

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA DE ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

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

TRABAJO DE TITULACIÓN

Título del proyecto:

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE TÉCNICAS DE MODULACIÓN EN  
SISTEMAS DE FIBRA ÓPTICA**

Autor(es): CRISTIAN EDUARDO CAJAMARCA RAMOS

Tutor: Ms.C. DEYSI INCA

**Riobamba - Ecuador  
Año 2017**

## PÁGINA DE REVISIÓN DEL TRIBUNAL

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título: **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE TÉCNICAS DE MODULACIÓN EN SISTEMAS DE FIBRA ÓPTICA.** presentado por: Cristian Eduardo Cajamarca Ramos y dirigida por: Master Deysi Inca.

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

Para constancia de lo expuesto firman:

MARCO NOLIVOS

-----  
Presidente del Tribunal



-----  
Firma

JUAN CARLOS CEREDA

-----  
Miembro del Tribunal



-----  
Firma

AIFONSO GUNSHA

-----  
Miembro del Tribunal



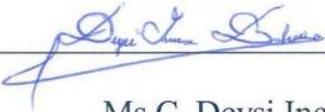
-----  
Firma

## **CERTIFICACIÓN DEL TUTOR**

### **CERTIFICACIÓN:**

Certifico que el presente trabajo de investigación previo a la obtención del Grado de Ingeniero en **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**, con el tema: **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE TÉCNICAS DE MODULACIÓN EN SISTEMAS DE FIBRA ÓPTICA**. Ha sido elaborado por **CRISTIAN EDUARDO CAJAMARCA RAMOS**, el mismo que ha sido revisado y analizado en un cien por ciento con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de tutor, por lo que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.



---

**Ms.C. Deysi Inca**  
**Directora de Tesis**

## AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Investigación, corresponde exclusivamente a: **Cristian Eduardo Cajamarca Ramos con C.I. 060435771-5** e **Ingeniera Deysi Inca, Ms.C.** y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



---

Cristian Cajamarca  
060435771-5

## **AGRADECIMIENTO**

Un agradecimiento especial a mis padres por brindarme el apoyo en todo momento de manera incondicional durante el transcurso de mi carrera, por dedicar tiempo y esfuerzo para hoy ser una persona de bien y darme excelentes consejos en mi camino diario, a mi hermana por ser ese refuerzo en mi vida quien ha sabido criticarme, apoyarme, ayudarme o alabarme sean buenas o malas las decisiones que he tomado hasta hoy y al resto de mi familia por darme esa confianza, esa fuerza y voluntad cuando uno decae, que con ejemplo, dedicación e instruirnos nos empujan a seguir adelante en nuestra vida diaria y más aún ahora profesional.

A la Universidad Nacional de Chimborazo, a sus autoridades y docentes por abrir sus puertas y haberme brindado la oportunidad de adquirir los conocimientos necesarios para formarme profesionalmente y así tener las primeras herramientas necesarias para triunfar en la vida.

A mi tutora de tesis la Magister Deysi Inca quien con su confianza, dedicación y ayuda se logró concretar con la evaluación, implementación y culminación de mi tesis.

Cristian Eduardo Cajamarca Ramos

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de titulación a mi amada esposa: Gabriela López por ser ese apoyo fundamental y mostrarme que siempre se puede luchar y seguir, aunque el cuerpo y la mente ya no puedan más.

A mis pequeños mellizos: Matías e Isaac quienes son la fuente para seguir adelante y a su vez por enseñarme un mundo nuevo el cual aún falta por explorar.

A mi madre: Ana Ramos quien ha sido un ejemplo a seguir y la cual me ayudo y me apoyo incondicionalmente en el último peldaño de mi carrera y en todo momento dado el giro que tomo mi vida.

Cristian Eduardo Cajamarca Ramos.

## ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DE REVISIÓN DEL TRIBUNAL .....	ii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	iii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
DEDICATORIA .....	vi
ÍNDICE GENERAL .....	vii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
RESUMEN .....	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PROBLEMATIZACIÓN.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	2
1.3 ANTECEDENTES DEL TEMA .....	2
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	4
3. ESTADO DEL ARTE RELACIONADO A LA TEMÁTICA .....	4
3.1 MATLAB.....	4
3.1.1 INTRODUCCIÓN A MATLAB.....	4
3.1.2 INTERFAZ GRÁFICA DE MATLAB .....	6
3.2 OPTISYSTEM.....	7
3.2.1 INTRODUCCIÓN A OPTISYSTEM .....	7
3.2.2 APLICACIONES .....	8
3.2.3 INTERFAZ GRÁFICA DE OPTISYSTEM .....	8
3.3 SISTEMAS DE MODULACIÓN EN FIBRA ÓPTICA .....	10
3.3.1 WDM.....	10
3.3.2 CWDM .....	11
3.3.3 DWDM.....	13
4. METODOLOGÍA.....	15
4.1 TIPO DE ESTUDIO .....	15
4.1.1 MÉTODO DESCRIPTIVO .....	15
4.1.2 MÉTODO INVESTIGATIVO EXPERIMENTAL.....	15
4.1.3 MÉTODO ANALÍTICO .....	15

4.2	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	16
4.3	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....	16
4.4	PROCEDIMIENTOS.....	16
5.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	30
5.1.	ANÁLISIS DE NIVELES DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN 30	
5.2	ANÁLISIS DE ESPECTRO DE FRECUENCIA EN LA SALIDA DEL MULTIPLEXOR Y ENTRADA DEL DEMULTIPLEXOR.....	32
5.3	RESULTADOS POR PARTE DEL ANÁLIZADOR DE LA TASA DE BIT ERRADOS (BER).....	37
5.4	ANÁLISIS DE LA CO-SIMULACIÓN ENTRE OPTISYSTEM Y MATLAB .	42
6.	CONCLUSIONES.....	43
7.	RECOMENDACIONES .....	44
8.	BIBLIOGRAFÍA .....	45
9.	ANEXOS.....	46
9.1	ANEXOS 1: ESCENARIOS DE SIMULACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE MODULACIÓN EN OPTISYSTEM.....	46
9.2	ANEXOS 2: ESCENARIO DE LA CO-SIMULACIÓN ENTRE OPTISYSTEM Y MATLAB .....	49
9.3	ANEXO 3: CÓDIGO EN MATLAB PARA OBTENER PARÁMETROS DE OPTISYSTEM .....	50

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Inicialización de Matlab R2017a.....	4
Ilustración 2. Interfaz gráfica de Matlab R2017a.....	6
Ilustración 3. Inicialización de OptiSystem 14 DEMO.....	7
Ilustración 4. Interfaz gráfica de OptiSystem 14.....	8
Ilustración 5. Layout de OptiSystem 14.....	9
Ilustración 6. Elementos básicos de OptiSystem.....	9
Ilustración 7. concepto grafico CWDM; Rec.ITU G.695 (ITU, 2017).....	12
Ilustración 8. Rejilla espectral CWDM; Rec.ITU G.695 (ITU, 2017).....	12
Ilustración 9. Concepto grafico DWDM; ITU DWDM (ITU, 2017).....	14
Ilustración 10. Rejilla de canales ópticos; ITU DWDM (ITU, 2017).....	15
Ilustración 11. Caratula de inicio del programa Pon Design Software (Aralytek Communications, 2017).....	17
Ilustración 12. Presentación del programa Rsoft Photonic Design Software (synopsys, 2017).....	17
Ilustración 13. Inicialización al abrir el software OptiSystem.....	18
Ilustración 14. Software que proporciona Optiwave.....	19
Ilustración 15. Apartado donde se encuentran los manuales dentro de la página web de Optiwave.....	19
Ilustración 16. Página web de Mathworks para descargar Matlab.....	20
Ilustración 17. Creación de un nuevo proyecto: (a) mediante el uso del menú de opciones (b) mediante la utilización del botón New.....	20
Ilustración 18. Librería de componentes de OptiSystem: (a) agrupación de carpetas por defecto (b) agrupación de carpetas por elementos (c) elementos pertenecientes a fuentes ópticas.....	21
Ilustración 19. Generador de secuencia de bits y generador de pulsos.....	21
Ilustración 20. Etapa de transmisión para WDM y CWDM de un canal de comunicación.....	22
Ilustración 21. Optimización del diodo laser de transmisión: (a) elemento CW laser Array con 16 canales(b)menú de propiedades del CW Laser Array con la modificación de puertos de salida.....	22
Ilustración 22. Modulación externa (ext mod)) de encapsulamiento parte eléctrica y óptica de transmisión.....	23
Ilustración 23. Etapa de transmisión.....	23
Ilustración 24 Configuración de parámetros del transmisor WDM para 16 canales.....	24
Ilustración 25. Etapa de transmisión para modulación DWDM.....	24
Ilustración 26. Etapa de enlace óptico: (a) enlace óptico con fibra estándar para modulación WDM y DWDM (b) enlace óptico con fibra estándar para modulación CWDM.....	25
Ilustración 27. Etapa de receptor: (a) Etapa del receptor DWDM (b) Etapa del receptor para WDM y CWDM.....	26
Ilustración 28. Parámetros para modulación RZ y NRZ: (a)Generador de pulso para modulación NRZ (b) Generador de pulso para modulación RZ (c)Configuración de las propiedades del transmisor WDM para parámetros RZ y NRZ.....	26
Ilustración 29. Propiedades de linealidad y no linealidad dentro de la fibra estándar SMF, para las técnicas de modulación WDM y DWDM.....	27
Ilustración 30. . Propiedades de linealidad y no linealidad dentro de la fibra CWDM, para sistema CWDM.....	27
Ilustración 31. Escenario DWDM con parámetros de medida.....	28

Ilustración 32. Ejecutar la simulación: (a) ejecución mediante el uso del menú de opciones (b) ejecución mediante la utilización del botón New (c) ventana de ejecución para ver el proceso de simulación. ....	28
Ilustración 33. Simulación finalizada. ....	29
Ilustración 34. Componente Matlab dentro de OptiSystem. ....	29
Ilustración 35. Niveles de potencia WDM: (a) Potencia de transmisión del canal 1 (b) Potencia de recepción del canal 1 (c) Potencia a la salida del multiplexor (d) Potencia a la entrada del demultiplexor .....	31
Ilustración 36. Niveles de potencia CWDM: (a) Potencia de transmisión del canal 1 (b) Potencia de recepción del canal 1 (c) Potencia a la salida del multiplexor (d) Potencia a la entrada del demultiplexor .....	31
Ilustración 37. Niveles de potencia DWDM: (a) Potencia de transmisión del canal 1 (b) Potencia de recepción del canal 1 (c) Potencia a la salida del multiplexor (d) Potencia a la entrada del demultiplexor .....	32
Ilustración 38. Niveles de potencia WDM de los 16 canales a la salida del multiplexor....	33
Ilustración 39. Niveles de potencia máximos y mínimos a la salida del multiplexor WDM .....	33
Ilustración 40 Espectros de frecuencia WDM. (a) Espectro de frecuencia a la salida del multiplexor (b) Espectro de frecuencia a la entrada del demultiplexor.....	34
Ilustración 41. Niveles de potencia CWDM de los 16 canales a la salida del multiplexor.	34
Ilustración 42.. Niveles de potencia máximos y mínimos a la salida del multiplexor CWDM .....	35
Ilustración 43. Espectros de frecuencia CWDM. (a) Espectro de frecuencia a la salida del multiplexor (b) Espectro de frecuencia a la entrada del demultiplexor.....	35
Ilustración 44. Niveles de potencia DWDM de los 16 canales a la salida del multiplexor.	36
Ilustración 45. Niveles de potencia máximos y mínimos a la salida del multiplexor DWDM .....	36
Ilustración 46. Espectros de frecuencia DWDM. (a) Espectro de frecuencia a la salida del multiplexor (b) Espectro de frecuencia a la entrada del demultiplexor.....	37
Ilustración 47. BER Analyzer WDM: (a) Curva de factor de calidad (b) Curva de la tasa de bits errados BER (c) Curva de Umbral (d) Diagrama de ojo .....	38
Ilustración 48. BER Analyzer CWDM: (a) Curva de factor de calidad (b) Curva de la tasa de bits errados BER (c) Curva de Umbral (d) Diagrama de ojo.....	39
Ilustración 49. BER Analyzer DWDM: (a) Curva de factor de calidad (b) Curva de la tasa de bits errados BER (c) Curva de Umbral (d) Diagrama de ojo.....	40
Ilustración 50. BER Analyzer DWDM con mayor amplificación: (a) Curva de factor de calidad (b) Curva de la tasa de bits errados BER (c) Curva de Umbral (d) Diagrama de ojo .....	41
Ilustración 51. BER Analyzer WDM co-simulación con Matlab: (a) Curva de factor de calidad (b) Curva de la tasa de bits errados BER (c) Curva de Umbral (d) Diagrama de ojo .....	42

