2.3: Fibra Monomodo: Ventaja y Desventaja

Tipo	Ventajas	Desventajas
MONOMODO	-Dispersión mínima -Mayor ancho de banda -Mayor capacidad para transportar información.	-Núcleo pequeño -Más compleja de implementar -Conexiones y Empalmes costosos.

Elaborado por: Autor

### 2.2.1 Fibras monomodo (Single mode SM)

La fibra monomodo, posee una banda de paso del orden de los 100 GHz/km, permite mayor capacidad para transportar información y es la fibra más compleja de implementar debido al pequeño tamaño del núcleo, se debe utilizar componentes de alta precisión a la hora de hacer conexiones y empalmes en la fibra. (Córdoba, 2003, p. 21)

En la Figura 2.2: Muestra el esquema de una fibra Monomodo.

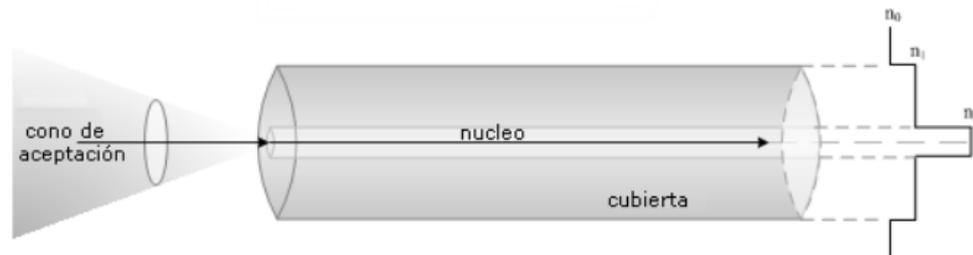


Figura 2.2: Esquema de Fibra Monomodo

Fuente: (Álvarez, Hernández, & Quiroz, 2007)

En las fibras monomodo solo una trayectoria de rayos de luz se puede propagar en el núcleo, en cuanto a su índice de refracción es igual al índice escalón de la fibra multimodo, en las fibras monomodo la dispersión modal es sin valor (nula) por ende pueden transmitir simultáneamente grandes volúmenes de información. Para las fibras monomodo el compartimiento de los haces de luz se propagan de forma lineal sin reflexionar con el revestimiento por ende tienen un único modo de propagación dentro de la fibra debido al tamaño del núcleo y del revestimiento. (Ibeas, 2017, p. 13)

Las fibras de índice escalonado son las que permiten eliminar la dispersión intermodal mejorando así el ancho de banda, a continuación en la Figura 2.3 veremos un Fibra de índice escalón.

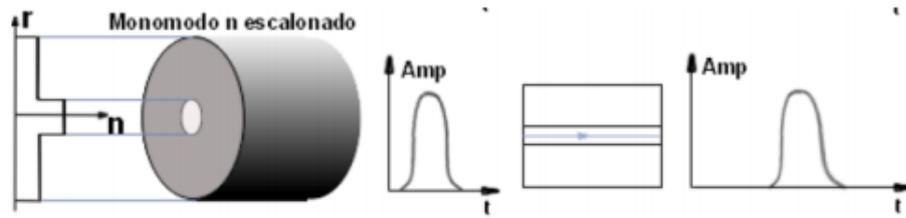


Figura 2.3: Fibra Monomodo de índice escalonado

Fuente: (Ibeas, 2017)

El coste de fabricación de una fibra monomodo es superior al costo de fabricación de la multimodo. En fibras monomodo se utilizan diodos de laser más caros y de mayor potencia y direccionalidad.

La frecuencia normalizada ( $V$ ) es un parámetro auxiliar adimensional que es empleado para el estudio electromagnético y para propagación de fibra óptica (su frecuencia normalizada debe ser menor a 2,405), está relacionado con características físicas de la fibra y con la longitud de la onda de operación ( $\lambda$ ), de la siguiente manera: (Ibeas, 2017, p. 13)

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a AN$$

Donde:

$V$ = Frecuencia normalizada

$a$ = Radio del núcleo

$AN$ = Apertura numérica

$\lambda$ = Longitud de onda

El valor de la Frecuencia Normalizada permite diferenciar si la fibra está operando en régimen monomodo o multimodo, cuanto mayor sea  $V$ , mayor será el número de modos que una fibra es capaz de guiar, se establece por tanto que la frecuencia normalizada de corte ( $V_c$ ) la cual marca el límite entre la fibra monomodo y multimodo, si la frecuencia normalizada de la fibra se halla por debajo del valor de corte ( $V \leq V_c$ ) significa que la fibra posee un solo núcleo, pero si ( $V > V_c$ ) será multimodo. (Ibeas, 2017)

$$V_c = 2,405$$

A continuación se detallara las características principales para la fibra óptica con salto de índice escalonado o abrupto: (Ibeas, 2017, p. 14)

- Diámetro de la cubierta: 125  $\mu\text{m}$
- Diámetro del núcleo: 5 a 10  $\mu\text{m}$
- Diámetro del revestimiento: 250 a 1000  $\mu\text{m}$
- Apertura numérica: 0,08 a 0.15 ( $5$  a  $9^\circ$ )
- Atenuación: Entre 2 y 5 dB/Km a una longitud de onda de 0.85  $\mu\text{m}$  limitado por la dispersión espacial. Perdidas medias para señales en 1.3  $\mu\text{m}$  y 1.55  $\mu\text{m}$  son de 0.35 y 0.21 dB/Km.
- Aplicaciones: Adecuadas para distancias largas con ancho de banda alto para aplicaciones con emisores coherentes monomodo.

La fibra óptica monomodo se ha convertido en el medio de transmisión más usado a continuación, detallaremos algunos motivos:

- Alto ancho de banda y bajas perdidas de transmisión, a través de fibra óptica se puede llegar a transmitir más de 1 THz.
- Baja atenuación de la señal alcanzando distancias entre repetidores superiores a 100 Km en tercera ventana.
- Pequeño tamaño y peso, que es una gran ventaja ya que facilita la instalación y el transporte a diferencia de los cables coaxiales que son gruesos y pesados.
- La fibra óptica tiene inmunidad a la interferencia gracias a su naturaleza dieléctrica que son insensibles a interferencias electromagnéticas.
- Su aislamiento eléctrico se debe a que la fibra óptica se construye a partir de silicio que es un aislante eléctrico.
- La fibra óptica brinda seguridad ante ataques de intrusos, pues la señal óptica queda confinada en las guías de ondas, las pequeñas emanaciones son absorbidas por el recubrimiento opaco alrededor de la fibra.
- Su abundancia de material en la naturaleza (silicio) material principal para la construcción de la fibra óptica, este material se lo puede encontrar en la arena ordinaria, lo que resulta caro es el proceso de purificación de dicho semiconductor.

Por el momento la fibra es el elemento que limita la capacidad de longitud de un sistema de comunicación esto se debe a tres efectos: Dispersión, pérdidas y los fenómenos de no linealidad.

### **2.3 Tipos de Fibra Monomodo**

Existe dos tipos denominados: OS1 Y OS2

OS1: se la usa más en interiores y su distancia máxima de extendido es de 2.000 metros (2 km), su diámetro de revestimiento es de 125  $\mu\text{m}$ , diámetro del núcleo de 9  $\mu\text{m}$ , longitud de onda 1310 nm y una atenuación de 0.5 db/km. Esto permite que su transmisión sea paralela al eje de la fibra óptica y pueda transmitir altas tasas de información y alcance grande distancias.

OS2: diseñada para todos los usos, en especial para los exteriores. Su distancia máxima es entre 5.000 (5km) a 10.000 metros (10 km) permite de 1 a 10 gigabits de Ethernet.

-G.652 (C y D) Son utilizadas como fibra estándar para transmisión Ethernet a Gigabit y 10 Gigabit, OS1 es cubierta por fibras tipo G.652 a, b, c y d. La fibra tipo OS2 (desde 2006) fija características para longitud de onda 1310 nm, 1550 nm y 1383 nm, para aplicaciones de larga distancia.

### **2.4 Comunicaciones por Fibra Óptica**

Es el medio que se emplea para transmitir información de un punto a otro ya sea que estén separados a larga distancias (intercontinentales) o cortas. La información es transportada por una sola onda electromagnética de alta frecuencia denominada portadora cuya frecuencia puede variar. Estos sistemas utilizan señales portadoras de alta frecuencia (100 THz) en la región visible o en la de infrarrojo cercano del espectro electromagnético.

En las comunicaciones por fibra óptica se emplea radiaciones electromagnéticas con longitud de onda comprendida entre 750 nm y 1650 nm hay que tener en cuenta que las radiaciones visibles al ojo humano están comprendidas entre 400 nm y 750 nm.

A continuación definiremos tres puntos de trabajo denominado:

- Primera Ventana: (850 nm)

- Segunda Ventana (1310 nm)
- Tercera Ventana (1550 nm)

En la siguiente Figura 2.4 Veremos las ventanas con su respectiva banda en una red WDM. (Ibeas, 2017, p. 21)

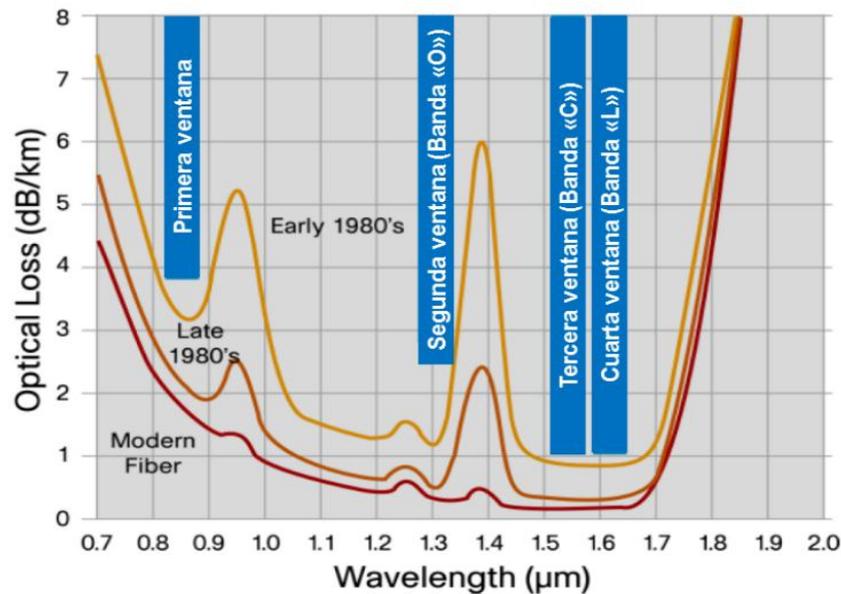


Figura 2.4: Espectro de atenuación y de longitud de onda de una red WDM

Fuente: (Ibeas, 2017)

Las fibras ópticas producían pérdidas ligeramente inferiores a la tercera ventana alrededor de los 1550 nm, el primer sistema de fibra se instaló en el año 1977 y operaban a 45 Mb/s con repetidores separados a intervalos de 6.4 Km. La cantidad de información puede ser transmitida por el sistema en un segundo y en un kilómetro, se mide en bit por kilómetro por segundo (bit. Km/s) las distancias que las señales pueden recorrer en la fibra antes de tener que ser regeneradas, actualmente los sistemas trabajan con velocidad de hasta 560 Mb/s desarrollándose sistemas de transmisión a velocidades a los 2Gb/s.

En la siguiente Tabla 2.4 Ubicaremos cada ventana con sus respectivas bandas de la Fibra Óptica.

Tabla 2.4: Representación de cada ventana con sus respectivas bandas

Ventana	Banda (IUT-T)	$\lambda$ (nm)	Atenuac. Típica (dB/Km)	Alcance (Km)	Costo Opto-Electrónica	Tipo Fibra
1°		820-900	2,5	2	Bajo	MM
2°	O	1260-1360	0,34	40-100	Medio	MM y SM
	E	1360-1460	0,31(LWP)	100	Alto	SM
	S	1460-1530	0,25	100	Alto	SM
3°	C	1530-1565	0,2	160	Alto	SM

Elaborado por: Autor

- O-Band (Original)
- E-Band (Extended)
- S-Band (Short)
- C-Band (Convventional)

Definidas las características tanto geométricas como físicas de una fibra al variar la longitud de onda " $\lambda$ ", varia también la cantidad de modos, cada modo se caracteriza por un valor de longitud de onda. Una vez determinada la longitud de onda de radiación al disminuir el diámetro del núcleo disminuye el número de modos en que se propaga. En la fibra óptica la luz se propaga por reflexión (interna entre el núcleo y el recubrimiento).

Los sistemas de multiplexación es aquel que permite enviar información usando varias bandas de transmisión al mismo tiempo que viajan a través de la fibra óptica como pulsos de luz, rayos lumínicos que viajan confinados entre el núcleo y el revestimiento, se generan en un emisor, un dispositivo óptico que crea la luz de una longitud de onda determinada. A medida que va evolucionando la tecnología se afinado las longitudes de ondas óptimas para transmitir denominándose ventanas de transmisión. Cada ventana posee un rango de atenuación y una transmisión en Km distinta.

En la Tabla 2.5 Se detallará el salto de índice y la variación del índice de la fibra monomodo y multimodo.

Tabla 2.5: Dimensiones de la Fibra Óptica: Monomodo y Multimodo

	Monomodo	Multimodo
Con salto de índice	Tiene una dimensión de 10/125 $\mu\text{m}$	No es empleado en el área de las telecomunicaciones, debido a su limitada característica de transmisión.
Con variación de índice	Con diámetro de 9/125 $\mu\text{m}$	Con diámetro de 50/125 $\mu\text{m}$

Elaborado por: Autor

### 2.4.1 Efectos no lineales en la fibra óptica

Los efectos no lineales son de gran importancia, en especial para sistemas WDM de larga distancia. Existen dos tipos Lineales y No Lineales

En el régimen lineal tenemos:

- Que la potencia de salida es proporcional a la de entrada
- No se genera nuevas longitudes de onda
- Cambio de fase proporcional al índice de refracción

En el régimen no lineal tenemos:

- Genera nuevas longitudes de onda y distintas longitudes de onda que interaccionan entre si ocasionando la diafonía y la distorsión
- El cambio de fase no es proporcional al índice de refracción
- La potencia de entrada no es igual a la potencia de salida ya que existe una atenuación extra que es causada por el efecto.

Efectos Dispersivos (scattering) son: Dispersivo de Raman y Brillouin. Estos efectos esta relacionados con la interacción con los fotones ópticos (señal de luz) y fonones (estados vibratorios), estos efectos son vistos como dispersión en el bombeo de luz en donde transfiere la energía a los haces o canales de menor energía, en ambos casos tanto la dispersión de Raman y de Brillouin la energía es transferida de una señal a otra con una longitud de onda de menor energía (Stokes). (Alvarez et al., 2007, p. 24)

Hay que tener en cuenta que en los sistemas de comunicaciones por fibra óptica de alta capacidad y de larga larga longitudes, hay que considerar que la señal de salida no varíe de forma directamente proporcional a la potencia de la señal de entrada y que el espectro de la señal no sea distorsionado, por ende se considera que los efectos no lineales los cuales deben evitarse o por lo menos tratar de reducirlos al mínimo. (Alvarez et al., 2007, p. 23)

## 2.4.2 Sistema de Comunicación Óptico

Los sistemas de comunicación por fibra óptica son una buena opción a la hora de transmitir información a altas tasas de transmisión en Gbps, en este sistema se codifican, modulan y multicanalizan datos para transmitirlos de manera rápida y segura. A medida que la señal va viajando por la fibra óptica sufre pérdida por atenuación, dispersión y es ahí donde aparecen estos efectos no lineales causados por la dispersión estimulada de Raman y Brillouin. Para esto es necesario restablecer y redireccionar la señal por medio de un regenerador óptico.