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de licencia para activación de Matlab .....	5
Tabla 2. Tecnologías WDM y sus principales características (Rafael, 2017).....	11
Tabla 3. Operacionalización de las variables .....	16
Tabla 4. Comparación entre software de simulación de fibra óptica .....	18

## RESUMEN

El presente proyecto de investigación aborda la evaluación empleada a los principales sistemas de modulación en fibra óptica basado en el uso de herramientas computacionales de simulación. Las herramientas computacionales a usar son Matlab y el paquete de simulación OptiSystem.

Hoy en día el uso de software de simulación es la piedra angular en los sistemas de comunicaciones ópticas. Usando herramientas de software se pueden generar experiencias de simulación muy enriquecedoras mediante las cuales los ingenieros pueden optimizar el rendimiento del sistema implementado, mejorando así el costo y eficiencia del servicio. Desde el punto de vista pedagógico este proyecto de titulación busca ser una alternativa interesante a la hora de acompañar la cátedra de comunicaciones ópticas con un laboratorio virtual y a su vez abrir una nueva línea de investigación en la parte de comunicaciones ópticas.

De este modo el estudiante de ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la UNACH agrega como complemento a su formación una serie de conocimientos prácticos orientados a su vida profesional.

Dentro del estado del arte relacionado a la temática de este proyecto se presenta una descripción de las herramientas computacionales que se van a utilizar, Matlab y OptiSystem, dando a conocer una breve introducción para familiarizarse con los simuladores y sus librerías. En la parte de Resultados y discusiones, mediante diferentes prácticas, se analiza los principales parámetros de transmisión, los índices de refracción gradual y escalonado, y los parámetros dinámicos como la atenuación, la dispersión y los efectos no lineales diagramas de ojo, en si todas las características que puedan manipularse a través de OptiSystem complementándolo con Matlab.

Por último, se presenta las conclusiones y recomendaciones obtenidas de cada una de las prácticas a lo largo de este proyecto de titulación.

## Abstract

The research work entitled “The evaluation used in the main optical fiber modulation systems based on the use of computational simulation tools” the computational tools to use are: Matlab and the Optisystem simulation package. Today the use of simulation software is the cornerstone in optical communications systems. Using software tools can generate very enriching simulation experiences through which engineers can optimize the performance of the implement system, thus improving the cost and efficiency of the service. From the pedagogical point of view this project of qualification seeks to be an interesting alternative when accompanying the chair of optical communications with a virtual laboratory and in turn to open a new line of investigation in the part of communications optical. In this way, the student of engineering in electronics and telecommunications of the UNACH adds as a complement to his training a series of practical knowledge oriented to his professional life. Within the state of the art related to the theme of this project is presented a description of the computational tools that will be used, matlab and optisystem, making known a brief introduction to familiarize with the simulators and their libraries. In the part of results and discussions, through different practices, the main parameters of transmission are analyzed, the indexes of gradual refraction and staggered, and the dynamic parameters like the attenuation, the dispersion and the nonlinear effects, eye diagrams, in itself all the features that can be manipulated through optisystem complementing with matlab. Finally, we present the conclusions and recommendations obtained from each of the practices throughout this project of qualification.

Reviewed by: Granizo, Sonia  
Language Center Teacher



## **1. INTRODUCCIÓN**

En Ecuador, cumplir con todos los requerimientos para el diseño e implementación de laboratorios de comunicaciones ópticas no es tarea fácil, ya que hay que tener en cuenta que Ecuador no produce tecnología para estas aplicaciones, por lo tanto, tener un laboratorio costoso que pueda producir elementos ópticos y realizar proyectos con el medio externo no resulta rentable.

Por lo que se presenta la importancia del uso de herramientas computacionales para fines prácticos que permitan a los estudiantes de ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, generar nuevos entornos de investigación dentro de las comunicaciones ópticas en escenarios de diseño que sean aplicables en la vida profesional, con el fin de complementar lo aprendido en clases con lo práctico.

Por lo que se engloba las características, funciones y aplicaciones orientadas a comunicaciones ópticas de las herramientas computacionales, Matlab y OptiSystem, que se harán uso a lo largo de este proyecto de titulación.

Al tener herramientas que permitan obtener un laboratorio basado en software tienen entre sus principales ventajas el factor económico. Si bien se puede aducir que existirán limitaciones en cuanto a los resultados obtenidos con laboratorios basados en hardware, en la actualidad, los recursos computacionales y velocidad de procesamiento han ido avanzando a pasos gigantes que han permitido que la eficiencia, funcionamiento, versatilidad y capacidad de simulación sean capaces de generar experiencias de manera similares a las de los laboratorios de hardware, sin la necesidad de una elevada inversión económica.

### **1.1 PROBLEMATIZACIÓN**

Actualmente el ancho de banda de segunda y tercera generación proporciona velocidades limitadas por lo que el cambio a las comunicaciones con fibra óptica, genera mayores aplicaciones y es un paso a las comunicaciones a futuro por lo que encontrar dentro de ellas la mejor técnica de modulación servirá para establecer nuevas líneas de investigación como de aplicaciones.

Al utilizar teléfonos Smartphone, aplicaciones domóticas, se plantean nuevos retos en ancho de banda y distancias, para que exista una comunicación robusta. Los problemas que se encuentran en una comunicación que integra varios servicios son:

- Comunicación a corto alcance.
- Seguridad en los datos.
- Anchos de banda limitados.
- Espectro limitado.
- Mínima pérdida de paquete de datos.
- Costos de implementación.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

El tema de tesis fue escogido debido a como se podrá observar, en el presente documento en el apartado 1.3 Antecedentes del tema, que no se ha lanzado una investigación dentro del desempeño en sistemas de modulación con fibra óptica, ya que simplemente todos los temas de antecedentes han sabido acoplar o implementar la tecnología DWDM ya existente por las cualidades que posee; así mismo los otros sistemas existentes; de tal manera por medio de este tema y la comprobación a través de la simulación de cada sistema, que se puedan emplear, se podrá definir cuál es el mejor método de modulación, como experimentar las fallas que poseen; para establecer nuevas líneas de investigación, para tratar de encontrar la modulación más ideal para sistemas de fibra óptica.

## **1.3 ANTECEDENTES DEL TEMA**

- Tema: Estudio y análisis de pérdidas en redes de fibra óptica basadas en el estándar SONET/SDH y su evolución hacia DWDM

En este proyecto de tesis se trata todos los factores que influyen en la pérdida de señal, en las redes ópticas basadas en el estándar SONET/SDH, e identificar y analizar los factores que afectan en ello. Para luego pasar a analizar y detallar la evolución de las redes de transporte hacia una nueva tecnología que viene surgiendo DWDM. (Gómez R. (2007). Estudio y análisis de pérdidas en redes de fibra óptica basadas en el estándar SONET/SDH y su evolución hacia DWDM (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, recuperado de: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2007/bmfcig633e/doc/bmfcig633e.pdf>)

- Tema: Estudio y diseño para la implementación de DWDM (Multiplexión densa por división de longitud de onda) en un anillo de fibras ópticas para una red SDH en la Ciudad de Quito.

En este proyecto de tesis se sugiere a la DWDM como una posible solución al problema de saturación de la red SDH actual de la ciudad de Quito, debido a que esta tecnología, brinda mayor flexibilidad y un crecimiento considerable de ancho de banda, aprovechando la fibra instalada para la red mencionada. (Cadena, E, & Gómez, D. (2002). Estudio y diseño para la implementación de DWDM (Multiplexión densa por división de longitud de onda) en un anillo de fibras ópticas para una red SDH en la Ciudad de Quito (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5073>)

- Tema: Expansión de una red SDH con tecnología DWDM.

El tema Expansión de una red SDH, STM-16 estándar a STM-16 DWDM, consiste en la documentación de un proyecto que se está llevando a cabo para poder tener un crecimiento de ancho de banda con la infraestructura ya existente. Mediante la integración de equipos que manejan tecnología DWDM, se podrá integrar la capacidad a un crecimiento futuro integrando hasta 8 longitudes de onda en este anillo con la finalidad de crecimiento a largo plazo. (Orellana, C. (2012). Expansión de una red SDH con tecnología DWDM. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0295\\_EO.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0295_EO.pdf))

- Tema: Estudio de las Redes Ópticas de Acceso DWDM y Factibilidad de ser Implementadas en la Zona Central del Ecuador

En el proyecto de tesis trata de la factibilidad de poder reestructurar en la zona centro del Ecuador una red óptica con DWDM y para lo cual describe todo el funcionamiento y cualidades de esta técnica y una conclusión en la cual es factible debido a como se encuentra estructurada la zona. (Noroña, P. (2004). Estudio de las Redes Ópticas de Acceso DWDM y Factibilidad de ser Implementadas en la Zona Central del Ecuador. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/317>)

## 2. OBJETIVOS.

### 2.1 OBJETIVO GENERAL.

Evaluar el desempeño de técnicas de modulación en sistemas de fibra óptica, aplicando un software de simulación para medir los parámetros básicos que debe cumplir una comunicación óptica.

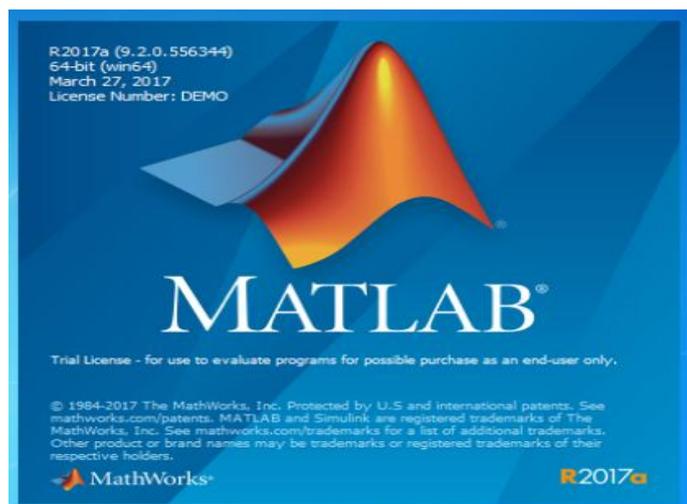
### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Simular una red de comunicaciones ópticas que permiten implementar algunas técnicas de modulación a través del modelamiento del canal, para comparar estas técnicas.
- Evaluar el desempeño de una comunicación óptica a través de la medición de los parámetros básicos que debe cumplir, utilizando diferentes herramientas de medición.

## 3. ESTADO DEL ARTE RELACIONADO A LA TEMÁTICA

### 3.1 MATLAB

#### 3.1.1 INTRODUCCIÓN A MATLAB



*Ilustración 1. Inicialización de Matlab R2017a*

Para este proyecto de titulación se utilizó la licencia Demo, la cual habilita todas las opciones de MATLAB R2017a por 30 días utilizando la versión más actual de este potencial software.

MATLAB está presente en sistemas de seguridad activa de automóviles, naves espaciales interplanetarias, dispositivos de monitorización de la salud, redes eléctricas inteligentes y redes móviles LTE. Se utiliza para aprendizaje automático, procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, visión artificial, comunicaciones, finanzas computacionales, diseño de control, robótica y muchos otros campos. (MathWorks, 2017)

La plataforma de MATLAB está optimizada para resolver problemas de ingeniería y científicos. El lenguaje de MATLAB, basado en matrices, es la forma más natural del mundo para expresar las matemáticas computacionales. Los gráficos integrados facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos. (MathWorks, 2017)

El código MATLAB se puede integrar con otros lenguajes, lo que le permite desplegar algoritmos y aplicaciones en sistemas web, empresariales o de producción. (MathWorks, 2017)

A continuación, la Tabla 1. presenta los diferentes tipos de activación de licencias que utiliza Mathworks para Matlab (MathWorks, 2017):

*Tabla 1. Tipos de licencia para activación de Matlab*

<b>Tipo de activación</b>	<b>Descripción</b>
<b>STANDARD</b> <b>USD 2,350</b>	Costo de licencia si es un usuario final y desea operar, instalar y administrar el software usted mismo. Su organización también puede designar un administrador para administrar un grupo de licencias individuales para la conveniencia de la administración centralizada
<b>EDUCATION</b> <b>USD 550</b>	Costo de licencia si es profesor/a, personal o investigador en una institución que otorga títulos y desea operar, instalar y administrar el software usted mismo. Su institución también puede designar a un administrador para administrar un grupo de licencias para la comodidad de la administración centralizada.
<b>HOME</b> <b>MATLAB USD 95</b> <b>Add-On Products USD 29</b>	Costo de licencia si desea obtener MATLAB para su uso personal.

<b>STUDENT</b> <b>MATLAB USD 29</b> <b>MATLAB Suite USD 55</b> <b>Add-On Products USD 16</b>	Costo de licencia si es estudiante en una institución que otorga títulos y desea utilizar MATLAB, Simulink o productos complementarios para cumplir con los requisitos del curso y para la investigación académica.
---	---

Las últimas versiones de Matlab permiten realizar co-simulaciones con otro software de simulación como por ejemplo OptiSystem donde se emplea scripts o bloques funcionales de Matlab en el entorno de simulación de OptiSystem.

### 3.1.2 INTERFAZ GRÁFICA DE MATLAB

Matlab presenta una interfaz gráfica amigable intuitiva e interactiva permitiendo al usuario distribuirla de la mejor manera posible. Por defecto se despliega cuatro ventanas principales como muestra la ilustración 2.:

1. **Ventana de comandos:** es en la que se ejecutan órdenes y se presentan los resultados, y a su vez permite visualizar mensajes de advertencia o de error al momento de ejecutar los ficheros.
2. **Ventana de historial:** es en el cual se guardan los comandos ejecutados en la ventana de comandos en el orden que se han ido ejecutando.
3. **Ventana de directorio:** es en el cual se muestra el directorio donde están los ficheros ejecutados.
4. **Ventana de trabajo o workspace:** es donde se almacena las variables definidas y sus valores, los cuales pueden ser modificables en esta ventana.

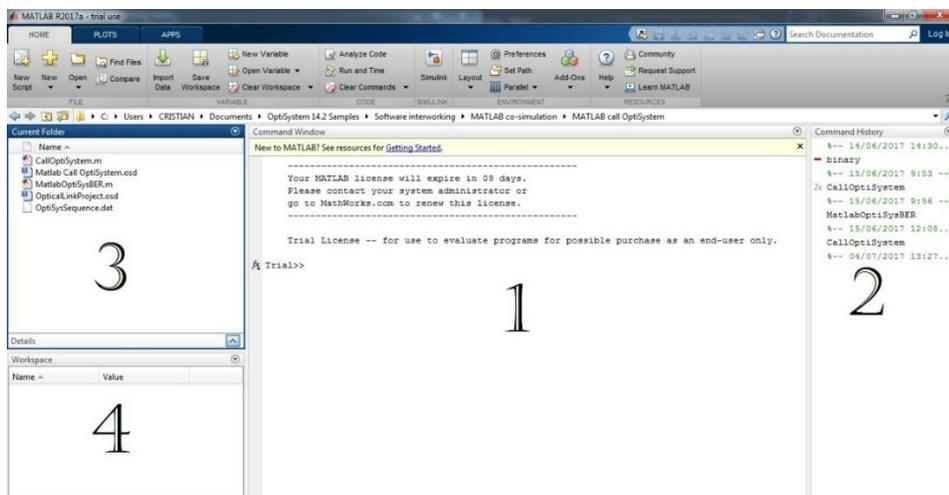
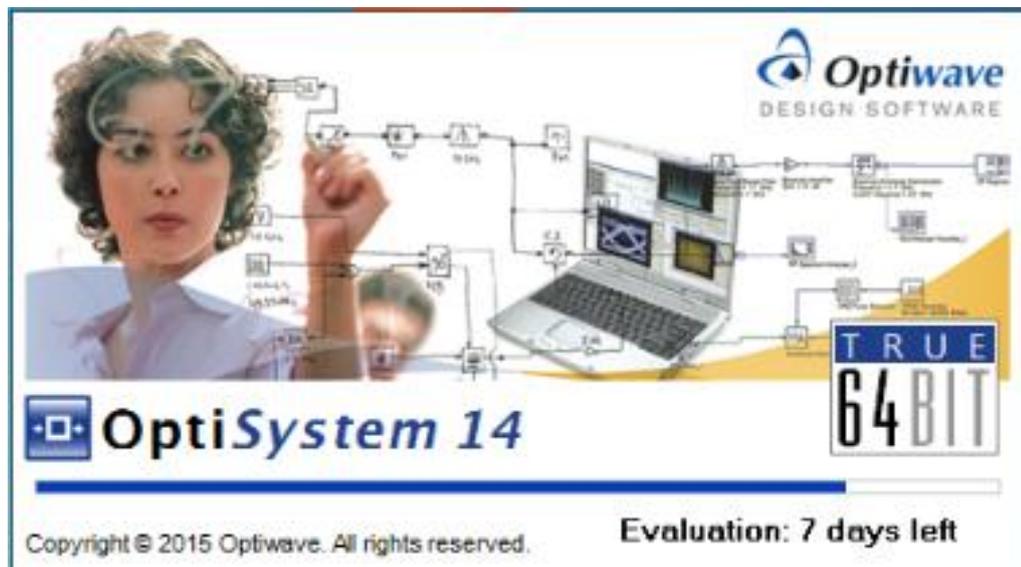


Ilustración 2. Interfaz gráfica de Matlab R2017a

Una vasta librería de toolboxes preinstaladas le permiten empezar a trabajar inmediatamente con algoritmos esenciales para su dominio. El entorno de escritorio invita a experimentar, explorar y descubrir. Todas estas herramientas y prestaciones de MATLAB están probadas y diseñadas rigurosamente para trabajar juntas. (MathWorks, 2017) (Optiwave, 2017)

## 3.2 OPTISYSTEM

### 3.2.1 INTRODUCCIÓN A OPTISYSTEM



*Ilustración 3. Inicialización de OptiSystem 14 DEMO*

Para este proyecto de titulación se utilizó la licencia Demo, la cual habilita todas las opciones de OptiSystem por 30 días utilizando la última versión del simulador, en otras palabras, OptiSystem 14.2.0

OptiSystem es una herramienta creada por Optiwave; OptiSystem puede minimizar los requisitos de tiempo y disminuir los costos relacionados con el diseño de sistemas ópticos, enlaces y componentes. OptiSystem es una innovadora, rápida y poderosa herramienta de diseño de software que permite a los usuarios planificar, probar y simular casi todos los tipos de enlaces ópticos en la capa de transmisión de un amplio espectro de redes ópticas de LAN, SAN, MAN a ultra-long -recorrido. Ofrece diseño de sistema de comunicación óptica de capa de transmisión y planificación de componente a nivel de sistema, y presenta visualmente análisis y escenarios. (Optiwave, 2017)

### 3.2.2 APLICACIONES

Creado para satisfacer las necesidades de los científicos de investigación, ingenieros en telecomunicaciones y sistemas ópticos, sistemas integradores, estudiantes y una amplia variedad de otros usuarios, OptiSystem satisface la demanda del mercado de la fotónica en evolución para una herramienta de diseño de sistema óptico potente pero fácil de usar. OptiSystem permite a los usuarios planificar, probar y simular (tanto en el dominio de tiempo como en el de frecuencia) (Optiwave, 2017):

- Diseños de redes ópticas incluyendo OTDM, anillos SONET / SDH, CWDM, DWDM, PON, Cable, OCDMA
- Transmisión monomodo / multimodo
- Óptica de espacio libre (FSO), Radio sobre fibra (ROF), OFDM (directo, coherente)
- Entre otras.

### 3.2.3 INTERFAZ GRÁFICA DE OPTISYSTEM

OptiSystem presenta un área de trabajo amplia, agradable e intuitiva, lo cual hace posible familiarizarse de manera óptima con todas las herramientas que posee la ilustración 4 muestra la interfaz gráfica que contiene:

1. Ventana de trabajo donde se colocan los elementos.
2. El área de visualización de las librerías donde se encontrarán los componentes.
3. El menú de herramientas.