En la Figura 2.5 Muestra los componentes de un sistema óptico que son: transmisor, modulador, medio de transmisión en este caso sería la fibra óptica, un regenerador y el receptor. El transmisor es el encargado de codificar la información, se modula la portadora luminosa en una determinada longitud de onda y se transmite a la fibra. (Gaxiola, 2005, p. 5)

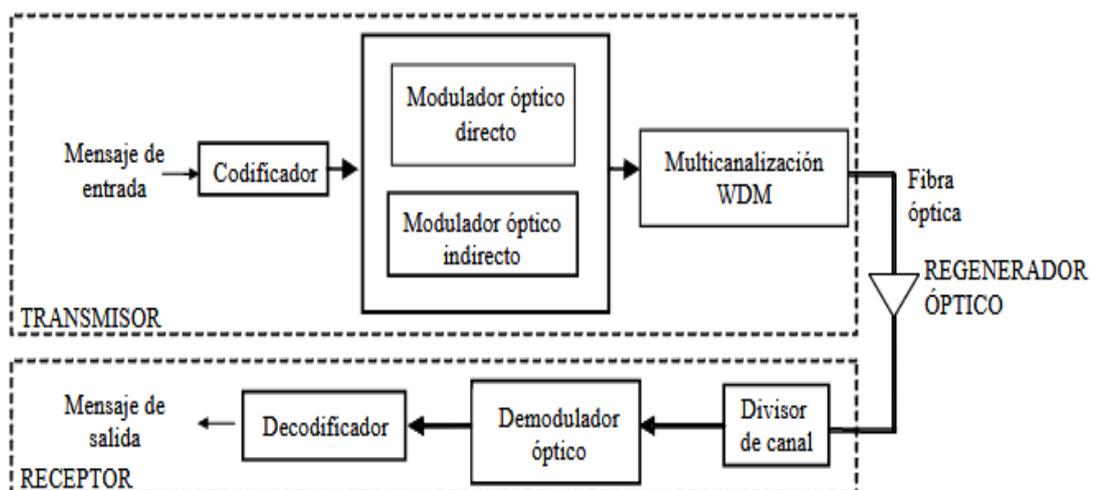


Figura 2.5: Diseño de un Sistema de Comunicación Óptico

Fuente: (GAXIOLA, 2005)

Una vez que la señal a llegado a su destino es procesada por el receptor, a través de un divisor de longitud de onda pasa la señal luminosa, donde posteriormente la señal es desmodulada y la señal luminosa es convertida en corriente eléctrica, por último se decodifica para obtener la información transmitida. (Gaxiola, 2005, p. 5)

Los bloques fundamentales de un sistema de comunicación son: (Grosz, 2003, p. 25)

- **Transmisor:** Agarra la información (secuencia de bits) que es una señal eléctrica y la transforma en una secuencia de bits óptica, este proceso se llama codificación.

En los sistemas ópticos de alta capacidad el transmisor está formado por un láser que opera con una longitud de onda en tercera ventana  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , seguido por un modulador externo. El modulador es como una especie de llave óptica que es controlada por una secuencia de pulsos eléctricos (bits) que se quiere transmitir, un bit =1 corresponde a un estado de baja pérdida (deja pasar la luz del láser), un bit =0 estado de alta pérdida (bloquea la luz) el contraste entre bit =1 y bit= 0 se denomina grado de extinción siendo un parámetro importante en el diseño de un sistema óptico.

- **Canal de comunicación:** Es el medio físico que permite que los bits lleguen del transmisor – receptor, en este caso el medio de comunicación es la fibra óptica. El canal de comunicación degrada la información transmitida mediante audición de ruido y distorsiones lineales y no-lineales.
- **Receptor:** Es aquel que recibe la secuencia de bits ópticos y la transforma en secuencia de bits eléctricos, si la potencia recibida en el intervalo de tiempo sobrepasa al valor umbral el detector dirá <<1>> caso contrario dirá <<0>>.

Un error de transmisión es producido cuando un bit <<1>> es detectado como un bit <<0>> y viceversa. Los sistemas modernos de comunicación trabajan con tasas de error inferiores a una detección errónea  $10^{16}$  bits transmitidos.

A continuación en la Figura 2.6 Representa un esquema de comunicación óptico detallado para red WDM. Donde se detalla los formatos de modulación

más eficaces que permiten transmitir mayor cantidad de información frente a las limitaciones ya sea por dispersión y efectos no lineales.

RZ- Return to Zero (Retorno a cero), NRZ- Non Return to Zero (No Retorno a Cero), DPSK- Differential Phase Shift Keying (Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase), DQPSK – Differential Quadrature Phase-Shift Keying.

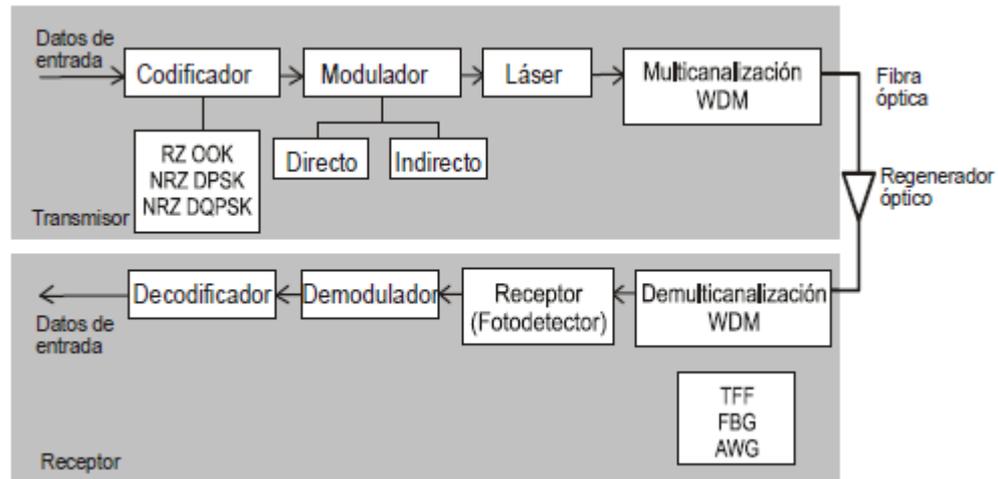


Figura 2.6: Esquema de como deber ser un sistema de comunicación óptico en una red WDM

Fuente: (Perafán, Tovar, Ordóñez, & Agredo, 2011)

## 2.5 Wavelength Division Multiplexing (WDM)

Wavelength Division Multiplexing que traduce Multiplexación por división de longitud de onda esta técnica tiene como objetivo multiplexar muchas señales sobre una sola fibra óptica por medio de portadoras que tienen diferente longitud de onda, utiliza la luz procedente de un láser o LED. Existen varios tipos de Multiplexación, tenemos la multiplexación por división de tiempo, por división de código, por división de frecuencia y por división de longitud de onda, todas tienen un objetivo en común que es llevar sobre el mismo canal de transmisión más información que proviene de diferentes fuentes. (Davila, 2014)

Los inicios de los sistemas WDM datan a fines de la década de los 80's donde se usaban dos longitudes de ondas ampliamente espaciadas (entre 1310 nm y 1550 nm), algunas veces llamadas WDM de banda ancha (sus siglas en inglés Wideband WDM). A inicio de los 90's aparece la segunda generación de WDM conocida como WDM de banda estrecha (sus siglas en

inglés Narrowband WDM) en la cual se usaban entre dos y ocho canales separados 400 GHz en la tercera ventana 1550 nm. (Davila, 2014, p. 52)

En la Figura 2.7 Se mostrará el esquema general de un sistema WDM

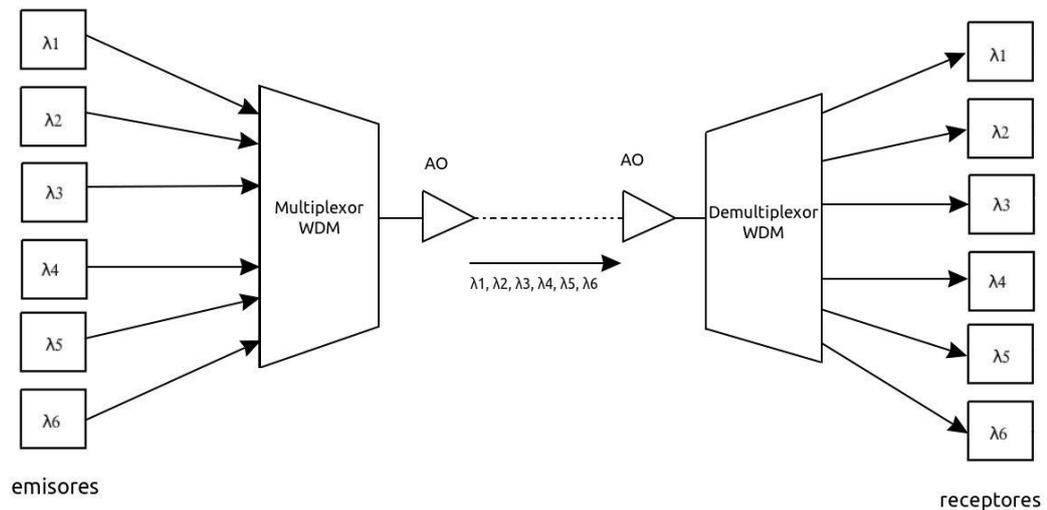


Figura2.7: Esquema de un sistema WDM punto a punto

Fuente: (Davila, 2014)

En la figura indica la operación básica de un sistema WDM con diferentes señales de longitudes de onda que utilizan diferentes canales que entran a un equipo, el cual es el encargado de multiplexarlas para luego poder enviar toda la información por un solo enlace de fibra óptica hasta que llega al demultiplexor, el cual por medio de un proceso inverso puede separar las señales para obtener la señal original.

El ancho de banda de una fibra puede dividirse hasta en 160 canales para una velocidad de bits y para esto se requiere de un multiplexor en el transmisor y un demultiplexor en el receptor. El multiplexor por división de longitud de onda se utilizó por primera vez con la fibra multimodo, utilizando tanto 850 nm como 1310 nm, ya en la actualidad las fibras monomodo pueden trasladar señales a 10 Gb/s en 64 longitudes de onda lo que se conoce como DWDM. Algunas de las fibras multimodo que han usado WDM han sido poco aceptables; sin embargo, algunos estándares utilizan CDWM para poder trasladar estas señales a velocidades mayores a 1 Gb/s en fibras multimodo.

La técnica de la WDM consiste en transmitir varias señales cada una en una longitud de onda diferente pero con la misma tasa binaria en una sola fibra óptica sin que estas tengan que interferir entre sí, ya que están lo suficientemente separadas una señal de la otra señal (el espaciamiento de canal varia) y de esta manera la capacidad del enlace se multiplica por el número de canales, esta técnica es muy utilizada para este tipo de sistemas de multiplexación por división de longitud de onda.

Las redes WDM usan de forma muy efectiva el ancho de banda de fibra ofreciendo interconexiones flexibles que se basan en un enrutamiento de longitud de onda, además la longitud de onda puede ser usada para realizar enrutamientos y conmutación lo que se considera importante para la realización de una capa de red transparente totalmente óptica en la red. (Yoo, 1996)

La longitud de onda y la longitud de frecuencia se relacionan mucho, el multiplexado por división de onda es similar a la multiplexación por división de frecuencia (FDM), son parecidas porque ambas ocupan la misma banda de frecuencia para enviar señales de información a través de la misma fibra sin que interfieran entre sí. La WDM une la luz de dos o más longitudes de ondas discretas ya que al unirse esta luz pueda entrar y salir de una sola fibra, cada longitud de onda puede transportar grandes cantidades de información de tipo analógica o digital. (Tomasi, 2003)

El WDM se logra a longitudes de ondas aproximadas 1550 nm (1.55 $\mu$ m), y una separación de frecuencia 100 GHz, separación de longitudes de onda aproximada 0.8 nm. En el sistema WDM la dispersión de longitud de onda es esencial en la operación del sistema, varias señales ocupan un mismo ancho de banda que funcionan en distintas longitudes de ondas, sin embargo no toman la misma trayectoria las señales que entran en la fibra viajan por el mismo medio, pero cada longitud de onda elige una ruta de transmisión distinta llegando al receptor en momentos ligeramente distintos. (Tomasi, 2003)

En la Figura 2.8 Se muestra como es el principio básico de la señal WDM a través de su respectivo medio de transmisión en este caso en la fibra multimodo.

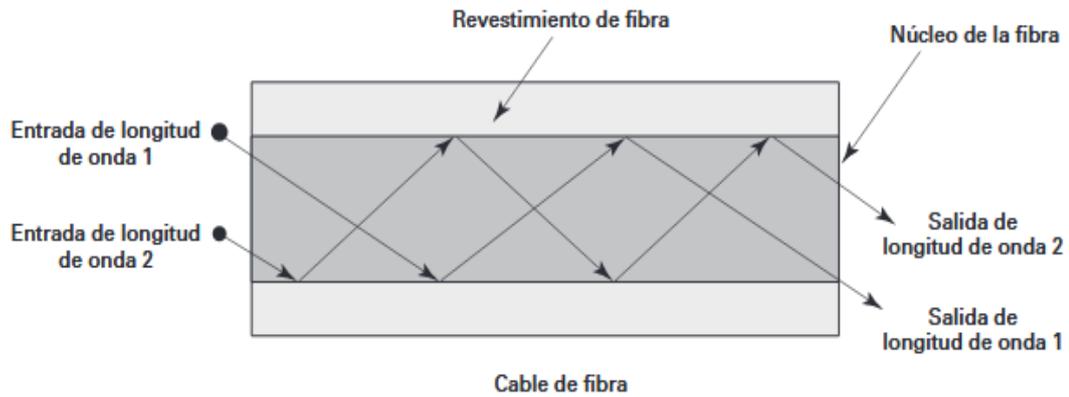


Figura 2.8: Multiplexación por división de longitud de onda

Fuente: (Tomasi, 2003)

Los primeros sistemas WDM solo soportaban dos señales, actualmente soporta hasta 160 señales y puede expandirse un sistema de fibra de 10 Gb/s con una capacidad de 25.6 Tb/s.

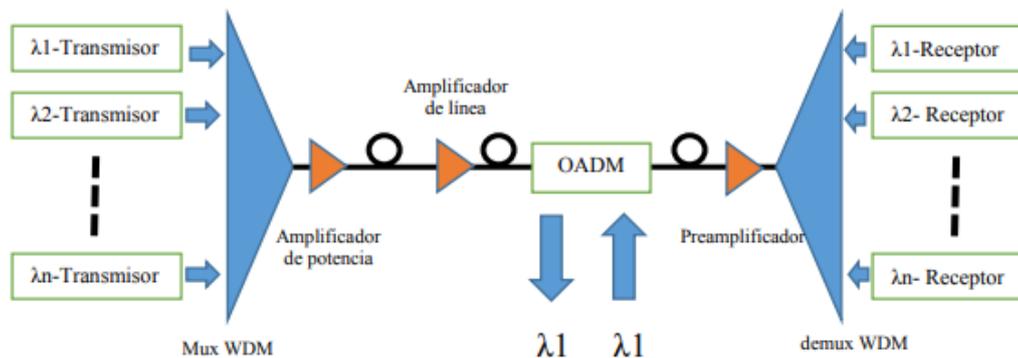


Figura 2.9 Diseño de un Sistema WDM

Fuente: (Cabrera, 2018)

La Figura 2.9 Muestra un aspecto principal de enviar varias longitudes de ondas en una sola fibra en banda de 1300 nm – 1600 nm esto es posible a través de la Multiplexación por división de longitud de onda (WDM), esta técnica es muy utilizada ya que evita la interferencia entre los mismos canales y es posible mediante la multiplexación por división de longitud de onda,

técnica muy usada para los espaciamentos de canales y así evitar interferencias entre canales. (Cabrera, 2018)

Los transmisores están contruidos con láser monomodo (SLM por sus siglas en ingles single-longitudinal mode y su traducción en español modo monolongitudinal) con una modulación externa para poder reducir el chirp. Cada canal de señal se combina mediante un multiplexor WDM antes de ser introducidas en la fibra, a lo largo del enlace se emplea EDFAs (su siglas en inglés Erbium Doped Fiber Amplifier y su traducción al español Amplificador de fibra dopada con erbio) para poder contrarrestar la atenuación. En el receptor cada canal es separado con un multiplexor WDM conducidos a un receptor, además se puede extraer un canal específico mediante un punto intermedio del trayecto por medio de multiplexadores ópticos de inserción - extracción OADM (sus siglas en inglés Optical Add-Drop Multiplexer, su traducción al español Multiplexador óptico de adición/caída).