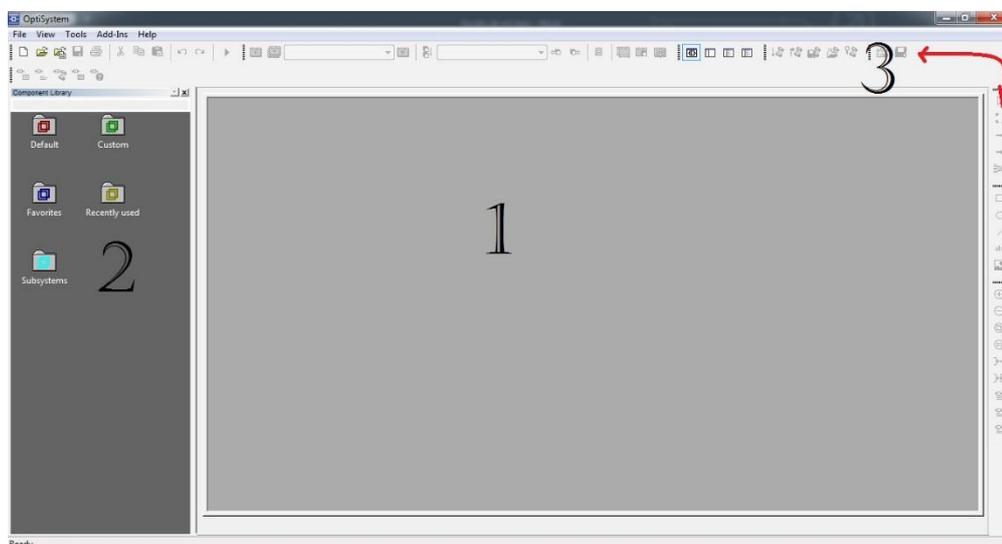


Ilustración 4. Interfaz gráfica de OptiSystem 14

El layout de OptiSystem permite colocar tantos componentes como sea necesario, considerando que mientras más elementos tenga el diseño, más tiempo requiere el software para simularlo y obtener resultados. OptiSystem permite trabajar en varios proyectos a la vez, sin la necesidad de ejecutar nuevamente el simulador.

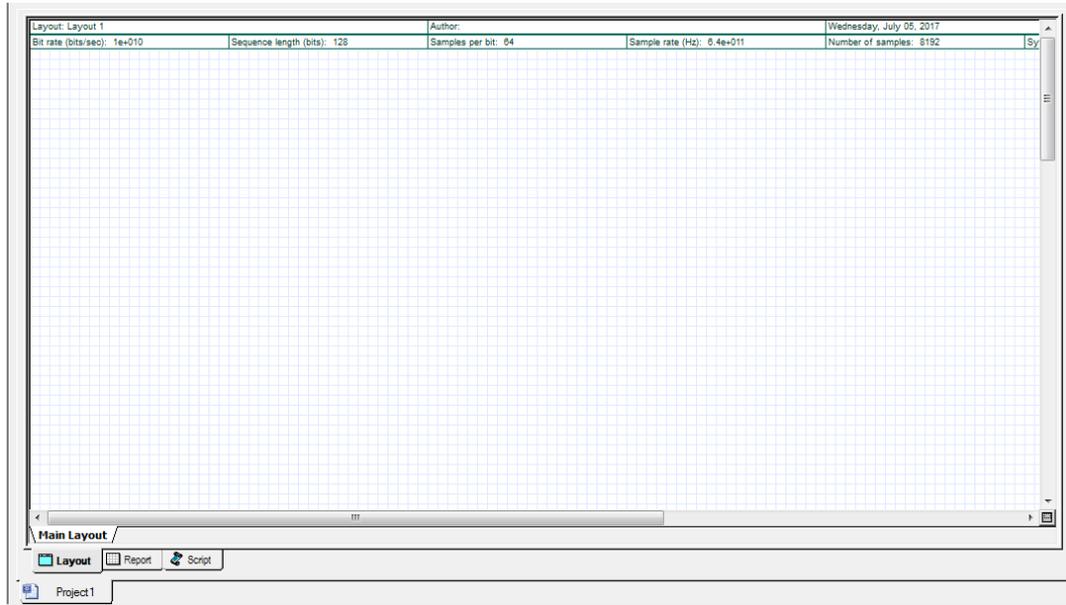


Ilustración 5. Layout de OptiSystem 14

La biblioteca contiene varios componentes tanto eléctricos como ópticos de manera jerárquica y organizada, lo que hace fácil de utilizar y de encontrar por el usuario. A continuación, la siguiente ilustración contiene los componentes eléctricos y ópticos comúnmente utilizados en OptiSystem para el diseño y análisis de sistemas de comunicaciones ópticas.

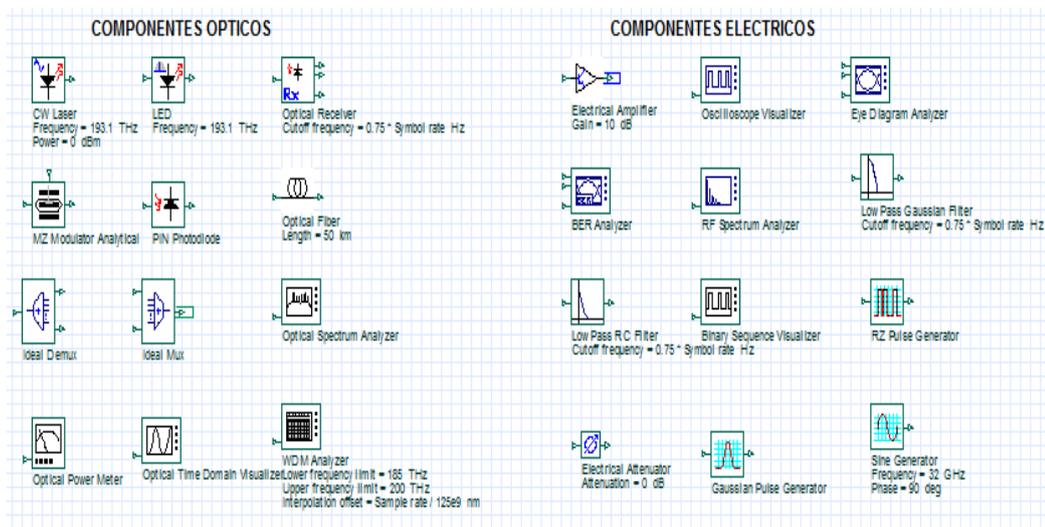


Ilustración 6. Elementos básicos de OptiSystem

La biblioteca de componentes OptiSystem incluye cientos de componentes que permiten introducir los parámetros que se pueden medir de verdaderos dispositivos. Se integra con la prueba y medición de equipos de diferentes fabricantes. Los usuarios pueden incorporar nuevos componentes basados en los subsistemas y las bibliotecas definidas por el usuario, o utilizar co-simulación con una herramienta de terceros tales como MATLAB, C++ o SPICE. (Optiwave, 2017)

### 3.3 SISTEMAS DE MODULACIÓN EN FIBRA ÓPTICA

Los sistemas de modulación para fibra según las recomendaciones de la ITU utilizan las siguientes siglas.

- **WDM** Multiplexación por división de longitud de onda (wavelength division multiplexing)
- **CWDM** Multiplexación por división aproximada de longitud de onda (coarse wavelength division multiplexing)
- **DWDM** Multiplexación por división de longitud de onda densa (dense wavelength division multiplexing)

#### 3.3.1 WDM

Dada la recomendación **Rec. UIT-T G.694.2 (12/2003)**; se utilizan las longitudes de onda centrales nominales para sistemas con WDM aproximada como referencia para definir, en cada uno de los canales, el límite de longitud de onda superior y el límite de longitud de onda inferior, que son los que definen los límites de longitud de onda del transmisor bajo cualquier condición y, al mismo tiempo, los límites de longitud de onda que han de cumplir las especificaciones de multiplexadores y demultiplexadores ópticos. El límite de longitud de onda superior es la longitud de onda central del canal más la desviación de longitud de onda central indicada en la Recomendación que define la aplicación. (ITU, 2017)

Tabla 2. Tecnologías WDM y sus principales características (Rafael, 2017)

Aplicación/parámetro	CWDM acceso/MAN	DWDM MAN/WAN	DWDM largo alcance
Canales por fibra	4-16	32-80	80-160
Espectro utilizado	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Espacio entre canales	20nm (2500GHz)	0,8nm (100GHz)	0,4nm (50GHz)
Capacidad por cana	2.5Gbps	10Gbps	10-40 Gbps
Capacidad de la fibra	20-40 Gbps	100-1000 Gbps	>1Tbps
Tipo de láser	DFB sin enfriamiento	DFB con enfriamiento	DFB con enfriamiento
Tecnología de filtros	TFF	TFF, AWG, FBG	TFF, AWG, FBG
Distancia	Hasta 80 km	Cientos de km	Miles de km
Costo	Bajo	Medio	Alto
Amplificación óptica	Ninguna	EDFA	EDFA, Raman

### 3.3.2 CWDM

La madurez de la tecnología WDM ha permitido conseguir sistemas adaptados específicamente al entorno metropolitano, ofreciendo altos anchos de banda a un coste relativamente bajo. Dentro de la familia de tecnologías WDM, la económicamente más competitiva en cortas distancias es la CWDM (Coarse WDM). La tecnología CWDM se beneficia del menor coste de los componentes ópticos asociados a una tecnología menos compleja, que, aunque limitada en cuanto a capacidad y distancia, se adapta perfectamente a las necesidades de las redes empresariales y metropolitanas de corta distancia. (Millán Tejedor, 2017)

#### 3.3.2.1 CARACTERÍSTICAS DE CWDM

La multiplexación por división en longitud de onda, tiene su origen, en la posibilidad de acoplar la salida de diferentes fuentes emisoras de luz, cada una a una longitud de onda o frecuencia óptica diferente, sobre una misma fibra óptica, la frecuencia que ocupa CWDM es de 2.500 GHz y soportan canales limitados de 2,5 Gbps. En cuanto a las distancias que se suelen cubrir, CWDM alcanza hasta los 80 Km. (Millán Tejedor, 2017)

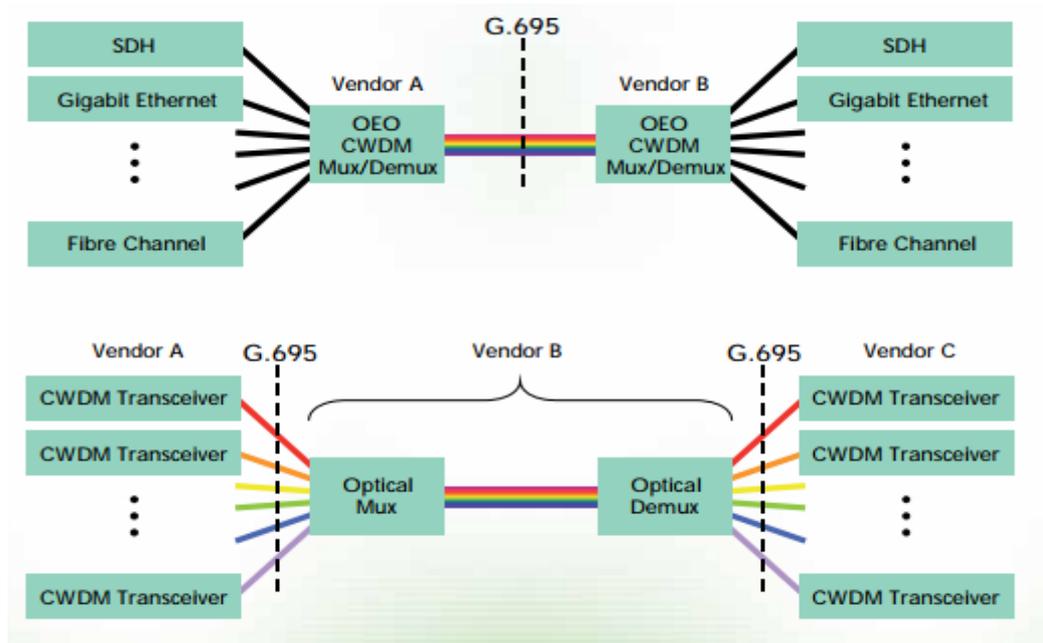


Ilustración 7. concepto grafico CWDM; Rec.ITU G.695 (ITU, 2017)

Las longitudes de onda utilizables por los sistemas CWDM fueron estandarizadas por la ITU-T (International Telecommunication Union – Telecommunication sector) en el año 2002. La norma, denominada ITU-T G.694.2, se basa en una rejilla o separación de longitudes de onda de 20 nm (o 2.500 GHz) en el rango de 1.270 a 1.610 nm; pudiendo así transportar hasta 18 longitudes de onda en una única fibra óptica monomodo. De acuerdo con esto, se tienen dos importantes características inherentes a los sistemas CWDM que permiten emplear componentes ópticos más sencillos; además, CWDM es muy sencillo en cuanto a diseño de red, implementación, y operación. CWDM trabaja con pocos parámetros que necesiten la optimización por parte del usuario. (Millán Tejedor, 2017)

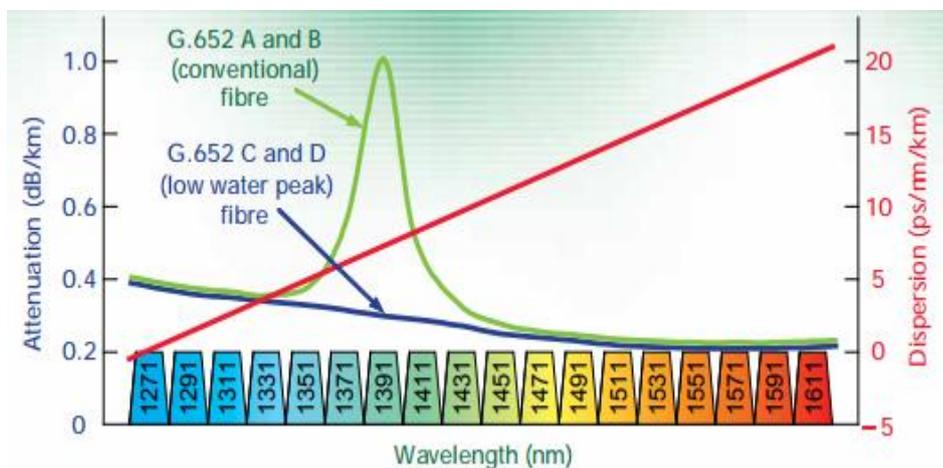


Ilustración 8. Rejilla espectral CWDM; Rec.ITU G.695 (ITU, 2017)

### **3.3.2.2 BENEFICIOS DE CWDM**

En definitiva, CWDM es una tecnología muy sencilla y tiene un coste muy bajo, típicamente de alrededor del 35-65% al de DWDM para el mismo número longitudes de onda, lo que permite que los desembolsos en capital sigan la trayectoria de la generación de beneficios.

La única limitación que puede presentar CWDM frente a DWDM en el entorno metropolitano es la menor capacidad soportada. No obstante, varios suministradores WDM ofrecen esquemas de migración entre CWDM y DWDM metropolitano, de tal modo que, cuando la capacidad de los sistemas CWDM deba ser extendida, algunos puertos CWDM puedan ser substituidos por puertos y filtros DWDM. Según este esquema de migración, hasta 16 canales DWDM separados 50 GHz pueden ser ubicados en el espectro ocupado por un único canal CWDM. (Millán Tejedor, 2017)

### **3.3.3 DWDM**

La multiplexación por división en longitud de onda, multiplexación óptica o DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) tiene su origen, en la posibilidad de acoplar las salidas de diferentes fuentes emisoras de luz, cada una a una longitud de onda diferente, sobre una misma fibra óptica. Después de la transmisión a través de la fibra, las señales a cada longitud de onda diferente, pueden ser separadas entre sí hacia diferentes detectores en su extremo final. El componente encargado de inyectar las distintas fuentes sobre la misma fibra óptica es el multiplexor, y el encargado de separarlas es el demultiplexor. El concepto de esta tecnología de transmisión óptica queda reflejado en la siguiente ilustración: (Millán Tejedor, 2017)

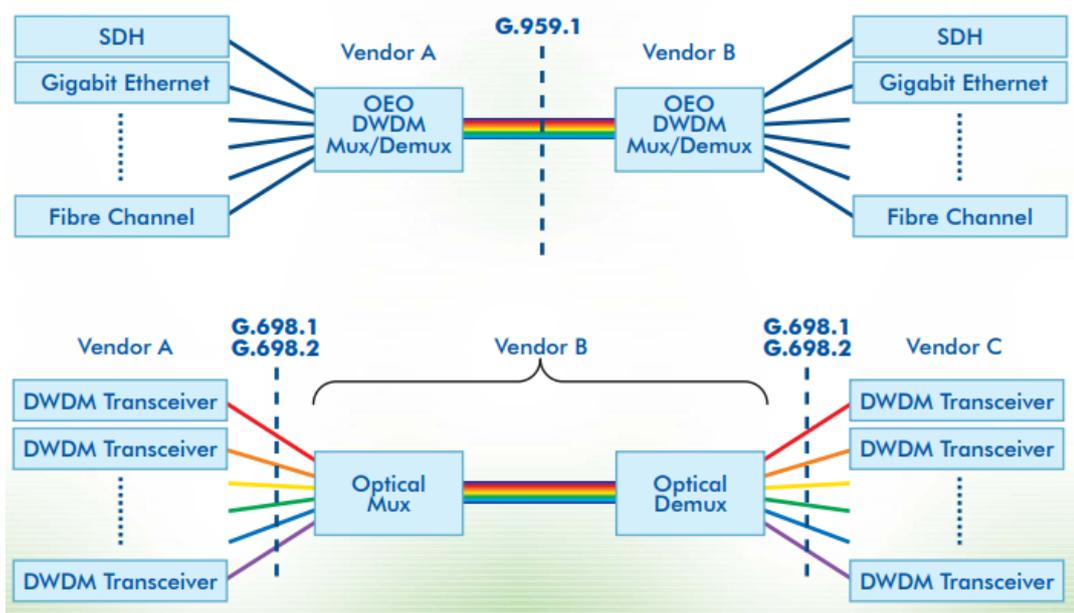


Ilustración 9. Concepto gráfico DWDM; ITU DWDM (ITU, 2017)

Al considerar la capacidad de las diferentes tecnologías como la tasa de transmisión de bits típica utilizada y el factor de multiplexación ofrecido por los nodos de conmutación y multiplexación, se puede ver una clara evolución (Millán Tejedor, 2017):

- Una nueva etapa está en el uso generalizado de la DWDM, que aún no ha sido totalmente estandarizado debido a la rápida evolución de estos equipos, lo que imposibilita producir recomendaciones a tiempo y constituye una clara desventaja frente a SDH. Ya no se está lejos de alcanzar una capacidad de 320 Gbps (32 longitudes de onda), con un factor de multiplexación de 10 Gbps.
- El paso siguiente se dará posiblemente en torno al año 2010 y requerirá grandes avances que superen las limitaciones de la DWDM, consiguiendo incrementar el factor de multiplexación a 320 Gbps con una capacidad total de 10 Tbps, o quizás la combinación de DWDM con el principio de TDM en el dominio óptico.

Todas estas características hacen de DWDM la mejor técnica a corto plazo para llegar a aprovechar todo el ancho de banda ofrecido por una fibra óptica, sin necesidad de cambiar todos los equipos y enlaces existentes.

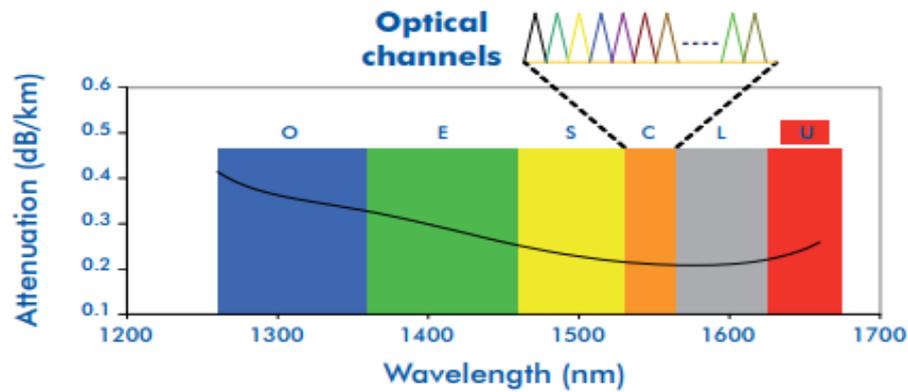


Ilustración 10. Rejilla de canales ópticos; ITU DWDM (ITU, 2017)

La investigación y desarrollo de las redes DWDM en redes regionales y metropolitanas ha madurado considerablemente en pocos años, además de haberse incrementado el número de prototipos experimentales que actualmente están siendo probados en Europa, Estados Unidos y Japón. Ya se ha anticipado que la próxima generación de Internet, red donde el crecimiento de usuarios ha sido especialmente espectacular, casi exponencial, empleará backbones ópticos basados en DWDM. (Millán Tejedor, 2017)

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 TIPO DE ESTUDIO

Los métodos que serán utilizados para la investigación son:

#### 4.1.1 MÉTODO DESCRIPTIVO.

Consiste en realizar lo más detallado referente al:

- Análisis de los métodos de modulación con fibra óptica (WDM, DWDM, etc.).
- Análisis del diseño dentro de los simuladores para la obtención de datos.

#### 4.1.2 MÉTODO INVESTIGATIVO EXPERIMENTAL.

- Se van a realizar simulaciones de los diferentes métodos de modulación en diferentes entornos como lo es Matlab y el software para fibra óptica.
- Realizar las pruebas de tráfico, calidad de servicio y demás parámetros que ayuden a determinar la investigación.

#### 4.1.3 MÉTODO ANALÍTICO.

- Comprobación de las hipótesis a través de las variables y mediciones establecidas.
- Análisis del rendimiento de cada uno de los modelos que se hayan simulado.

## 4.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

Para este tipo de investigación se tomará como población, al número de pruebas realizadas.