La tecnología WDM realiza la multiplexación en frecuencia de señales ópticas y por eso la ITU (International Telecommunications Union) ha realizado una estandarización de las frecuencias, para esto ha elegido la frecuencia central de 193.1 THz lo cual corresponde a la longitud de onda central de 1552.524 nm con separación de 100 GHz a 50 GHz. La separación es uniforme si esta se presenta en el dominio de la frecuencia, no sería igual si se hiciera en el dominio de la longitud de onda en la siguiente Ilustración 10 Se observa el ancho de banda de un canal de transmitido en un sistema WDM. (Davila, 2014, p. 53)

Para fibra óptica convencional o de sílice usualmente se localizan los canales en segunda y tercera ventana para distancias cortas, para largas distancias se presentan los amplificadores ópticos y esto se aloja en tercera ventana (1535-1560 nm). La normativa de la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) no establece que solamente se utilice estos espaciamentos entre longitudes de onda, es por eso que en diversas aplicaciones se tienen separaciones entre canales (25 GHz) y en algunos ambientes se ha llegado a separaciones de hasta 1 GHz. En el caso de las fibras de plástico no hay estándares para las regiones de transmisión pero se

puede utilizar las ventanas disponibles en la fibra cruda de una hebra de plástico del tipo polimetilmetacrilato es decir 525 nm, 575 nm y 650 nm con la final de recrear un enlace que utilice la tecnología WDM.

En la Figura 2.10 Se observa el espaciado que debe tener cada canal.

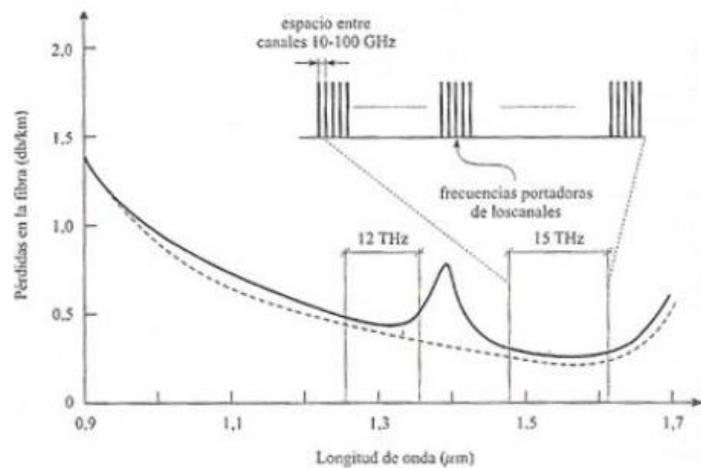


Figura 2.10: Ancho de Banda de un canal de transmisión en una red WDM

Fuente: (Davila, 2014)

### 2.5.1 Multiplexación y Demultiplexación por División de Longitud de Onda

En la Figura 2.11 Veremos una forma simple de multiplexar y demultiplexar las señales luminosas, utilizando un prisma en el que un rayo de luz policromática es impactado en la superficie del prisma, por ende el prisma actúa como el medio de dispersión provocando que el rayo inicial se divida en muchos rayos monocromáticos los cuales tienen una longitud de onda y un ángulo de salida específico. (Davila, 2014, p. 57)

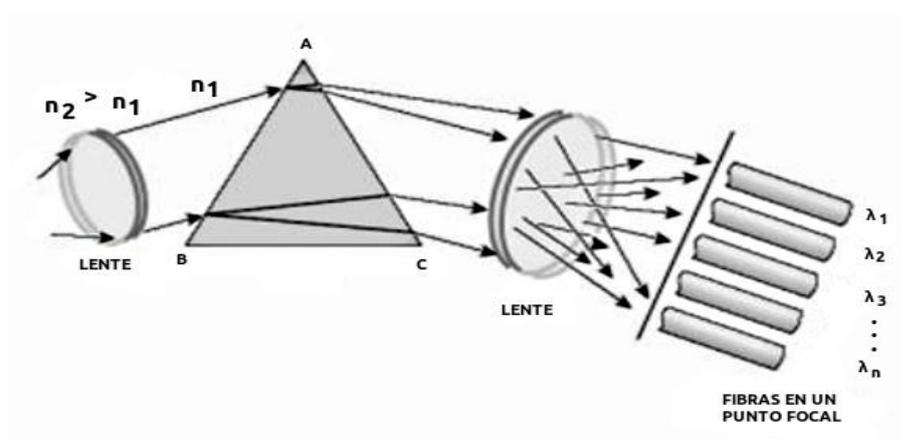


Figura 2.11: Demultiplexación por refracción por medio de prisma

Fuente: (Dávila, 2014)

Con la ayuda del lente se puede enfocar estos haces de luz hacia un arreglo de las fibras de recepción es decir, que entra una sola señal y salen varias señales para que las longitudes de onda obtenidas puedan ser enviadas a los detectores ópticos.

De forma inversa este método puede ser usado para multiplexar las longitudes de onda dentro de la fibra. Este se basaría en el método de difracción junto con el fenómeno de interferencia óptica, donde la luz policromática con un ángulo diferente y ubicación espacial pasan a través de un lente el cual está enfocado hacia una red de difracción, la cual se muestra en la Figura 2.12.

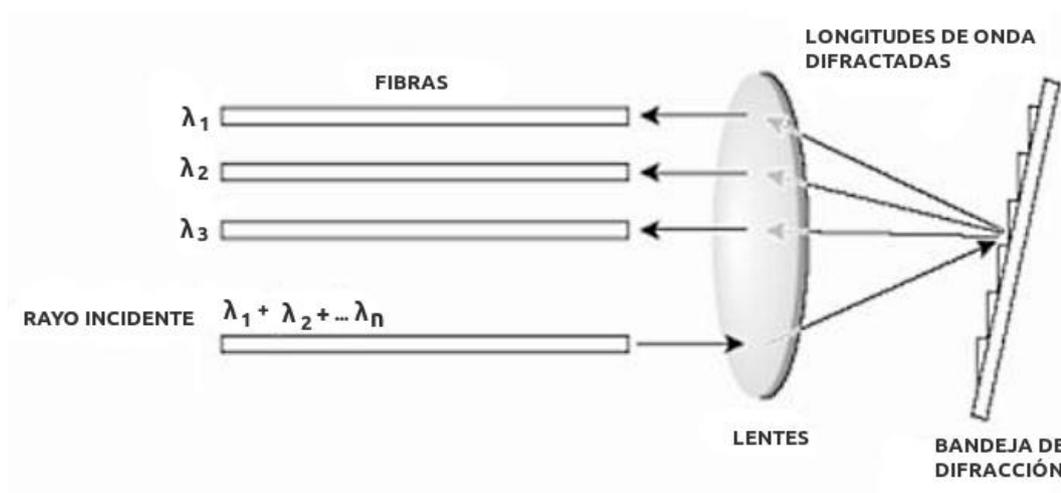


Figura 2.12: Multiplexación de una red por difracción

Fuente: (Dávila, 2014)

La red de difracción permite que las longitudes de onda independientes se reflejen hacia un conjunto de lentes para enfocarlas a un arreglo de fibras receptoras las cuales son las que envían la señal hacia los detectores respectivos. (Davila, 2014, p. 58)

### 2.5.2 Tipos de WDM

- **Densa:** (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*)
  - Larga distancia y muchas longitudes de onda.
  - En este sistema el espaciado entre las longitudes de ondas de los canales es reducido.

- Gran capacidad de transmisión, con gran número de canales.
- Coste elevado por precisión y exactitud de los dispositivos (láseres de transmisión, fotodetectores, amplificadores, etc.).
- **Ligera:** (CWDM, Coarse wavelength Division Multiplexing)
  - Aplicada en entornos metropolitanos, pocas longitudes de onda.
  - Capacidad de transmisión baja con hasta 8/16.
  - Bajo coste en los dispositivos, ya que los láseres requieren menos exactitud.

### 2.5.3 Ventajas de la WDM

- Esta técnica aprovecha mejor el ancho de banda de la fibra óptica.
- Los sistemas WDM es transparente al formato y velocidad de transmisión de los datos, una de las principales ventajas del sistema.
- En redes complejas es más sencillo emplear WDM.
- Maximiza la eficiencia de un enlace de fibra óptica al permitir enviar distintas señales por un solo hilo de fibra, disminuyendo la necesidad de añadir un hilo extra en cada canal que se necesite transportar.
- Las empresas de Telecomunicaciones están migrando sus redes a fibra óptica, donde pueden encontrar en WDM una solución económica y más sencilla.
- Transmiten una gran variedad de señales ópticas ya que son capaces de manejar diferentes tipos de señales por ejemplo SDH y PDH al mismo tiempo sin importar el protocolo.

### 2.5.4 Desventajas de la WDM

- Estos sistema (WDM) no son apropiados en fibras DSF(sus siglas en ingles Dispersion-Shifted Fiber, su traducción al español Fibra de Dispersión Desplazada) debido al efecto no lineal FWM (four-wave mixing, en español mezcla de cuarta onda).
- Los amplificadores ópticos empleados en sistema WDM requiere perfil de ganancia plano, además de proporcionar una ganancia independiente del número de longitud de onda.
- El sistema WDM requiere disponer de un receptor y un láser para cada longitud de onda, esto incrementa su coste.

- La transparencia en el sistema WDM es un inconveniente a la hora de monitorizar las señales pues no se desconoce el formato y la tasa binaria (de cada canal) lo que dificulta el monitoreo de la tasa de error (BER, bit error rate).

## **2.6 Diseño de un sistema de Multiplexación por divisor de longitud de frecuencia**

Un sistema óptico con WDM diseñado para evitar que los procesos dispersivos alteren a la señal y de esta manera poder mantener un nivel de calidad en sistema dado por el BER.

Hay que considerar que existe un gran mercado competente con las mismas o similares funcionalidades, para esto se debe optimizar al máximo el coste de los equipos, del despliegue y elementos de la red, ya que algunas veces resultan ser precios muy elevados, por ello tanto el diseño como el coste debe ser estudiado paralelamente para así poder ofrecer la mejor oferta a los clientes de potencia.

Existe una multitud de variables que afectan al diseño y a la planificación de los sistemas WDM, los cuales hay que tener en consideración para lograr un diseño óptico, como la calidad, capacidad y coste que vaya acorde con los requerimientos del cliente. Hay que considerar el tipo de fibra que tenga el operador desplegado entre los nodos, nodos existentes y posibles nodos en donde poder apoyarse en caso de que se necesite amplificar la señal.

### **2.6.1 Parámetros de transmisión**

Los sistemas WDM son de gran importancia en la capa óptica ya que es la encargada de envío de señales a través de la red, a continuación se detallara los parámetros básicos:

- **Espaciamiento del Canal**

Los espaciamientos entre canales van desde los 12.5 – 25 – 50 - 100 GHz hasta 200 GHz, estos espaciamientos se encuentran estandarizados por UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) donde es recomendable 50 y

100 GHz de espaciamiento, estos se encuentran descritos en UIT.G694.1.29 entre menos sea el espaciamiento mayor es la diafonía limitando su máxima velocidad de transmisión de datos por la longitud de onda.

- **Balance de potencia**

La señal de potencia en los sistemas ópticos va decreciendo conforme sea la distancia, el balance de potencia es el que nos permite saber de cuanto es la cantidad de potencia que llega al receptor, teniendo en cuenta las atenuaciones presentes, potencia transmitida, ganancia de los amplificadores, etc.

- **Balance de tiempos**

Está determinado por los tiempos de subida del transmisor, receptor y los diferentes procesos dispersivos que se presentan en la fibra. También permite poder establecer el tiempo de subida del sistema y está relacionado con su velocidad para un BER (tasa de error) dado. (Orozco & Trujillo, 2008, p. 52)

- **Codificación**

En esta etapa el codificador es el encargado de convertir las señales eléctricas a señales ópticas para luego ser decodificadas en el receptor donde son convertidas en señales eléctricas. Los formatos de modulación más utilizados son: NRZ (No retorno a cero) y RZ (retorno a cero).

- **BER (Tasa de bit errado)**

El BER es la cantidad de bits errados en un total de bits transmitidos, el BER permite analizar un transmisor, un receptor y el medio que existe entre ambos y de esta forma poder observar los resultados. Los valores del BER de  $10^{15}$  para redes WDM en especial para redes de largas distancias. Es decir 1 bit errado en  $10^{15}$  bits transmitidos. (Buelvas, Téllez, & Mateus, 2010, p. 74)

- **Ruido**

Se presenta en sistemas ópticos donde incluye procesos de amplificación. El OSNR (relación señal a ruido óptico) es un parámetro importante entre las potencias netas de la señal y el ruido.

### 2.6.2 Diagrama de Bloque

En la Figura 2.13 Veremos que Un diagrama de bloque que representa el funcionamiento de un sistema WDM, los parámetros de un diagrama se encuentran estandarizados por la ITU-T G.694.2 (2003) para la simulación de un sistema WDM, el cual se compone por un transmisor óptico, un multiplexor, divisor de frecuencia, canal óptico.



Figura 2.13: Diagrama de bloque de un sistema WDM

Elaborado por: Autor

### 2.7 Stimulated Raman Scattering (SRS)

Este fenómeno fue descubierto por el físico indio Chandrasekhara Venkata Raman en el año 1928. El científico dio el nombre al fenómeno inelástico de la dispersión de la luz, el cual permite el estudio de rotaciones y vibraciones moleculares. El físico se inspiró en trabajos e investigaciones realizadas anteriormente por Rayleigh, Rayleigh decía que el color azul del mar no es más que el reflejo del cielo visto en reflexión, Raman mediante un experimento demostró que el color azul del agua procedía de un fenómeno propio explicado como la dispersión de la luz debido a interacciones con moléculas del agua.

El efecto Rayleigh es un efecto elástico eso significa que la luz no gana ni pierde energía durante la dispersión por ende se mantiene en la misma longitud de onda, la cantidad de dispersión depende en gran medida de la longitud de onda, este hecho hace que el cielo sea azul, los componentes

azules de la longitud de onda más corta en la luz del sol son Rayleigh dispersos en la atmosfera, la luz azul se ve desde todo el cielo, la dispersión de la luz azul (cielo) desde su camino directo desde el sol también hace que el sol parezca amarillo.

En la dispersión de Rayleigh, la dispersión del fotón interactúa con la molécula y este a su vez polariza la nube de electrones elevándola a un estado de energía virtual teniendo una extremadamente corta ( $10^{-14}$  segundos) la molécula pronto vuelve a su estado fundamental, liberando un fotón. Este puede ser levantado en cualquier dirección dando como resultado la dispersión, sin embargo como la molécula está volviendo a su estado fundamental la energía liberada del fotón es la misma que la del fotón inicial por ende la luz dispersada tiene la misma longitud de onda.

Cuando Chandrasekhara Venkata Raman descubrió el fenómeno solo se disponía de instrumentos crudos, el físico Raman uso la luz solar como fuente y un telescopio como colector (el detector eran sus ojos), se detectó un fenómeno tan débil como la dispersión Raman que fue realmente notable, las primeras investigaciones se centraron en el mejor desarrollo de fuentes de excitación. (Ferraro, Nakamoto, & Brown, 2003)

En la Figura 2.14 La dispersión Estimulada de Raman es aquella que genera la transferencia de energía de los canales con mayor frecuencia a canales con menor frecuencia, el coeficiente de ganancia de Raman ( $g_R$ ) es el parámetro más importante para poder describir a la dispersión estimulada de Raman. (Perafán et al., 2011, p. 29)

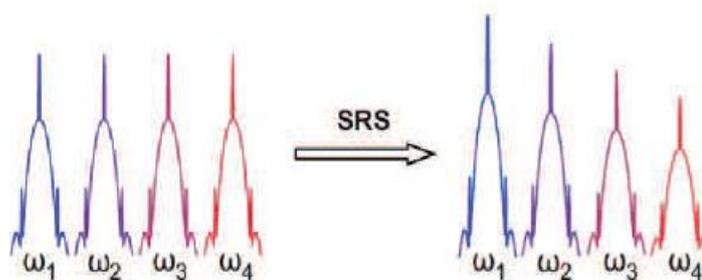


Figura 2.14: Principios del Efecto no Lineal denominado Dispersión Estimulada de Raman

Autor: (Perafán et al., 2011)

Este tipo de dispersión de la luz se debe a que la luz cambia cuando es dispersada, normalmente la mayor parte de las moléculas se encuentran en un estado de baja energía pero cuando entran a un estado de agitación aquellas moléculas pasan a un estado energético superior conocido como estado de excitación. Esta variación en la frecuencia sucede cuando la energía de un fotón es extraída por una molécula.