## 4.3 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 3. Operacionalización de las variables

VARIABLES	CONCEPTO	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Permitirá mejorar el funcionamiento de una red óptica.	Analizar mediante software de simulación como estructurar de mejor manera una red óptica.	- Co-Simulación entre Matlab y OptiSystem	- Computadora - Softwares - Diseño de la red
		- Diseño de la red óptica en software para simular fibra óptica	
La evaluación del desempeño de las técnicas de modulación en los sistemas de fibra óptica.	Comparar el rendimiento y desempeño de cada técnica de modulación en los sistemas con fibra óptica.	- Diagramas de ojo	- Computador
		- Linealidad y no linealidad	
		- Factor de Calidad	
		- Niveles de Potencia	
		- Análisis del Espectro	

## 4.4 PROCEDIMIENTOS

Para la ejecución del proyecto se genera el siguiente procedimiento:

- Determinar cuál es el software para simular entornos con fibra óptica y su accesibilidad para adquirirlo. Entre los cuales se encontró:

- **Pon Design Software.** – Creado por la empresa AralyTeck Communications; PDS es un software que permite diseñar redes ópticas pasivas por medio de enlaces de fibra óptica y con las facultades para analizar la consistencia y viabilidad de los diseños del usuario, calcular una mínima cantidad de amplificadores ópticos en la red diseñada, señalar la ubicación exacta de cada amplificador en la red, efectuar análisis espectral para calcular el ancho de banda empleado para cada tramo de fibra óptica del sistema de comunicación, etc. (Aralytech Communications, 2017)



Ilustración 11. Caratula de inicio del programa Pon Design Software (Aralytech Communications, 2017)

- **RSoft Photonic Design Software.** – Creado por la empresa Synopsys, se utilizan para diseñar y analizar dispositivos ópticos de telecomunicaciones, componentes ópticos utilizados en la fabricación de semiconductores y estructuras ópticas de nanoescala. Permiten a los ingenieros diseñar y optimizar los componentes ópticos y los sistemas que se encuentran en productos como redes de fibra óptica, equipos de litografía de semiconductores, chips ópticos de silicio y LED. (synopsys, 2017)

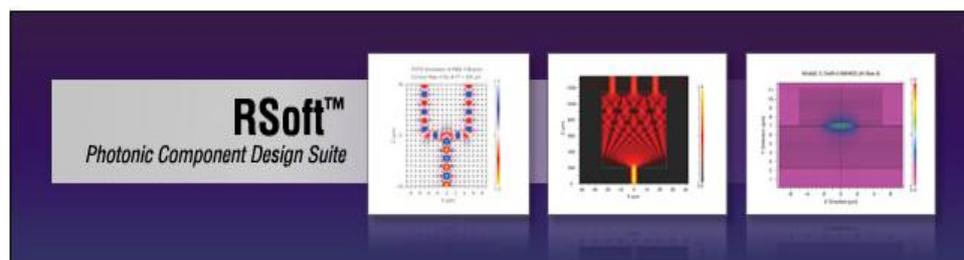


Ilustración 12. Presentación del programa Rsoft Photonic Design Software (synopsys, 2017)

- **OptiSystem.** - OptiSystem es una herramienta creada por Optiwave; OptiSystem puede minimizar los requisitos de tiempo y disminuir los costos relacionados con el diseño de sistemas ópticos, enlaces y componentes. Ofrece diseño de sistema de comunicación óptica de capa de transmisión y planificación de componente a nivel de sistema, y presenta visualmente análisis y escenarios. (Optiwave, 2017)

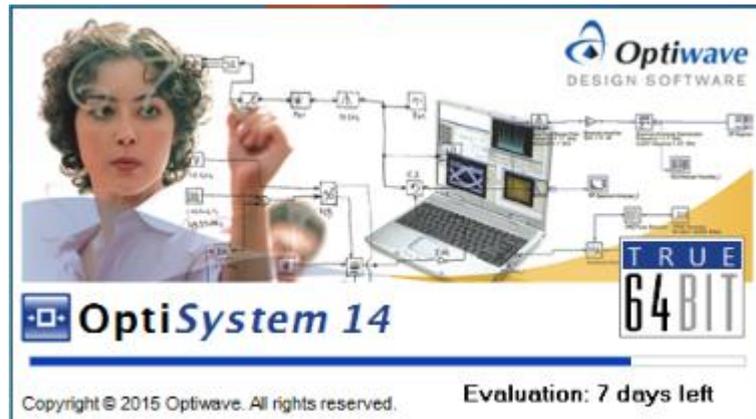


Ilustración 13. Inicialización al abrir el software OptiSystem

- Después de revisar la información que proporciona cada uno de los programas para simular sistemas ópticos, en la siguiente tabla se muestra la comparación entre estos softwares, para de esta manera escoger con cual se va a trabajar.

Tabla 4. Comparación entre software de simulación de fibra óptica

Software	Licencia	Interfaz	Adquirir aplicación	Requisitos Hardware	Librerías y Componentes	Herramientas adicionales
Pon Design Software	Si	Gráfica	Complicado	Bajo	Bajo	No
RSoft Photonic Design Software	Si	Gráfica	Difícil	Medio	Alto	SI
OptiSystem	si	Gráfica	Moderado	Medio	Alto	SI

Dado el presente análisis se opta trabajar con OptiSystem, sin embargo, al ser un software propietario, se requiere comprar la licencia del mismo, y revelar sus costos es un poco complicado, pero permite usar un periodo de evaluación de 30

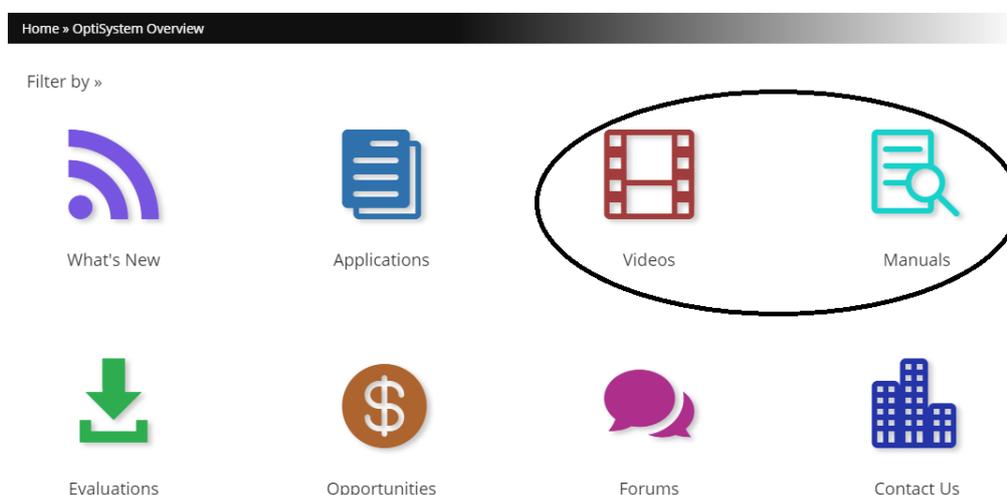
días sin restricción alguna y su proceso de descarga es mucho más simple, a diferencia de los otros dos softwares.

- Adquirir OptiSystem 14.2.0 proporcionada por la empresa Optiwave a través de crear una cuenta en su página web.

	<b>Evaluaciones</b>	<b>Descripción</b>
	<a href="#">OptiSystem 14 de 64 bits</a>	Software de diseño de sistemas de comunicación óptica
	<a href="#">OptiSPICE 5 de 64 bits</a>	Software De Diseño De Circuitos Optoelectrónicos
	<a href="#">OptiGrating 4 de 64 bits</a>	Software de diseño de rejillas ópticas
	<a href="#">OptiFiber 2 de 64 bits</a>	Software De Diseño De Fibra Óptica
	<a href="#">OptiFDTD 13 64 bits</a>	Finite-Difference Time-Domain Software de diseño
	<a href="#">OptiBPM 13 de 64 bits</a>	Software de Diseño de Óptica de Guía de Onda

*Ilustración 14. Software que proporciona Optiwave*

- Dentro de la página de Optiwave descargar los diferentes manuales y videos que ayudan a familiarizarse con el software.



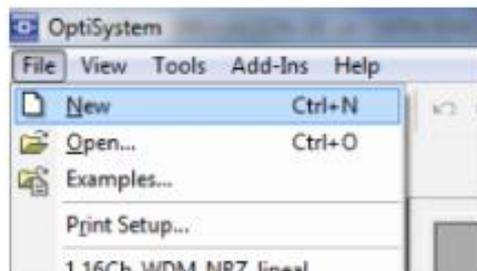
*Ilustración 15. Apartado donde se encuentran los manuales dentro de la página web de Optiwave*

- Adquirir Matlab proporcionado por Mathworks a través de crear una cuenta en su página web.

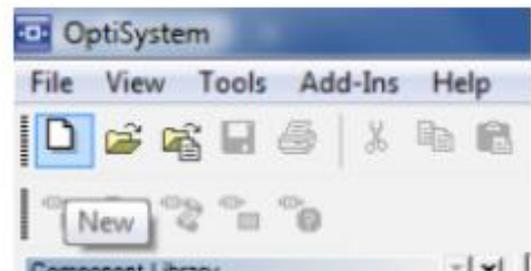


*Ilustración 16. Página web de Mathworks para descargar Matlab*

- Al familiarizarse con OptiSystem se procede a diseñar las modulaciones existentes que emplea la fibra óptica es decir WDM, CWDM y DWDM los cuales estarán conformados de 16 canales de comunicación.
- Por lo que se crea un nuevo Layout.



(a)



(b)

*Ilustración 17. Creación de un nuevo proyecto: (a) mediante el uso del menú de opciones (b) mediante la utilización del botón New*

- Luego se escogerá de las diferentes librerías los componentes que se utilizarán para cada modulación.

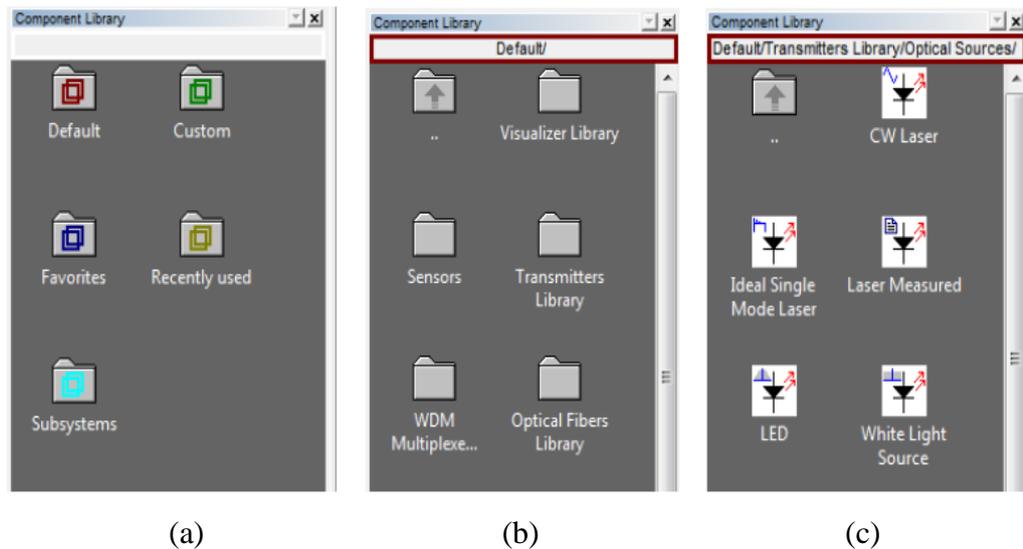


Ilustración 18. Librería de componentes de OptiSystem: (a) agrupación de carpetas por defecto (b) agrupación de carpetas por elementos (c) elementos pertenecientes a fuentes ópticas.

- Para cada técnica de modulación se implementará la etapa de transmisión, la etapa de enlace óptico y la etapa de recepción dada las recomendaciones de la ITU para cada modulación.
- Para las técnicas de modulación WDM y CWDM dentro de la etapa de transmisión se implementará un generador de secuencia de bits y generador de pulso, el cual debe ir para cada canal.

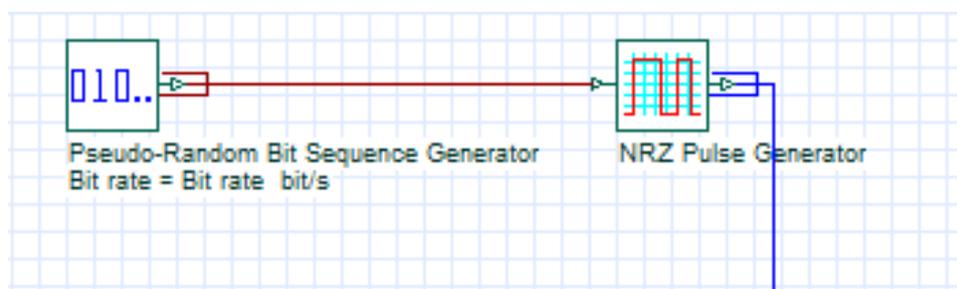


Ilustración 19. Generador de secuencia de bits y generador de pulsos

- Para completar la etapa de transmisión se adaptará el generador de secuencia de bits y generador de pulso al diodo laser transmisor teniendo así ya una señal eléctrica y óptica; pero también se necesita que la etapa eléctrica viaje por la fibra como luz, por lo que se emplea un modulador electro-óptico Mach-Zehnder este elemento permite modular la intensidad de la luz láser en respuesta a una señal eléctrica aplicada mediante un circuito de acondicionamiento.

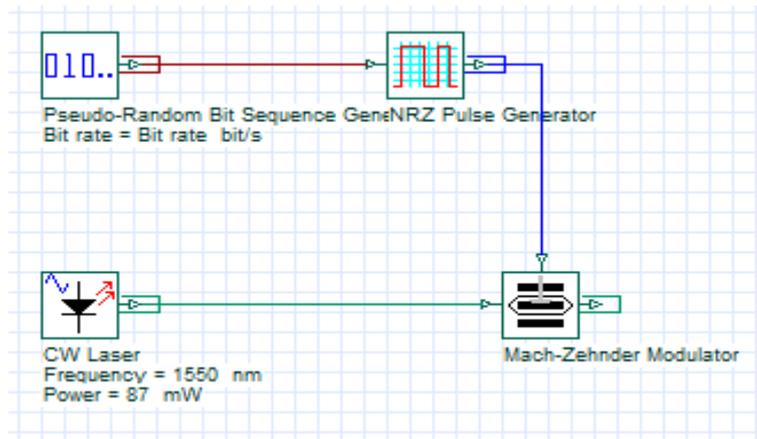
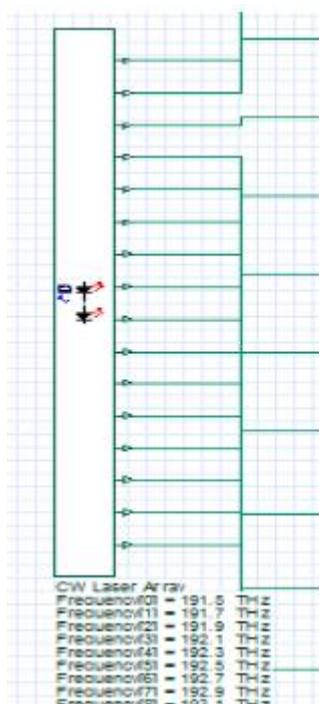
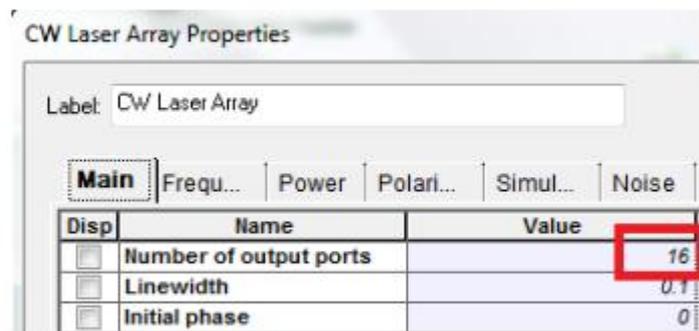


Ilustración 20. Etapa de transmisión para WDM y CWDM de un canal de comunicación

- Al emplearse 16 canales de comunicación dentro de los entornos de WDM y CWDM, se tendrá que repetir los pasos que conforman la etapa de transmisión 15 veces más por lo que se empleará herramientas para optimizar el espacio dentro del área de trabajo.
- Una de las herramientas será manipular las propiedades del diodo laser de transmisión para que proporcione los 16 canales y ubicar las diferentes frecuencias que se emplearán en las pruebas.



(a)



(b)

Ilustración 21. Optimización del diodo laser de transmisión: (a) elemento CW laser Array con 16 canales(b)menú de propiedades del CW Laser Array con la modificación de puertos de salida

- La otra herramienta será utilizar un subsistema, el cual permitirá encapsular en un solo bloque el generador de secuencia de bits, el generador de pulso, el tipo de modulación y el modulador Mach-Zehnder, optimizando de manera visual el entorno a simular.

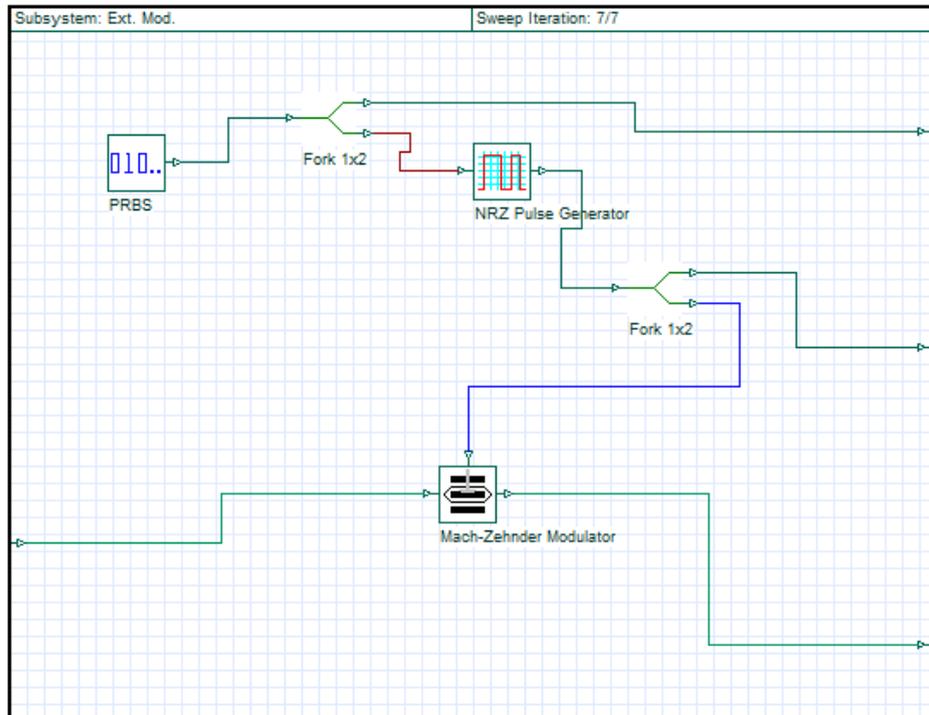


Ilustración 22. Modulación externa (ext mod)) de encapsulamiento parte eléctrica y óptica de transmisión

- Para terminar, se integra la etapa del transmisor a un multiplexor el cual se lo configura para que posea las 16 entradas para cada canal.

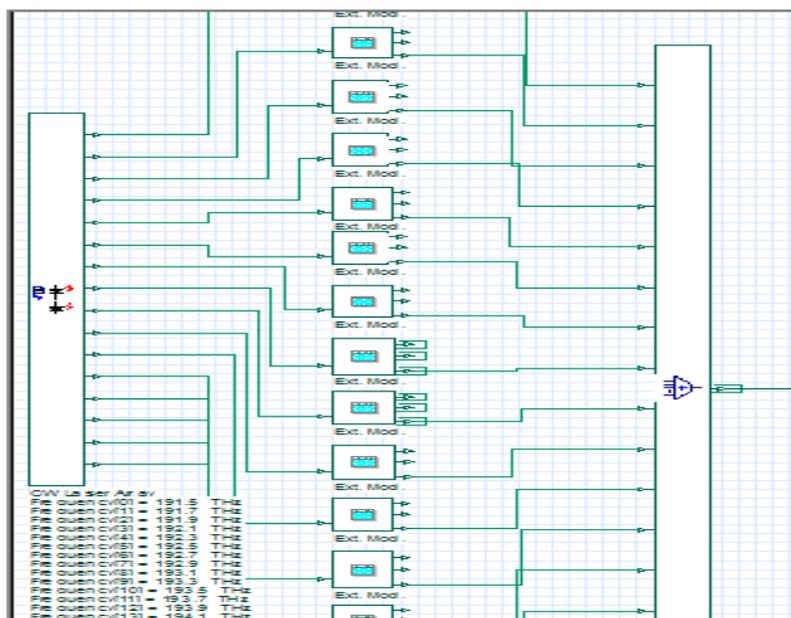


Ilustración 23. Etapa de transmisión

- Para la técnica de modulación DWDM se emplea un transmisor WDM que es un encapsulado de diferentes componentes, permitiendo seleccionar diferentes formatos de modulación y esquemas para múltiples canales en un solo componente y en el cual sólo se configurará para obtener los 16 canales.

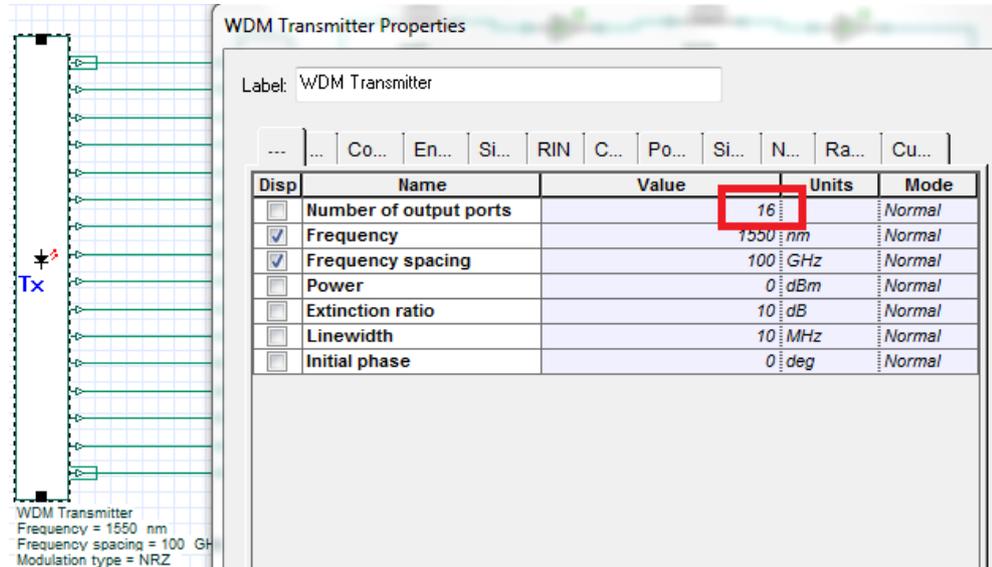


Ilustración 24 Configuración de parámetros del transmisor WDM para 16 canales

- Por último, para ésta etapa dentro de DWDM, se realizará cada conexión del transmisor al multiplexor previamente configurado para los 16 canales.