El proceso de dispersión sucede cuando el fotón incidente lleva a la molécula a un estado de excitación virtual (la molécula no puede permanecer en estado de excitación virtual). Si la molécula cae en el mismo nivel de excitación en el que se encontraba anteriormente se obtendría una dispersión Rayleigh y no habría una variación en la frecuencia del fotón emitido, pero sí en cambio de dirección de la propagación es decir que los fotones se dispersarían en todas las direcciones.

La Dispersión Estimulada de Raman en base a los movimientos que producen las vibraciones de las moléculas, la variación de la polarizabilidad a la frecuencia del fonón óptico que es provocada por el haz intenso de bombeo, estos cambios vibracionales (fonones ópticos) crean la redistribución de carga en una nube electrónica de la molécula conocida como polarizabilidad. (Guano et al., 2014)

Las componentes Anti-Stokes y Stokes se forman cuando el fotón esparcido al absorber la energía del fotón incidente tiene mayor energía y de esta manera se forman ambas componentes que producen una realimentación positiva. La dispersión Raman estimulada es un proceso de cuatro fotones que conducen a la transferencia de energía de una onda de bombeo a ondas de menor frecuencia (Stokes) y ondas de mayor frecuencia (Anti-Stokes) a través de un intermediario óptico en el medio de transmisión. (Blow & Wood, 1989)

La eficiencia del proceso no lineal es directamente proporcional a la potencia de bombeo, longitud efectiva de la fibra y el coeficiente de ganancia que depende del material e inversamente proporcional al área efectiva de la fibra. El coeficiente de Raman crece de forma aproximadamente lineal hasta

una separación entre portadoras de unos 15 THz, para una longitud de onda de 1550 nm.

La Figura 2.15 Muestra la transferencia de potencia de la señal en longitudes de onda menores a mayores.

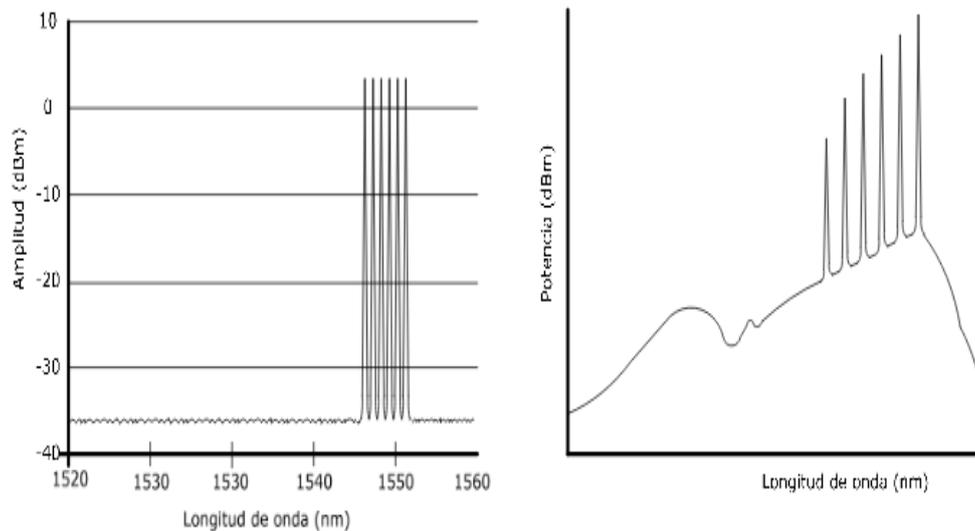


Figura 2.15: Transferencia de potencia de señal en longitudes de onda menores a mayores

Fuente: (Alvarez et al., 2007)

Para poder explicar este fenómeno de dispersión de la luz hay que considerar a la radiación electromagnética como partícula que cuando un fotón interactúa con la molécula este puede ser dispersado de dos maneras:

- Dispersión Elástica: El fotón emitido tiene la misma longitud de onda, misma frecuencia y misma energía que el fotón incidente.
- Dispersión Inelástica: Entre el fotón emitido y el fotón incidente hay un cambio en la frecuencia, en la energía y longitud de onda. Este cambio puede ocurrir de diferentes maneras:

1) Cuando el fotón cede energía a la molécula, la energía de la radiación dispersa es menor que la radiación incidente (dispersión Stokes)

2) Si el fotón obtiene energía de la molécula se puede observar lo contrario (Dispersión Anti-Stokes).

3) Ambas componentes producen una realimentación positiva.

A la transferencia de potencia se la conoce como bombeo, la potencia de bombeo, la longitud efectiva de la fibra y un coeficiente de ganancia son directamente proporcional al proceso no lineal.

En la Figura 2.16 Observamos en el diagrama de niveles de energía de las tres formas de dispersión.

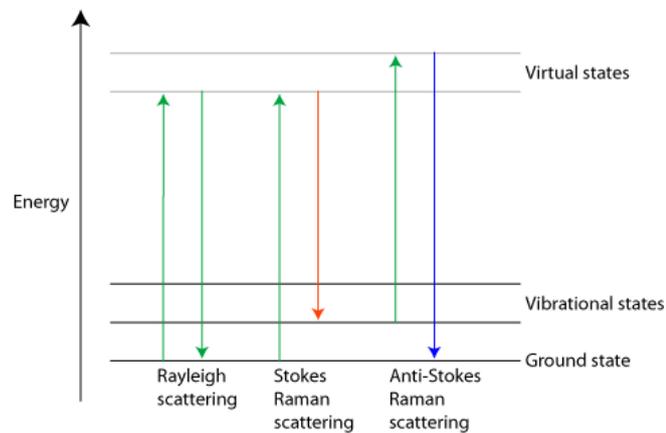


Figura 2.16 Diagrama de niveles, mostrando tres formas de dispersión

Fuente: («DoITPoMS - TLP Library Raman Spectroscopy - Raman scattering», s. f.)

Uno de los experimentos que uso Raman para la demostración de la dispersión inelástica fue el uso de la luz del sol enfocada en un telescopio para así poder obtener una luz de alta intensidad, esta paso a través de un filtro monocromático luego, a través de una variedad de líquidos donde se sometió a dispersión una vez hecho todo el proceso observó con un filtro cruzado que bloqueaba la luz monocromática puedo observar pasar algo de luz a través de aquel filtro que mostraba que la longitud de onda había cambiado.

En la Figura 2.17 Podemos observar el experimento que realizó C. V. Raman.

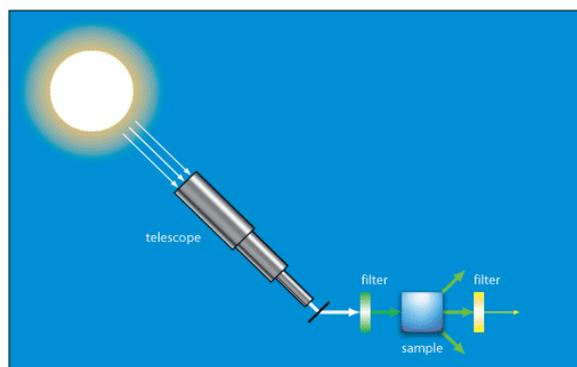


Figura 2.17 Experimento para la demostración de la dispersión inelástica

Fuente: («DoITPoMS - TLP Library Raman Spectroscopy - Raman scattering», s. f.)

La dispersión Raman es inelástica, los fotones de luz pueden perder o ganar energía durante el proceso de dispersión dando como resultado el aumento o la disminución de la longitud de onda respectivamente. Si la molécula se eleva desde un estado de suelo a un estado virtual y luego vuelve a caer a un estado de vibración es decir energía más alta, el fotón dispersado tiene menos energía que el fotón incidente, por ende una longitud de onda más a esto llamamos Dispersión de Stokes, por otro lado si la molécula se encuentra en un estado vibracional y luego de la dispersión está en su estado fundamental, el fotón dispersado tiene más energía por ende una longitud de onda más corta, a esto llamamos Dispersión Anti-Stokes.

En la dispersión de Raman encontramos líneas Stokes y Anti-Stokes la frecuencia corresponde a la suma y diferencia de frecuencias de luz incidente y frecuencias vibracionales moleculares, al interactuar los fotones con una molécula una parte de esa energía se convierte en varios modos vibracionales de la molécula, la luz al ser dispersada pierde energía que es equivalente a la energía dada a las vibraciones moleculares a esto se llama efecto Raman Stokes, pero si a la molécula se la encontraba inicialmente en estado rotacional o vibracional excitado, era posible que la luz dispersada tenga mayor energía que la incidente esto se llama efecto Raman Anti-Stokes por lo general la Dispersión Raman Stokes es más intensa que la Dispersión Anti-Stokes. (Pérez, Murillo, & Gomez, s. f.)

El efecto Raman de mayor importancia es el de energía vibracional, aunque también se estudia a los efectos rotacionales y electrónicos. El cambio al efecto Raman está determinado por el espaciado que existe entre los estados vibracionales y estados fundamentales (fonones del sistema). La luz dispersada de Stokes y Anti-Stokes se desplazara una distancia igual que los lados opuestos de la luz dispersada de Rayleigh, por ende el espectro es simétrico son respecto a la longitud de onda de la luz utilizada, con la diferencia en las intensidades.

Como ya se sabe el cambio de Raman depende de la separación de energía de los modos de las moléculas, sin embargo no todos los modos son

Raman “Activos” o sea, no todos aparecen en los espectros de Raman, para que un modo sea Raman activo implica un cambio en la polarizabilidad.

El SRS es un efecto interferente entre dos longitudes de onda con un espaciamiento cercano a 110 nm, este efecto (SRS) se emplea en la Amplificación Raman si la señal de bombeo es continua es decir sin información, en el efecto SRS se genera ruido por emisión espontanea (ASE, Amplified Spontaneous Emission) que degrada el desempeño de los enlaces ópticos. (Peralta, Tipán, & Amaya, 2014, p. 10)

La dispersión estimulada de Raman es muy similar a la dispersión estimulada de Brillouin, la diferencia es que la modulación que generan las bandas laterales se producen a mayor frecuencia es decir, que la frecuencia fundamental está muy aleja de las bandas laterales. La dispersión de Raman suele tener una potencia umbral ( $P_R$ ) tres órdenes de magnitud mayor que Brillouin. (Santamaría, 2015, p. 24)

$$P_R = 5.9 \cdot 10^{-2} d^2 \lambda \alpha_{dB} \text{wattios}$$

Donde:

$P_R$  : Potencia Umbral

d: Diámetro del núcleo (micrómetros)

$\lambda$ : Longitud de onda transmitida (micrómetros)

$\alpha_{dB}$  : Atenuación de la fibra en decibelios

Ejemplo:

Una fibra monomodo con longitud suficiente tiene una atenuación de  $0.5 \text{dBK}m^{-1}$  en una longitud de onda  $1.3 \mu\text{m}$ . La fibra tiene un núcleo  $6 \mu\text{m}$ .

$$\begin{aligned} P_R &= 5.9 \cdot 10^{-2} d^2 \lambda \alpha_{dB} \\ &= 5.9 \cdot 10^{-2} 6^2 \cdot 1.3 \cdot 0.5 \\ &= 1.38 \text{ W} \end{aligned}$$

### 2.7.1 Representación matemática de Dispersión Estimulada de Raman

El estudio de este fenómeno no-lineal involucra la siguiente representación que será útil para los parámetros como: umbral de potencia y ganancia Raman. (Guano et al., 2014)

$$\frac{dI_s}{dZ} = g_R I_p I_s - \alpha_s I_s$$

$$\frac{dI_p}{dZ} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} g_R I_p I_s - \alpha_p I_p$$

Donde:

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

$\omega_p$  : Frecuencia de la onda incidente

$I_s$  : Intensidad de la onda de Stokes

$I_p$  : Intensidad de la onda incidente

$\alpha_s$  : Coeficiente de absorción de la onda Stokes

$\alpha_p$  : Coeficiente de absorción de la onda incidente

$g_R$  : Coeficiente de ganancia de Raman

En la Ilustración 18 Se puede ver el coeficiente de ganancia  $g_R$  para una fibra de silicio en función del desplazamiento de frecuencia a una longitud de onda  $\lambda_p = 1550$  nm. (García, 2007)

En la Figura 2.18 Se puede observar la representación de la Ganancia Raman y el desplazamiento de la frecuencia en THz

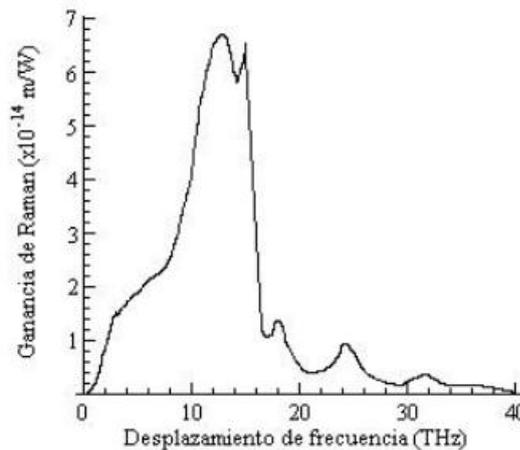


Figura 2.18 Representación de ganancia de Raman, para fibra de sílice

Fuente: (García, 2007)

En la ganancia Raman lo más destacable es que se extiende a lo largo de una rango de frecuencia de 40THz y una longitud de onda  $\lambda_p = 1550$  nm donde alcanza un valor aproximado de  $6.67 \times 10^{-14}$  m/W para un desplazamiento de frecuencia con un aproximado 13.2 THz (150 nm desplazamiento de longitud de onda).

La respuesta no lineal tanto para SRS y SBS se representan en NLSE (non linear Schrödinger equation que en español se traduce ecuación de Schrödinger no lineal) en la susceptibilidad de tercer orden.

Para el efecto SRS y en particular para la fibra monomodo, una potencia total transmitida es:

$$P_{out} = g_R \frac{P_{in}^2 \times L_{eff}}{A_{eff}}$$

Donde:

$A_{eff}$  : Área efectiva del tramo de la fibra

$L_{eff}$  : Longitud efectiva del tramo de fibra

$P_{in}$  : Potencia incidente

$g_R$  : Coeficiente de ganancia de Raman

En la Dispersión Estimulada de Raman existe una potencia umbral que se define como la potencia de onda incidente, la onda incidente y la onda de Stokes tienen la misma potencia a la salida de la fibra, una aproximación para esta potencia umbral es: (García, 2007)

$$P_{umbral} = 16b \frac{A_{eff}}{L_{eff} g_R}$$

Donde:

$L_{eff}$  : Longitud efectiva del tramo de la fibra

$A_{eff}$  : Área efectiva del tramo de la fibra

$g_R$  : Coeficiente de ganancia de Raman

$b$ : Puede ser 1 y 2 dependiendo de las polarizaciones relativas entre la onda Stokes y la onda incidente.

Ejemplo, asumiendo que  $b=1$  valor de la potencia umbral para una onda incidente a  $\lambda_p= 1550$  nm (sería de 600 mW).

El potencial umbral en la onda Stokes, generan en el sentido opuesto al de la propagación de la onda incidente, la expresión es similar y se puede sustituir el valor 16 por el valor 20.

Para poder minimizar el efecto de SRS es necesario reducir al máximo el espacio entre canales y no superar a la potencia umbral.

### 2.7.2 Frecuencia Raman

Lo fonones ópticos dependen estrictamente de la composición y estructura de las moléculas, por ende cada molécula posee información única.

La frecuencia Raman es aquella que representa el valor central del espectro de la ganancia Raman, de una forma experimental se ha determinado que para las fibras monomodo de silicio es  $\nu_R= 13$  THz. (Guano et al., 2014)

### 2.8 Diagrama de Ojo

El Diagrama de Ojo corresponde a una técnica donde se analizan las ondas digitales, a través de múltiples datos transmitidos por un enlace, este puede ser por tiempo definido o una cantidad de bits variables con tiempo variable. Cuando se realiza el análisis de Ojo existe cuatro parámetros importantes (tiempo de subida, tiempo de bajada, sobre impulso positivo, sobre impulso negativo). (Zúñiga, 2009)

Propiedades del Diagrama de Ojo:

**Nivel Cero:** Hace referencia al nivel cero lógico.

**Nivel Uno:** Mediación promedio del valor de uno lógico de las señales transmitidas, no todos los transmitidos alcanzan el mismo valor, esta propiedad se determina mediante un promedio de los valores alcanzados por los datos transmitidos.

**Cruce del Ojo:** Describe dos valores importantes que son el tiempo y la amplitud, se refiere a los puntos en donde empieza y termina el ojo.

En la Figura 2.19 Observaremos los cuatro parámetros importantes del Diagrama de Ojo.

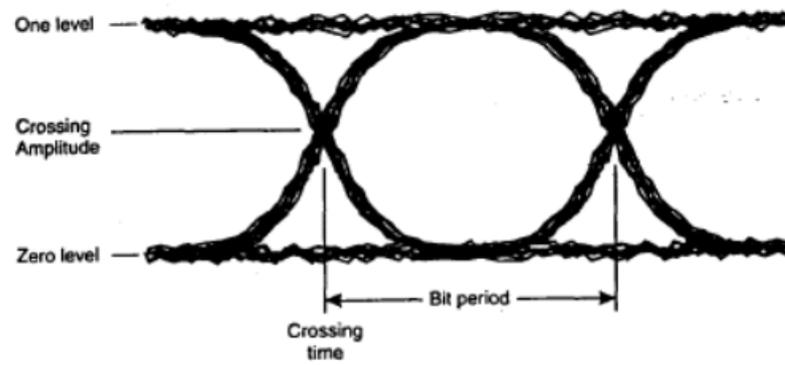


Figura 2.19: *Diagrama de Ojo y propiedades*

Fuente: (Zúñiga, 2009)

## **CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN**

### **3.1 Software de Simulación elegido.**

Una vez comprendido el origen del efecto no lineal denominado Dispersión Estimulada de Raman, es necesario demostrar la teoría y esta demostración se verá reflejada en la investigación y recopilación de datos donde por medio de una simulación de un intervalo de tiempo a corta distancia observaremos el resultado de nuestra investigación.

Las grandes compañías de Telecomunicaciones por fibra óptica y proveedores de red constan con equipos de alta calidad y mejores recursos para simular, experimentar y analizar escenarios (campos) y con softwares que brindan gran ayuda para el análisis de estos efectos no lineales que se presentan en todo dieléctrico, para esto existen varios software económicos o libres que permiten al usuario poder simular su diseño de red, donde podrá observar dichos resultados y así poder evidenciar degradaciones o atenuaciones que se van presentando en la señal.

El software a usar se llama Optisystem y permite diseñar y simular enlaces, esta herramienta fue creada para poder diseñar redes para fibra óptica y posee muchos componentes en su librería que facilita al usuario a desarrollar la red que desee analizar, el software Optisystem se lo puede encontrar en la página oficial de Optiwave, ahí se puede encontrar mucha información sobre la herramienta, de cómo usar correctamente y sobre la forma correcta de como el usuario debe descargar la aplicación, además se encontrara muchos ejemplos de cómo poder usarla, una vez que te registras puedes disfrutar de 30 días para desarrollar cualquier diseño de red de fibra óptica.

Actualmente la industria de las Telecomunicaciones cuentan con softwares especiales y mucho más avanzados algunos son muy costosos para poder medir, analizar y simular cualquier tipo de evento que se presente en la fibra óptica, a medida que la tecnología avanza muchos ingenieros optan por aprender y estudiar a fondo acerca de nuevas herramientas para de esta forma tener bases sólidas de que como utilizar este tipo de herramientas (software)

que puedan ayudar a minimizar este tipo de efecto y saber en qué tramo de la fibra se va manifestando.

A continuación en la figura 3.1, se podrá observar la interfaz gráfica de inicio al momento de ejecutar el programa

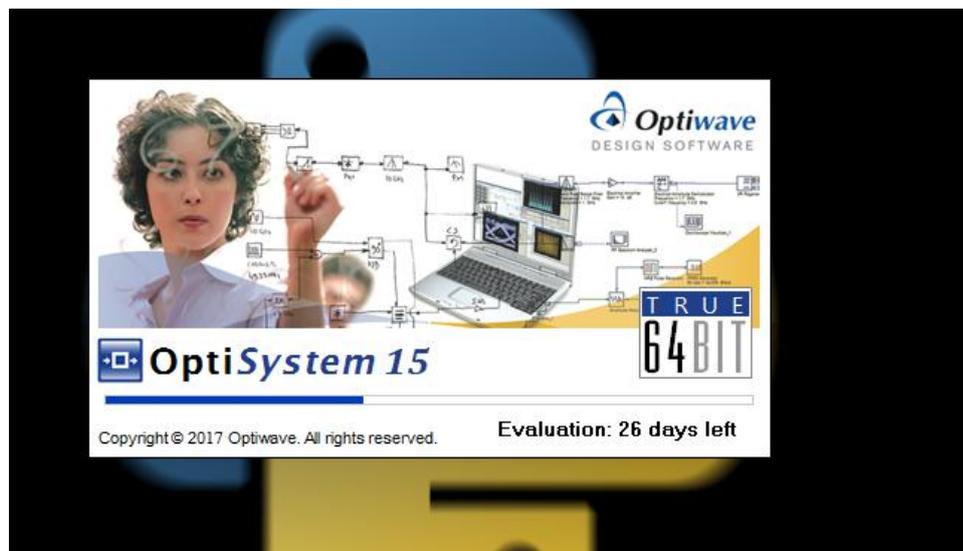


Figura 3.1 Interfaz Inicial de Optisystem

Fuente: («OptiSystem Archives», s. f.)

### 3.2 Pasos de cómo se debe descargar de forma correcta el software y de cómo realizar una simulación en software Optisystem para redes ópticas.

Para poder acceder a la descarga de la aplicación que se encuentra en la página oficial de optiwave, se debe registrar para poder acceder al modo prueba por 30 días, es la única forma de poder descargar el software. A continuación se detallará los pasos que debe realizarse para poder hacer la descarga correspondiente:

1. Una vez registrado descarga la versión de prueba gratuita de software en el siguiente enlace:  
<https://optiwave.com/upgrades/optisystem-15-0-0-customer-upgrade/>
2. En el mismo Link se encuentra un PDF que indicara como usted puede hacer la instalación de forma correcta.

3. Una vez que se ha instalado correctamente el software, al ejecutarlo podrá visualizar la interfaz gráfica.
4. En la parte superior encontraremos una barra con muchas opciones, y daremos clic en “file” y buscaremos la opción “new”.

En la Figura 3.2 Se observa de como el usuario debe empezar para crear su red a diseñar.

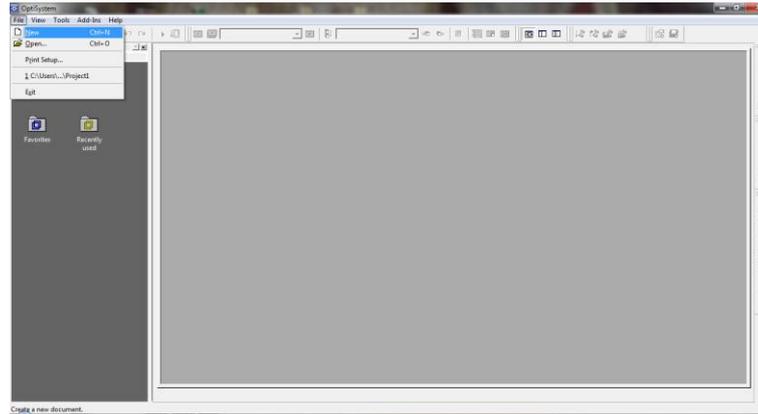


Figura 3.2: Interfaz gráfica de software Optisystem

Elaborado por: Autor

5. En el lado izquierdo encontraremos “component library”, en donde podremos realizar la búsqueda de los distintos dispositivos que usaremos para realizar la red que vamos a simular. Figura 3.3

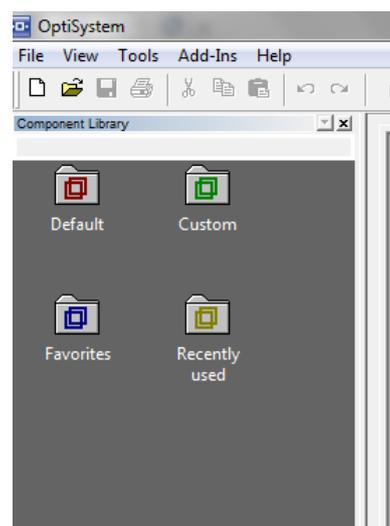


Figura 3.3: Component Library

Elaborado por: Autor

6. Se puede realizar la búsqueda de los componentes de muchas maneras, navegando en las distintas carpetas. Figura 3.4

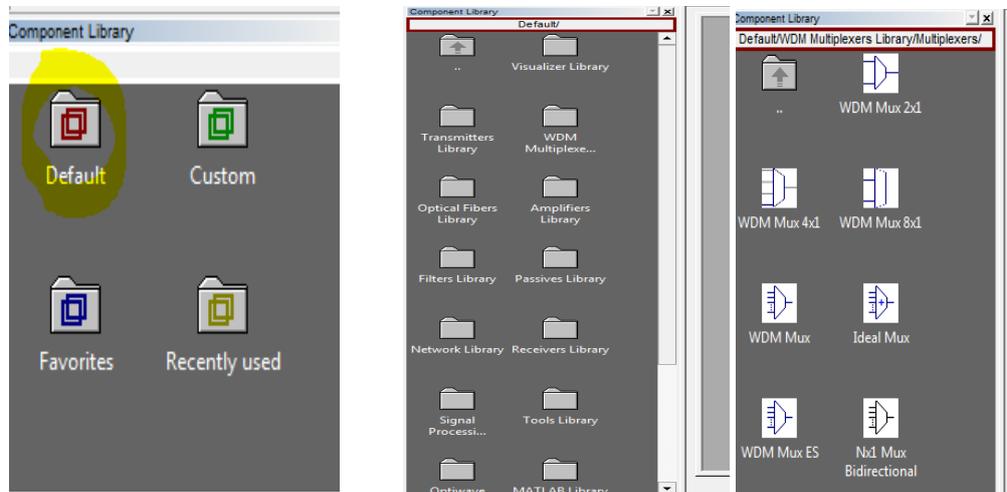


Figura 3.4: Realización de Búsqueda de Componentes

Elaborado por: Autor

### 3.3 Diseño de simulación del sistema WDM 1 canal

En el siguiente modelo de simulación se ha diseñado para la modulación de un solo canal, el cual incorpora transmisor con frecuencia de 1550 nm, modulación NRZ, una fibra monomodo como medio de transmisión 10 km, un photodetector PIN, un filtro bessell pasa bajo y el analizador BER. Figura 3.5

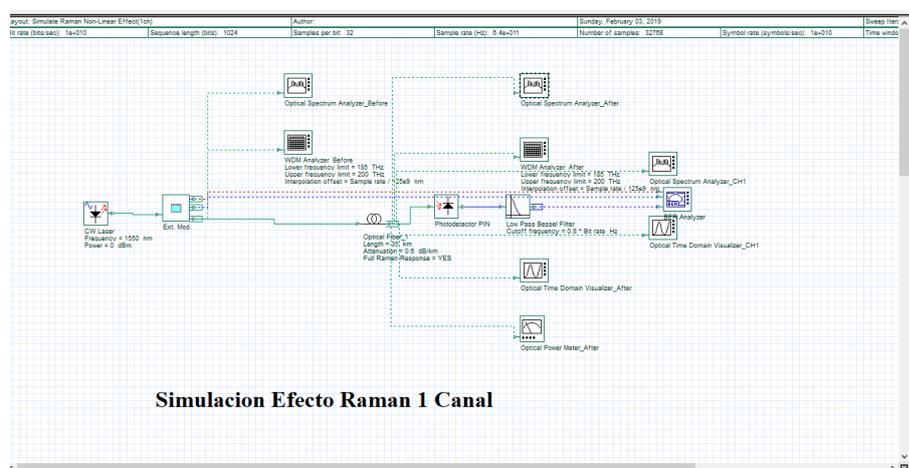


Figura 3.5: Simulación de red óptica WDM 1 Canal

Elaborado por: Autor

- **Emisor**

El CW Laser genera una señal óptica de onda continua, en esta simulación encontraremos 8 generadores de señal con una frecuencia de 1550 nm y la potencia de 0 dB. A su vez este se conecta a una extensión donde se encuentra un generador aleatorio de secuencia de bits, modulación NRZ. En la figura 3.6 Se observa el generador de señal, en la Figura 3.7 detalla el Emisor.

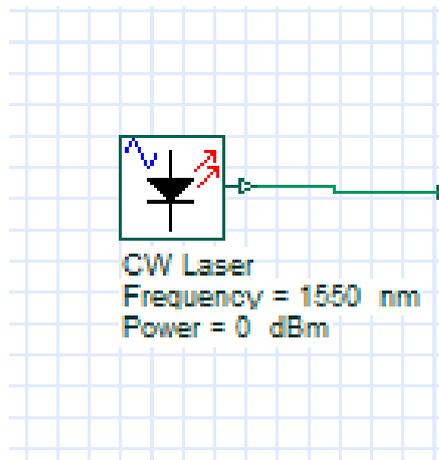


Figura 3.6: *Generador de señal óptica*

Elaborado por: *Autor*

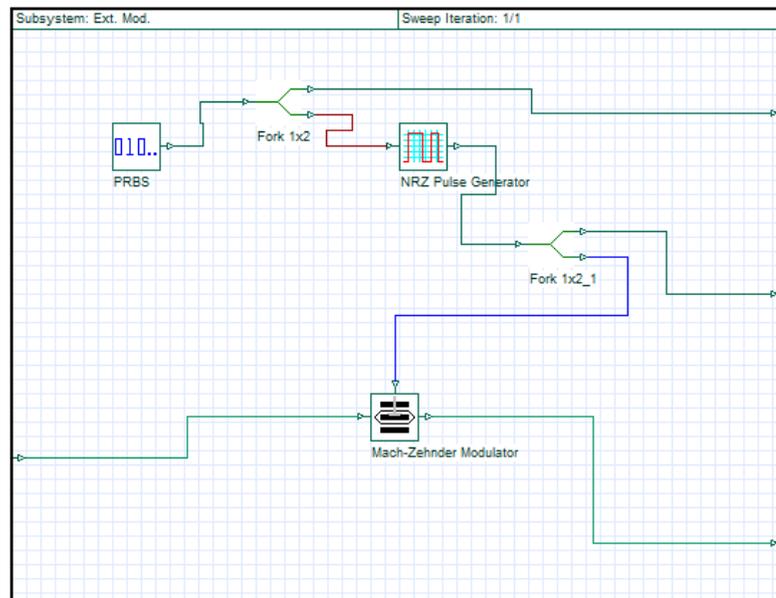


Figura 3.7: *Emisor: Generador, NRZ, Modulador*

Elaborado por: *Autor*

- **Medio de Transmisión Óptico**

El medio de transmisión óptico es una fibra óptica monomodo de 35 Km, con una atenuación de 0.6 dB/Km. Figura 3.8

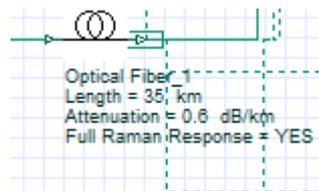


Figura 3.8: Canal Óptico

Elaborado por: Autor

- **Receptor**

El receptor está compuesto por un Fotodiodo PIN y un Filtro Bessel pasa bajo. Figura 3.9

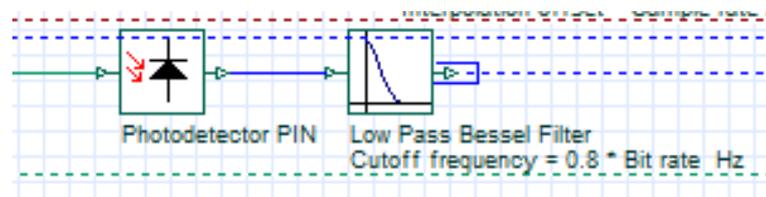


Figura 3.9: Receptor

Elaborado por: Autor

También encontramos un analizador de espectro óptico a la salida del receptor, un analizador WDM, un visualizador óptico de dominio de tiempo y un medidor de potencia óptica. Figura 3.10

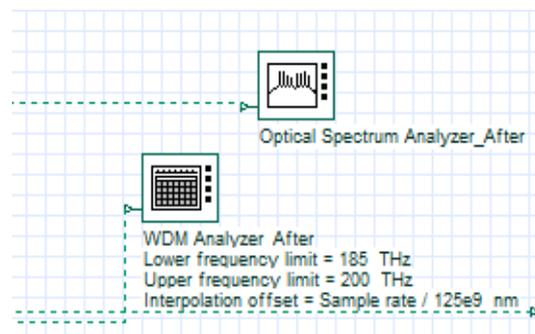


Figura 3.10: Analizador de espectro óptico y analizador WDM

Elaborado por: Autor

- **Analizador BER**

En el analizador podremos observar el resultado de nuestra simulación.

Figura 3.11

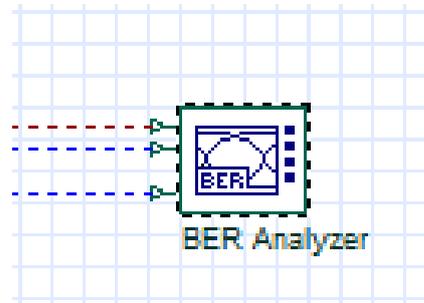


Figura 3.11: Analizador BER

Elaborado por: Autor

### 3.4 Análisis de resultados obtenidos 1 canal

La simulación que se realizó en el siguiente trabajo de titulación se utiliza una red óptica utilizando la técnica WDM de un solo canal, es decirse observara una sola señal, en el diagrama de ojo se podrá evidenciar el resultado obtenido. Figura 3.12

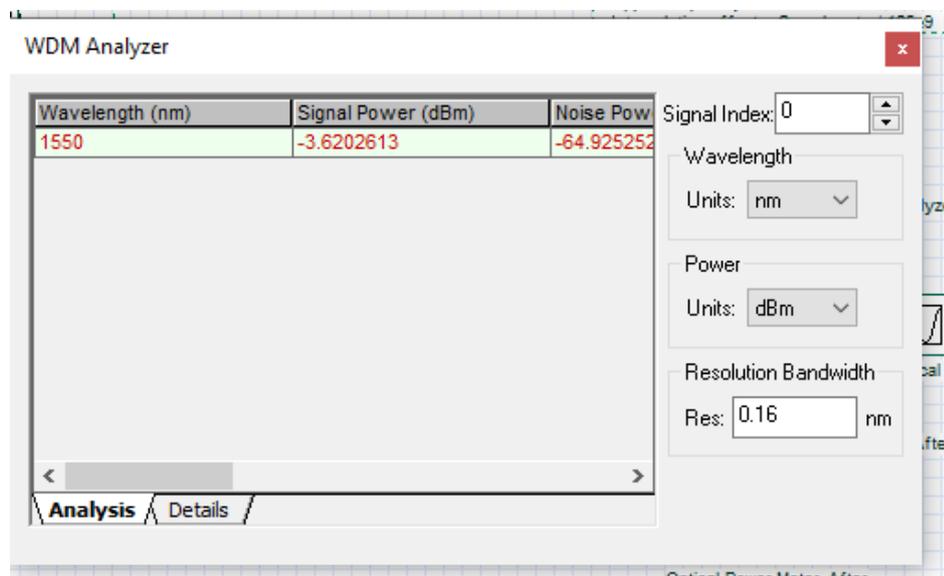


Figura 3.12: Generador de señal

Elaborado por: Autor

- **Nivel de Amplitud en el espectro óptico a la salida del receptor**

A continuación se observara el nivel de amplitud a la salida del receptor.

En la Figura 3.13 Analizador de espectro y en la Figura 3.14 Analizador WDM

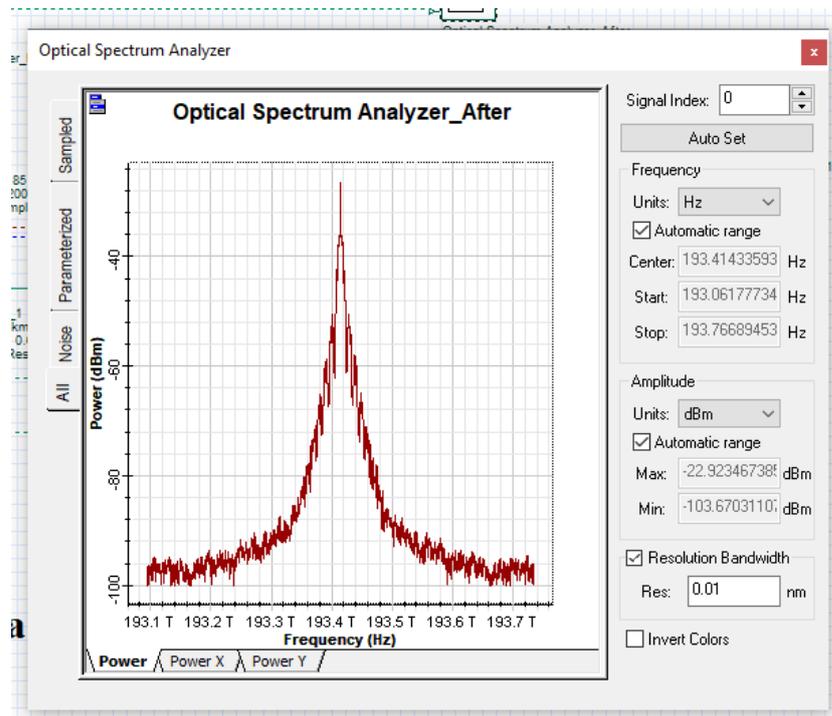


Figura 3.13: Espectro óptico

Elaborado por: Autor

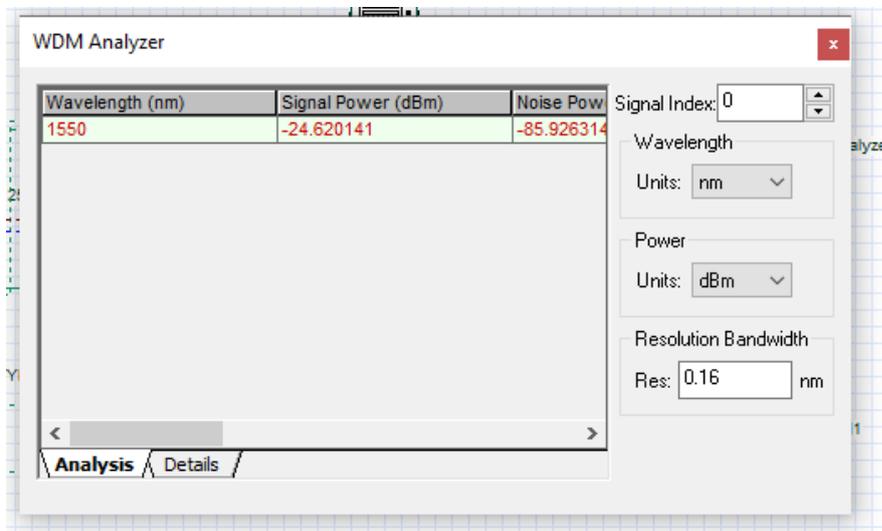


Figura 3.14: Analizador a la Salida con efecto SRS

Elaborado por: Autor

- **Tasa de Error en bits (BER)**

En la Figura 3.15 Se observara el factor Q, el mínimo valor del BER, apertura de ojo.

En el analizador de BER podremos saber si no sobre pasa la potencia umbral y de esta manera poder obtener los datos correctos.

Resultado expuesto en el BER.

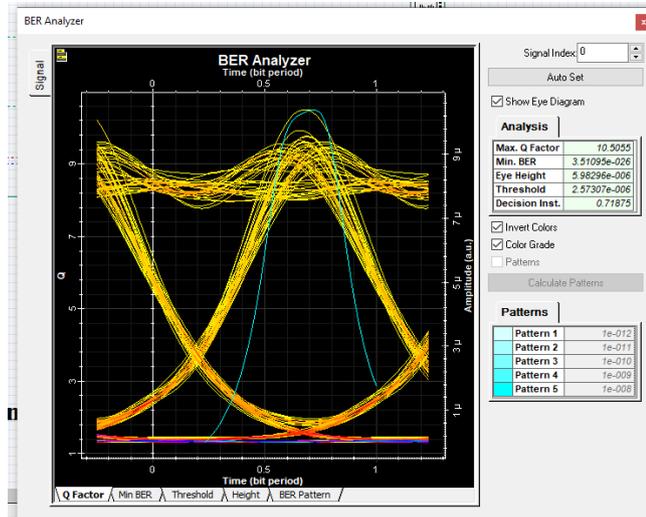


Figura 3.15: Analizador BER

Elaborado por: Autor

### 3.5 Análisis obtenidos de simulación 4 canales

En la siguiente simulación se ha diseñado para modular cuatro canales, el cual incorpora cuatro generadores ópticos, un transmisor WDM Mux con frecuencia de 1550 nm, espaciado de frecuencia de 100 GHz, ancho de banda 100 GHz, un generador de pulso NRZ. Figura 3.16

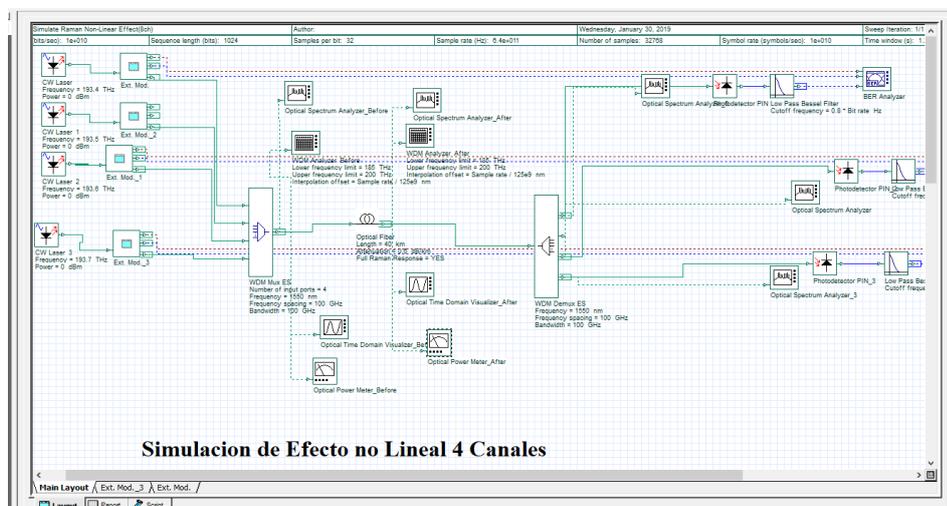


Figura 3.16: Simulación de una red WDM no lineal 4 canales

Elaborado por: Autor

- **Transmisor**

Se compone de un transmisor WDM Mux al cual están conectado cuatro generadores ópticos, el Mux con frecuencia 1550 nm, espaciado de frecuencia 100 GHz, banda ancha de 100 GHz y un modulador NRZ. Figura 3.17, en la Figura 3.18 se detalla los componentes conectados al emisor.

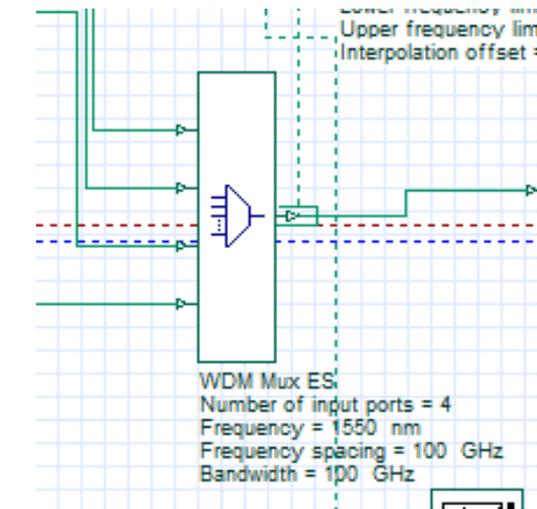


Figura 3.17: *Transmisor WDM Mux Es*

Elaborado por: *Autor*

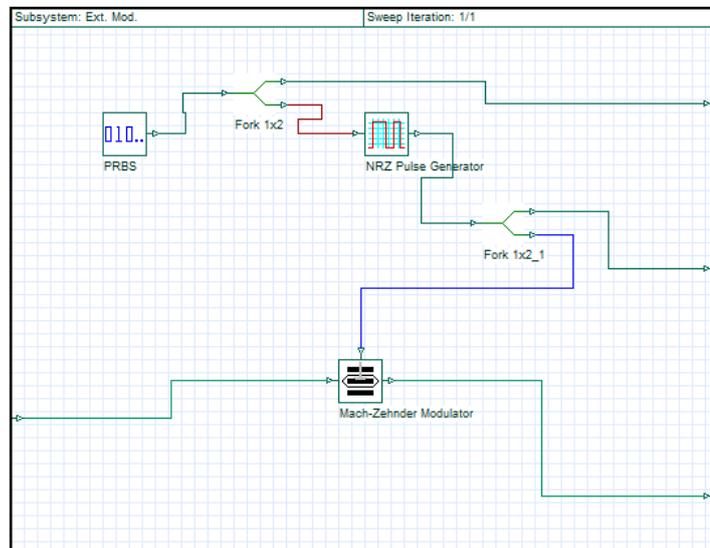


Figura 3.18: *Modulador NRZ del transmisor*

Elaborado por: *Autor*

- **Medio de transmisión óptico**

Fibra Monomodo con una longitud de 40 Km, una atenuación de 0.6 dB/Km. Figura 3.19

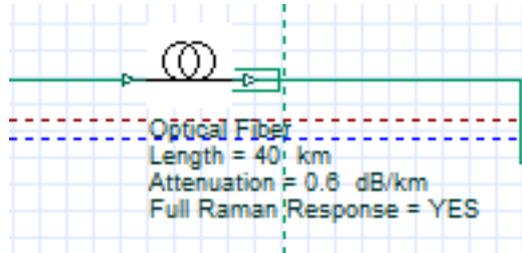


Figura 3.19: Medio de transmisión óptico

Elaborado por: Autor

- **Receptor**

Se incorpora un WDM Demux Es con una frecuencia 1550 nm, espaciado de frecuencia de 100 GHz y un Ancho de Banda de 100 GHz y a su salida se ha conectado un analizador de espectro óptico, un fotodiodo y filtro pasa bajo. Figura 3.20 Demux y en Figura 3.21 se Observa el fotodiodo y filtro pasabajo.

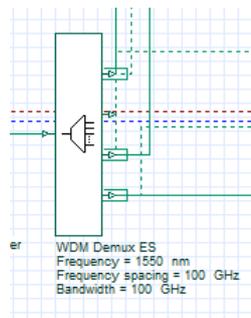


Figura 3.20: WDM Demux Es

Elaborado por: Autor

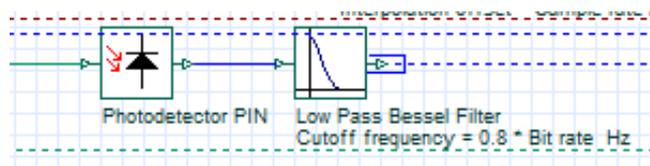


Figura 3.21: Fotodiodo y filtro pasa bajo

Elaborado por: Autor

- Nivel de Amplitud en el espectro óptico a la salida

Se podrá observar el nivel de amplitud en el canal 1, 3, 4. Figura 3.22

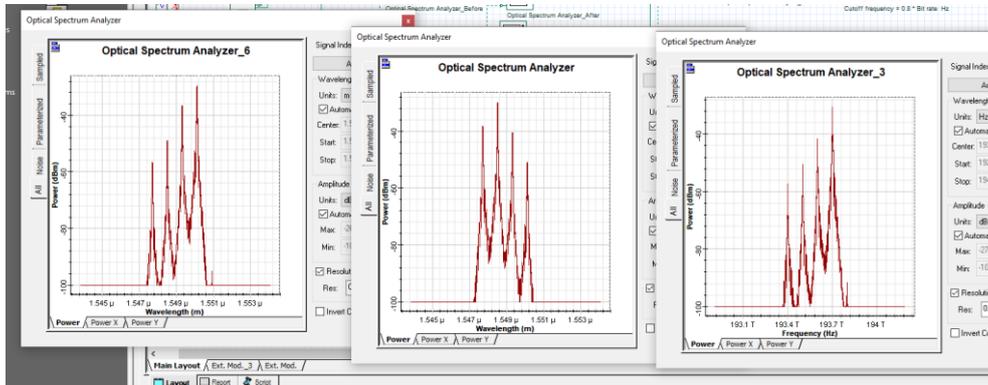


Figura 3.22: Diferentes amplitudes en canal 1, 3, 4

Elaborado por: Autor

- Tasa de error en bits (BER)

Se observara los diferentes resultados obtenidos en los canales 1, 3, 4.

Figura 3.23 Canal 1, Figura 3.24 canal 3, Figura 3.25 Canal 4.

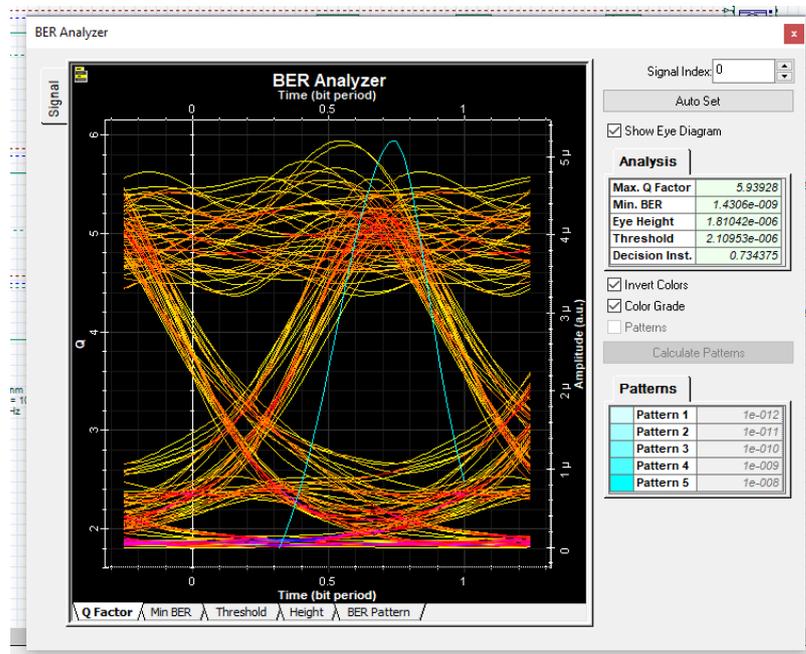


Figura 3.23: Canal 1

Elaborado por: Autor

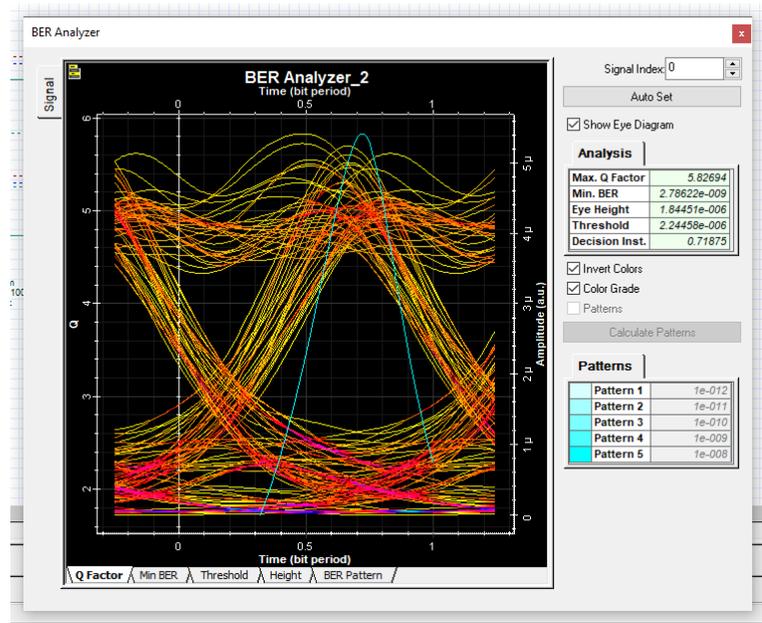


Figura 3.24: Canal 3

Elaborado por: Autor

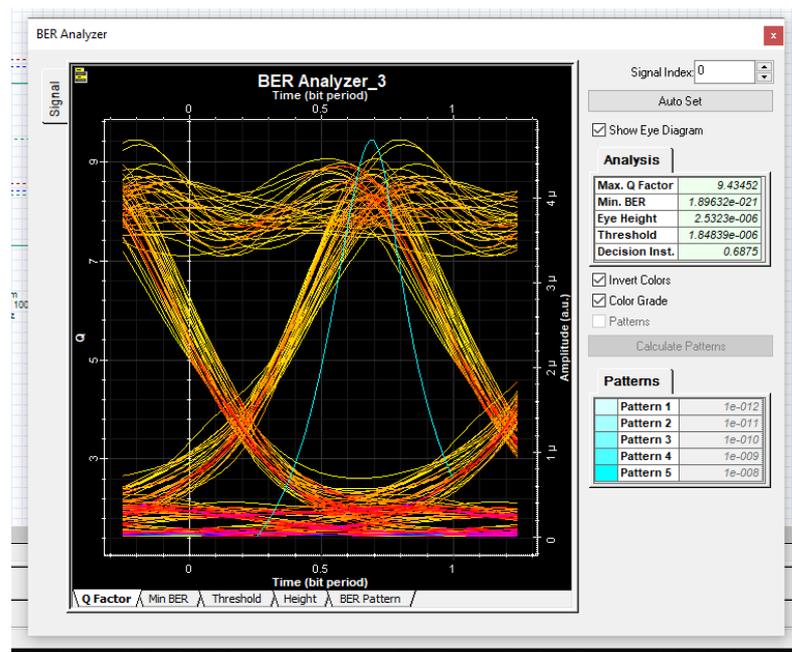


Figura 3.25: Canal 4

Elaborado por: Autor

Se puede visualizar los resultados a través del analizado BER que la apertura es adecuada, con presencia de ruido por lo que se observa que el Jitter y BER, tiene una distorsión aceptable, inclusive estando bajo la

presencia del efecto no lineal denominado Dispersión Estimulada de Raman.

Tabla 3.1. Niveles de tasas de error de bits.

Tabla3.1: Niveles BER en sistema de comunicación de 4 canales

**CH 1**

Canal	Factor Q Max.	Min. BER	Apertura de Ojo	Umbral	Decisión Inst.
Tramo ideal	6.50973	3.74286e-011	5.06267e-006	5.58573e-006	0.695313
Tramo bajo el efecto SRS	6.66974	1.24593e-011	5.30909e-006	5.31494e-006	0.710938

3

**CH 4**

Canal Óptico	Factor Q Max.	Min. BER	Apertura de ojo	Umbral	Decisión Inst.
Tramo ideal	8.52855	7.09607e-018	6.01362e-006	4.26526e-006	0.703125
Tramo bajo el efecto SRS	9.15457	2.6137e-020	6.24534e-006	4.45451e-006	0.6875

Elaborado por: Autor

### 3.6 Demostración de Hipótesis

Utilizando los valores obtenidos anteriormente se puede observar en la tabla 3.2 el resultado de variables obtenidas.

Tabla 3.2: resultado de variables obtenidos

+

	Potencia	Factor Q	Apertura de Ojo	Proporción Muestral
Tramo Ideal	-17.3962435	6.50973	5.06267e-006	0.6
Tramo SRS	-17.393875	6.66974	5.30909e-006	0.7
Total	-34.7901185	13.17947	10.37176e-006	

Elaborado por: Autor

Tabla 3.3 Datos Obtenidos de la experimentación.

Tabla 3.3: *Variables Esperadas*

	Potencia	Factor Q	Apertura de Ojo
Tramo ideal	-17.14	6.49	5.345514e-006
Tramo SRS	-17.64	6.68	4.261261e-006

Elaborado por: *Autor*

Para poder verificar la hipótesis se debe calcular los valores del Chi-Cuadrado, con un error mínimo 0.005 con un grado de libertad 2, demostrando que el Chi-Cuadrado  $X^2$  Tabla (valor de 10.5965) mayor a  $X^2$  Prueba (0,0002655). Por ende la hipótesis es aceptada. Tabla 3.4

Tabla 3.4: *Validación de la Hipótesis*

k	3		r	2
<b>Grado de libertad</b>		$(r-1) (k-1)$	2	
<b>Nivel de significación</b>		$\alpha$	0,005	
<b>Chi Cuadrado <math>X^2</math> Tabla</b>		$X^2$	10,5965	
Probabilidad		P	100%	
$X^2$ Prueba			0,0002655	

Elaborado por: *Autor*

Si el  $X^2$  Prueba es menor al  $X^2$  Tabla la hipótesis es aceptada por ende el efecto no lineal Dispersión Estimada de Raman influye en el rendimiento del sistema.

## **CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **4.1 Conclusiones**

- Puedo concluir que para un sistema WDM hay que tener en cuenta los parámetros de la UIT (Unión Internacional de las Telecomunicaciones), gracias al uso de herramientas informáticas en este caso con el simulador Optisystem se ha podido demostrar el resultado de este trabajo.
- La profundidad de la investigación para el desarrollo del trabajo permite comprender el funcionamiento de las redes ópticas, y saber que los efectos no lineales siempre estarán presente en todo dieléctrico.
- Con velocidades superiores a los 10 Gbps se muestra la presencia de atenuaciones, dando como resultado un incremento en el retardo y BER donde se muestra un valor aceptable a pesar de que existe la presencia del efecto no lineal.
- Mediante el diagrama de ojo se pudo analizar el comportamiento entre los enlaces de transmisión, en donde se visualiza el efecto producido.
- Los resultados que se obtuvieron de la simulación indican que de acuerdo a los parámetros que se establecieron en la simulación, la transmisión es factible, además tanto el transmisor como el receptor deben tener los mismos rangos de frecuencia en el que trabajan.
- Se demuestra que la Multiplexación por división de longitud de onda es muy útil para las Telecomunicaciones ya que incrementa la transmisión de redes de larga distancia.

## 4.2 Recomendaciones

- Para poder usar correctamente un simulador e interpretar sus resultados se debe conocer los efectos reales que producen esta no-linealidad que se produce en la transmisión para así poder hacer la configuración correcta y prevenir pérdidas o atenuaciones en cada elemento.
- Se debe tener muy en cuenta a la hora de configurar los dispositivos de la red óptica, para no provocar errores en el enlace y por ende obtener resultados no deseados.
- Hay que tener claro el concepto y los fundamentos de una red WDM, para así poder conocer a fondo su funcionamiento y lo que dicha tecnología permite hacer, para así poder simular algo que realmente queremos analizar.
- Para la minimización de los efectos no lineales se debe utilizar técnicas de formatos avanzados de modulación a mayor separación de los canales o disminuyendo la transmisión para así poder encontrar estabilidad entre los parámetros y tener un buen desempeño en el enlace óptico.
- Hay que tener en cuenta que al reducir el efecto del fenómeno Dispersión Estimulado de Raman es conveniente no superar la potencia umbral y reducir al máximo el espacio entre canales.
- Si se quiere diseñar un sistema de comunicación óptico se debe tener presente los parámetros establecido por la UIT.
- Hay que tener en cuenta que el software Optisystem fue descargado en modo de prueba por 30 días, si alguien lo descarga y supera los 30 días tiene que formatear su PC solo así podrá ejecutar nuevamente el programa en caso de volver a usar.

## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, E. G., Hernández, C. G. A., & Quiroz, G. A. U. (2007). *Transmisiones Ópticas mediante el uso de Solitones*. (Tesis). Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. Recuperado de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/2612/TESIS%28Elias%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Álzate, N. A., & Fernández, F. A. (2012). Análisis de efectos de propagación a través de una fibra monomodo para señales moduladas en intensidad. *Revista en Telecomunicaciones e Informática*, 2(4), 69-79.
- Blow, K. J., & Wood, D. (1989). Theoretical description of transient stimulated Raman scattering in optical fibers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 25(12), 2665-2673. <https://doi.org/10.1109/3.40655>
- Boquera, M. C. E. (2005). *Comunicaciones ópticas: conceptos esenciales y resolución de ejercicios*. Ediciones Díaz de Santos.
- Buelvas, D. A. P., Téllez, I. D. S., & Mateus, E. A. (2010, junio). Redes Ópticas DWDM: Diseño e Implementación DWDM Optical Networks: Desing and Implementation. *Revista Vision Electronica*, 4(1), 70-80.
- Cabrera, E. A. C. (2018). *Diseño y simulación de una red RED WDM inducida al efecto no lineal de la fibra denominado Stimulated Brillouin Scattering*. Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba - Ecuador. Recuperado de <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/5009/1/UNACH-EC-ING-ELE-TEL-2018-0006.pdf>

Córdoba, M. (2003). *Procesos de fabricación de fibras ópticas*. Universidad de Belgrano. Recuperado de

[http://repositorio.ub.edu.ar/bitstream/handle/123456789/303/34\\_cordoba.pdf?sequence=2&isAllowed=y](http://repositorio.ub.edu.ar/bitstream/handle/123456789/303/34_cordoba.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Dávila, A. F. O. (2014). *Simulación de un enlace de Fibra Óptica basado en WDM (Wavelength Division Multiplexing) Utilizando POFS (Polymer Optical Fiber) en el espectro de luz visible*. (Tesis). Politécnica Nacional, Quito-Ecuador. Recuperado de

<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8845/3/CD-5919.pdf>

DoITPoMS - TLP Library Raman Spectroscopy - Raman scattering. (s. f.).

Recuperado 16 de enero de 2019, de [https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/raman/raman\\_scattering.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/raman/raman_scattering.php)

Dordoigne, J. (2015). *Redes informáticas - Nociones fundamentales (5ª edición): (Protocolos, Arquitecturas, Redes inalámbricas, Virtualización, Seguridad, IP v6 ...)*. Ediciones ENI.

Ferraro, J. R., Nakamoto, K., & Brown, C. W. (2003). *Introductory Raman spectroscopy*. Amsterdam; Boston: Academic Press.

García, A. G. (2007). *Análisis de Atenuación, Dispersión y Automodulación de Fase en Sistemas de Comunicaciones de Único Canal por Fibra Óptica a 10 Gb/s (Maestría)*. Centro de investigaciones en Óptica (A.C), León Guanajuato, México. Recuperado de

<https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/587/1/12251.pdf>

Gaxiola, O. I. S. (2005). *Simulador de un sistema de comunicación óptico empleando multicanalización por división de longitudes de onda (WDM)*. Instituto Politécnico Nacional, Tijuana - México. Recuperado de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/387/OmarIvanGaxiola.pdf?sequence=1>

Gaxiola, O. I. S. (2005). *Simulador de un sistema de comunicación óptico empleando multicanalización por división de longitudes de onda (WDM)* (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional, Tijuana, B.C., México. Recuperado de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/387/OmarIvanGaxiola.pdf?sequence=1>

Grosz, D. F. (2003). Sistemas de comunicación por Fibra Óptica de Alta Capacidad, (51), 12.

Guano, H., Molina, P., & Jiménez, M. (2014). Estudio y Simulación de los efectos no lineales Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado de Raman (SRS) en una fibra óptica monomodo., 33(03). Recuperado de <https://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen33/tomo3/Vol33n3.pdf>

Ibeas, S. C. (2017). *Planificación y Diseño de Redes Ópticas WDM*. Universidad Politécnica de Madrid, España. Recuperado de [http://oa.upm.es/49901/1/PFC\\_SERGIO\\_CASTILLA\\_IBEAS.pdf](http://oa.upm.es/49901/1/PFC_SERGIO_CASTILLA_IBEAS.pdf)

Mendoza, M. (2016, abril 5). REDES 2016 5CP2 Mendoza, Silva: Fibra Óptica. Recuperado 20 de diciembre de 2018, de

<http://2016redes5cp2g7.blogspot.com/2016/04/cables-compuestos-de-forma-optica.html>

Montes, A., Herrera, J., Gómez, J., Pacheco, P., & Sarmiento, R. (2012). Stimulated Raman scattering observation in carbon tetrachloride, benzene and ethanol. *Óptica Pura y Aplicada*, 45(3), 299-302. <https://doi.org/10.7149/OPA.45.3.299>

OptiSystem Archives. (s. f.). Recuperado 23 de enero de 2019, de <https://optiwave.com/category/products/system-and-amplifier-design/optisystem/>

Orozco, H. F. B., & Trujillo, W. D. J. (2008). Multiplexación por división de longitud de Onda - WDM Una nueva alternativa para comunicaciones ópticas. *rev. invest. univ. quindio*, 18, 240.

Perafán, J. G. L., Tovar, A. T., Ordóñez, H., & Agredo, J. P. (2011). Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM. *Facultad de Ingeniería*, 20(31), 23-35.

Peralta, A. S., Tipán, M. S., & Amaya, F. F. (2014). Análisis de los efectos dispersivos y no lineales en un canal óptico empleando métodos numéricos. *INGENIUS Revista de Ciencia y Tecnología*, 11, 5-17.

Pérez, J. L., Murillo, R., & Gómez, R. (s. f.). Espectrocopías Infrarrojas y Raman, 24.

Quinzo, C. A. V. (2018). *Diseño y simulación de una red WDM para medir el efecto no lineal de la fibra denominado Four Wave Mixing (FWM)*. Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador. Recuperado de

<http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/4971/1/UNACH-EC-ING-ELE-TEL-2018-0005.pdf>

Santamaría, E. J. (2015). *Comparación entre el método tradicional de obtención de fase con el método de Takeda en la medición de la dispersión en fibras*. (Tesis). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla Pue. Recuperado de <https://www.fcfm.buap.mx/assets/docs/docencia/tesis/fisica/2015/SantamaríaJuarezEfren.pdf>

Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson Educación.

Yoo, S. J. B. (1996). Wavelength conversion technologies for WDM network applications. *Journal of Lightwave Technology*, 14(6), 955-966. <https://doi.org/10.1109/50.511595>

Zúñiga, I. B. (2009). *Desarrollo de una herramienta de software para el análisis del Diagrama de Ojo*. (TESIS). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, Cartago. Recuperado de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/743/Informefinal.pdf?sequence=1>

Recomendación ITU-T G.694.2. (12 de 2003). Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda.

Recomendación ITU-T G652. (11 de 2016). Characteristics of a single-mode optical fiber. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-201611-I/es>

Recomendación ITU-T G650.3 (08 de 2017). Métodos de prueba de secciones de cable de fibra monomodo instaladas.

## **GLOSARIO DE TÉRMINOS**

**WDM:** Wavelength Division Multiplexing (Multiplexación por División de longitud de onda).

**mW:** Megavatios (Unidad de potencia y energía).

**GHz:** Gigahercio (Unidad de medida de Frecuencia hercio).

**SBS:** Stimulated Brillouin Scattering (Dispersión Estimulada de Brillouin).

**SRS:** Stimulated Raman Scattering (Dispersión Estimulada de Raman).

**BER:** Bit Error Rate (Tasa de error binario).

**Gbps:** Gigabits per second (Gigabit por segundo).

**Tbps:** Terabits per second (Terabit por segundo).

**µm:** Micra (Unidad de medida en el sistema métrico).

**dB:** Decibelio (Unidad que se utiliza para medir la intensidad del sonido y otras magnitudes físicas).

**Km:** Kilometro (Unidad que se emplea para medir longitudes).

**RZ:** Return to Zero (Retorno a cero).

**NRZ:** Non Return to Zero (No Retorno a Cero).

**DPSK:** Differential Phase Shift Keying (Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase).

**DQPSK:** Differential Quadrature Phase-Shift Keying. (Modulación por Desplazamiento Cuadrafásica).

**DWDM:** Dense Wavelength Division Multiplexing (Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa).

**FDM:** Frequency-Division Multiplex (Multiplexación por División de Frecuencia).

**SLM:** Single-Longitudinal mode (modo mono-longitudinal).

**EDFAs:** Erbium Doped Fiber Amplifier (Amplificador de Fibra dopada con Erbio).

**OADM:** Optical Add-Drop Multiplexer (Multiplexador Óptico de Adición/Caída).

**ITU:** International Telecommunications Union (Unión Internacional de Telecomunicaciones).

**THz:** Terahercios.

**CWDM:** Coarse Wavelength Division Multiplexing (Multiplexación por división aproximada de Longitud de Onda).

**SDH:** Synchronous Digital Hierarchy (Jerarquía Digital Síncrona).

**PDH:** Plesiochronous Digital Hierarchy (Jerarquía Digital Plesiócrona).

**DSF:** Dispersion-Shifted Fiber (Fibra de Dispersión Desplazada).

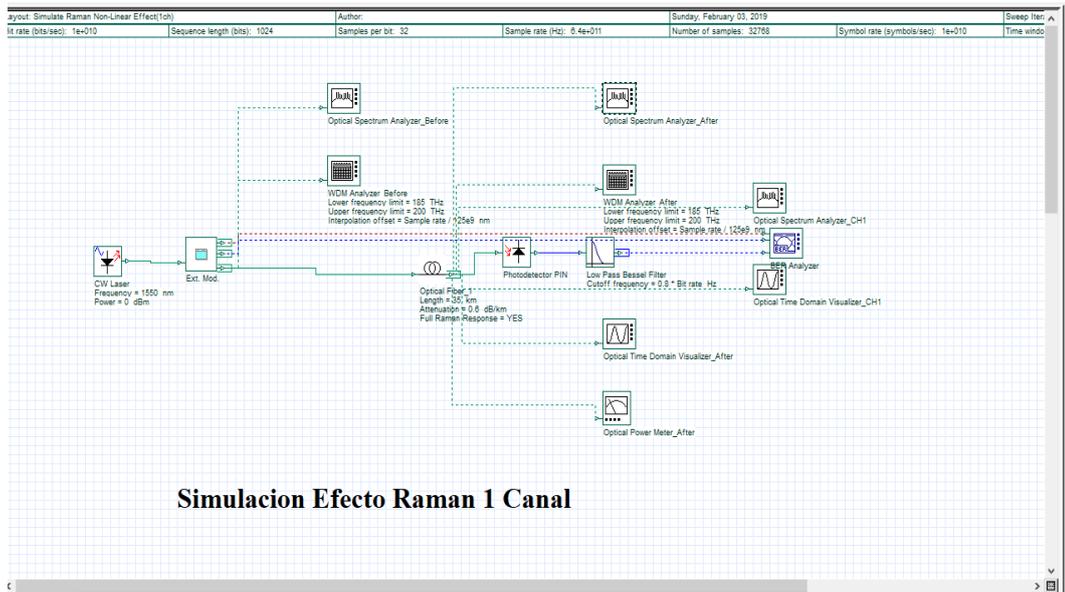
**FWM:** Four-Wave Mixing (Mezcla de Cuarta Onda).

**BER:** Bit Error Rate (Tasa de error bit).

**ASE:** Amplified Spontaneous Emission (Emisión Espontánea Amplificada).

**NLSE:** Nonlinear Schrödinger Equation (Ecuación de Schrödinger no lineal).

# ANEXO



**Simulación Efecto Raman 1 Canal**

Figura a 1.1: Simulación 1 Canal

Elaborado por: Autor

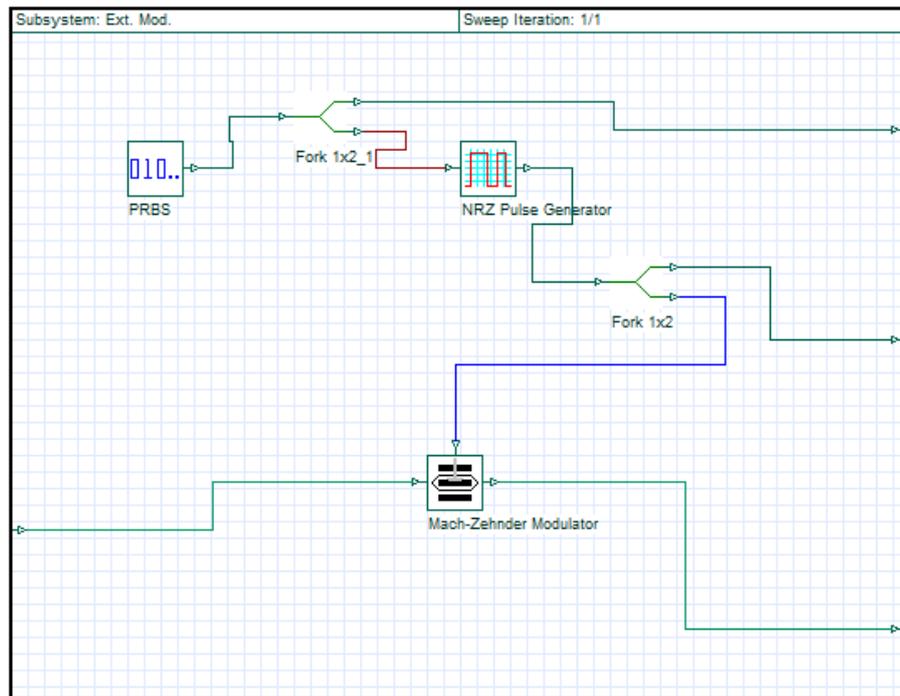


Figura a 1.2: Conectores del Emisor 1 canal

Elaborado por: Autor

# 4 Canales

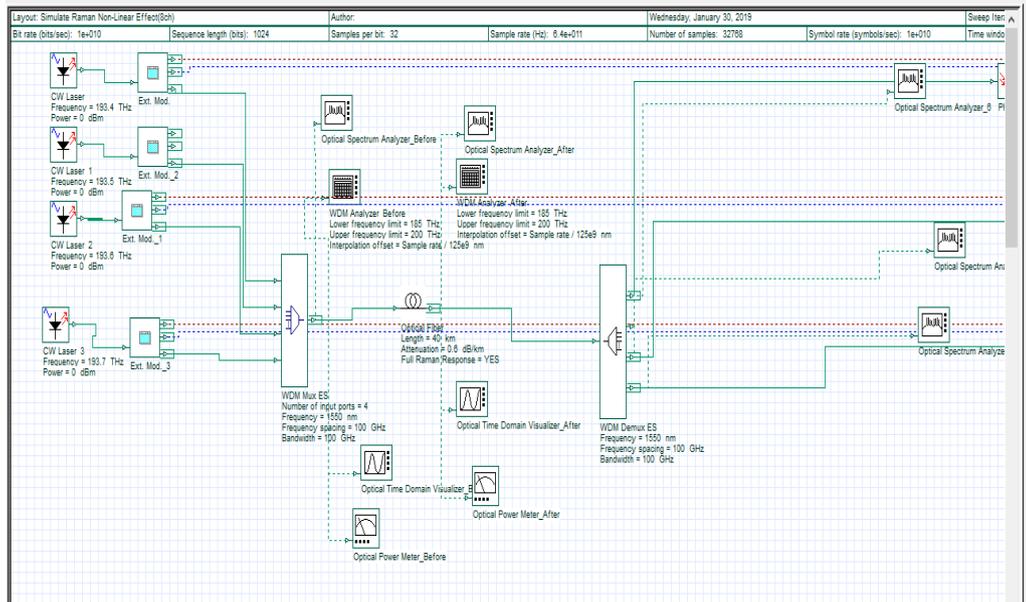


Figura a 1.3: Simulación 4 canales

Elaborado por: Autor

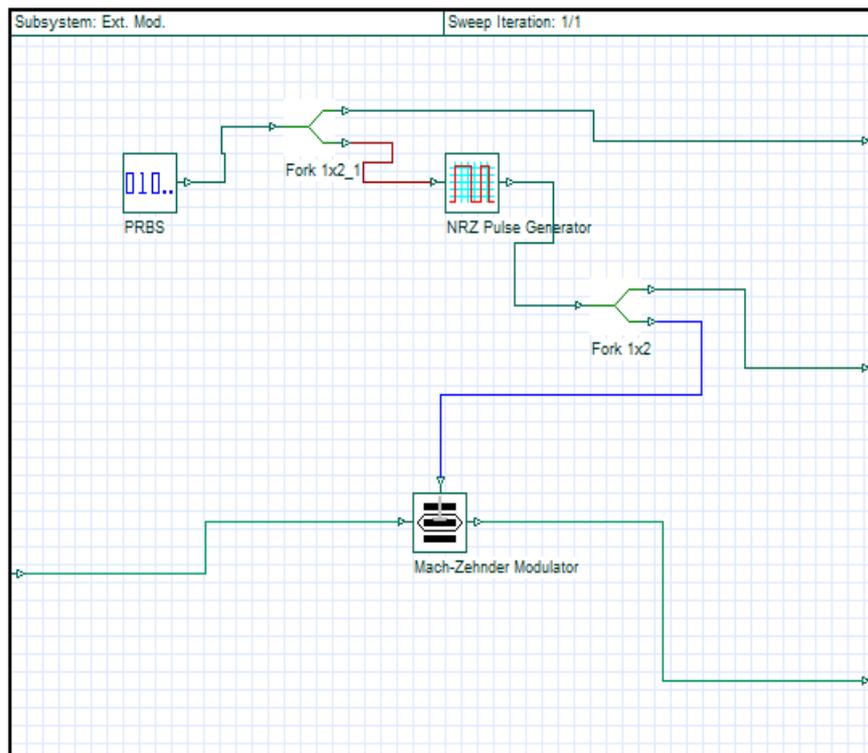


Figura a 1.4: Conectores del Emisor 4 Canales

Elaborado por: Autor



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Alvarado centeno, Diana Elizabeth**, con C.C: # 0706452489 autor/a del trabajo de titulación: **Análisis y Simulación de una red WDM para medir el efecto no lineal de la fibra óptica monomodo denominado Dispersión Estimulada de Raman a través de software Optisystem** previo a la obtención del título de **Ingeniería en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **11 de Marzo de 2019**

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **Alvarado Centeno, Diana Elizabeth**

C.C: 0706452489

## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Análisis y Simulación de una red WDM para medir el efecto no lineal de la fibra óptica monomodo denominado Dispersión Estimulada de Raman a través de software Optisystem		
<b>AUTOR(ES)</b>	Diana Elizabeth, Alvarado Centeno		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	María Luzmila, Ruilova Aguirre		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería en Telecomunicaciones		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniería en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	11 de Marzo de 2019	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	85
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Avance tecnológico, Sistema de Comunicación, Tasas de Trasmisión.		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Efecto no lineal, WDM, Dispersión Estimulada de Raman, Transmisión, Ancho de Banda, Fibra Óptica.		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>	<p>Actualmente los sistemas de comunicación se han hecho tan necesarios e importantes y para esto se necesita equipos de alta tecnología que soporten velocidades de transmisiones altas y un gran ancho de banda, y para ello se ha empleado el uso de la fibra óptica que brinda muchas ventajas a la hora de transmitir información. Como ya se ha visto la fibra atribuye muchas ventajas pero así mismo por el hecho de ser un dieléctrico se ve afectado por este efecto no lineal que empiezan aparecer cuando se sobrepasa velocidades superiores a 10 Gbps, en este trabajo de investigación se ha analizado y simulado una red WDM donde se le ha inducido el efecto no lineal denominado Dispersión Estimulada de Raman en una fibra monomodo para de esta manera poder determinar los parámetros principales de transmisión que degradan el desempeño de la red WDM. La profundidad de la investigación con respecto a los efectos no lineales me ha permitido poder minimizar este efecto mediante el equilibrio entre la velocidad de transmisión y la separación entre los canales para así poder tener un buen desempeño en el enlace óptico. La simulación se realiza con el propósito de poder apreciar el efecto Dispersión Estimulado de Raman y mediante pruebas poder observar los parámetros de velocidad de transmisión, ancho de banda, degradación de la señal, etc.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-985880754	E-mail: dianamir1292@hotmail.com	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b>	<b>Nombre:</b> Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
	<b>Teléfono:</b> +593-995871036		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:Edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec">Edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			