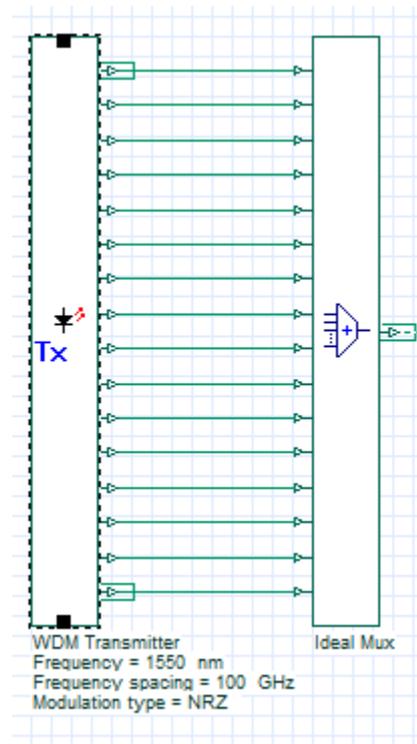


Ilustración 25. Etapa de transmisión para modulación DWDM

- Dentro del enlace óptico presente en las tres técnicas de modulación este estará conformado por un loop de control en el cual estará la conexión de la fibra óptica a un amplificador. Dentro de WDM y DWDM se utilizará fibra óptica estándar siendo esta fibra SMF seguido después de la amplificación de una fibra DCF, aunque dentro de la realidad la ITU recomienda utilizar fibra G655, correspondiente a una fibra monomodo, también por sus características de atenuación por kilómetro, dispersión cromática, entre otras. Para la modulación CWDM OptiSystem proporciona entre sus elementos una fibra dedicada especialmente para este tipo de modulación que cumple con los parámetros de CWDM.

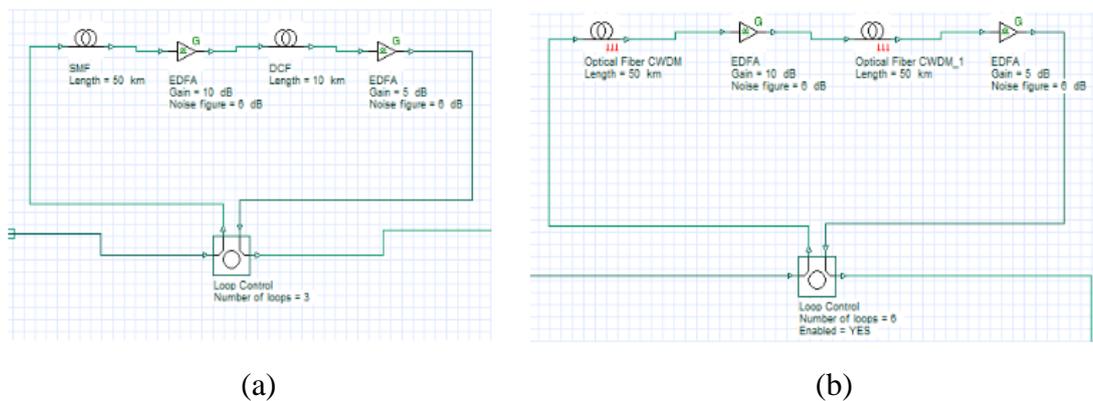
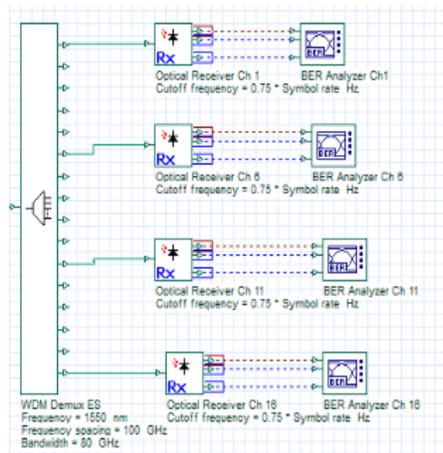
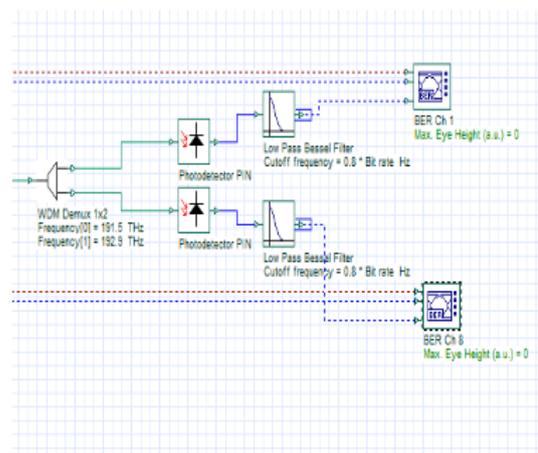


Ilustración 26. Etapa de enlace óptico: (a) enlace óptico con fibra estándar para modulación WDM y DWDM  
(b) enlace óptico con fibra estándar para modulación CWDM

- Luego se une la salida del loop de control a un demultiplexor el cual estará configurado para las 16 canales de salida que deberá haber para la etapa de receptor; para la etapa del receptor en WDM y CWDM se optimiza al solo seleccionar dos de sus canales para poder observar los cambios y alteraciones que se producen en la modulación y para DWDM se emplea un receptor WDM el cual ya tienes diferentes elementos encapsulados y el cual estará configurado para proporcionar los 16 canales de salida.
- Para WDM y CWDM la etapa del recetor estará compuesta por un photodetector PIN seguido de un filtro pasa bajos y conectado al componente BER o al analizador de ojo mientras que en DWDM estará dado por un elemento encapsulado que será el receptor óptico y seguido el BER o el analizador de ojo.



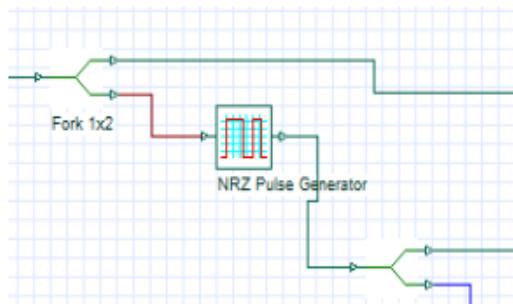
(a)



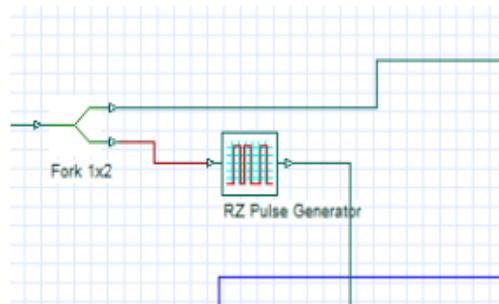
(b)

Ilustración 27. Etapa de receptor: (a) Etapa del receptor DWDM (b) Etapa del receptor para WDM y CWDM

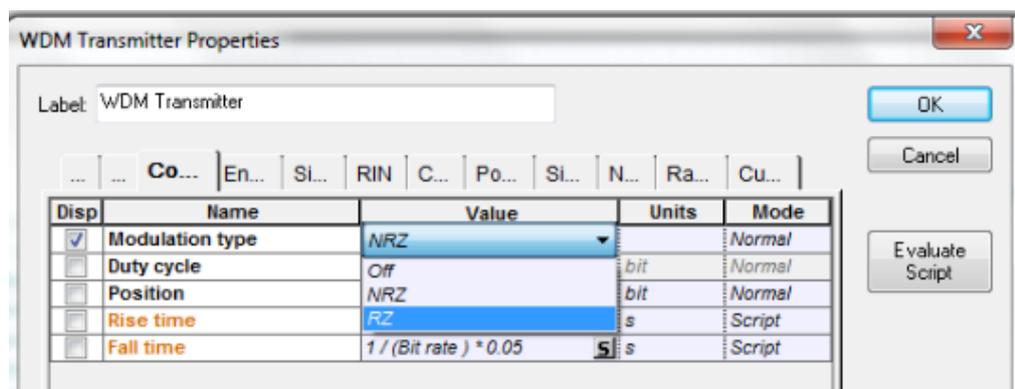
- Para que las técnicas de modulación WDM y CWDM empleen parámetros RZ (retorno a cero) NRZ (no retorno a cero) estos deberán estar estructurados en los ex mod de la etapa de transmisión a diferencia de DWDM que se lo cambiara en las configuraciones del transmisor WDM.



(a)



(b)



(c)

Ilustración 28. Parámetros para modulación RZ y NRZ: (a) Generador de pulso para modulación NRZ (b) Generador de pulso para modulación RZ (c) Configuración de las propiedades del transmisor WDM para parámetros RZ y NRZ.

- Para los parámetros de linealidad y no linealidad tendremos que entrar a la configuración de la fibra óptica para establecer si queremos un sistema lineal o no lineal.

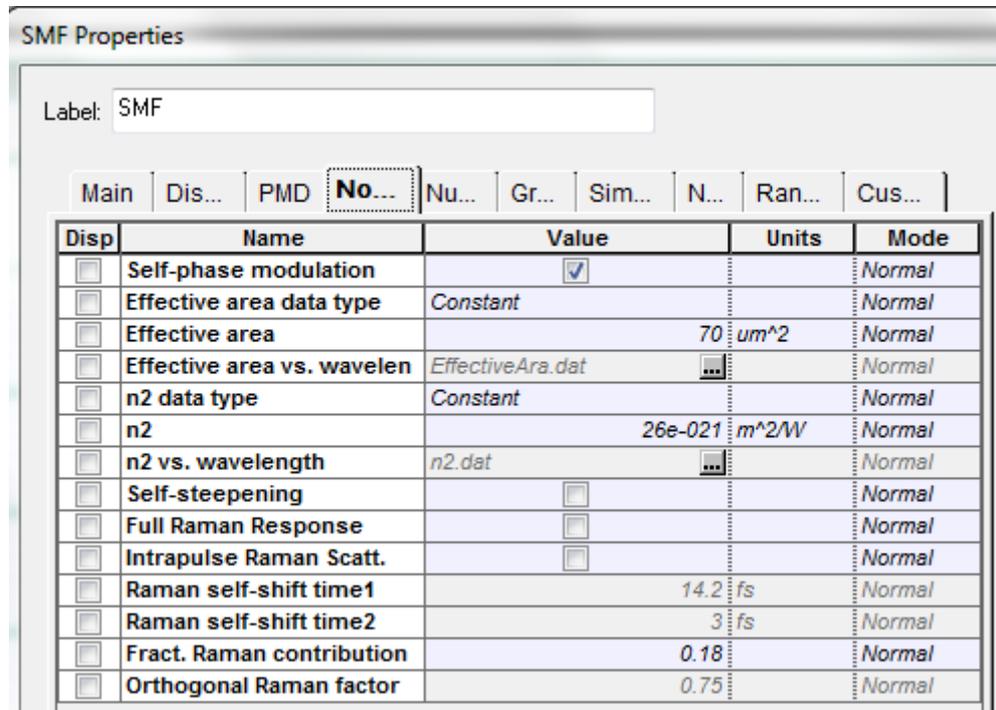


Ilustración 29. Propiedades de linealidad y no linealidad dentro de la fibra estándar SMF, para las técnicas de modulación WDM y DWDM.

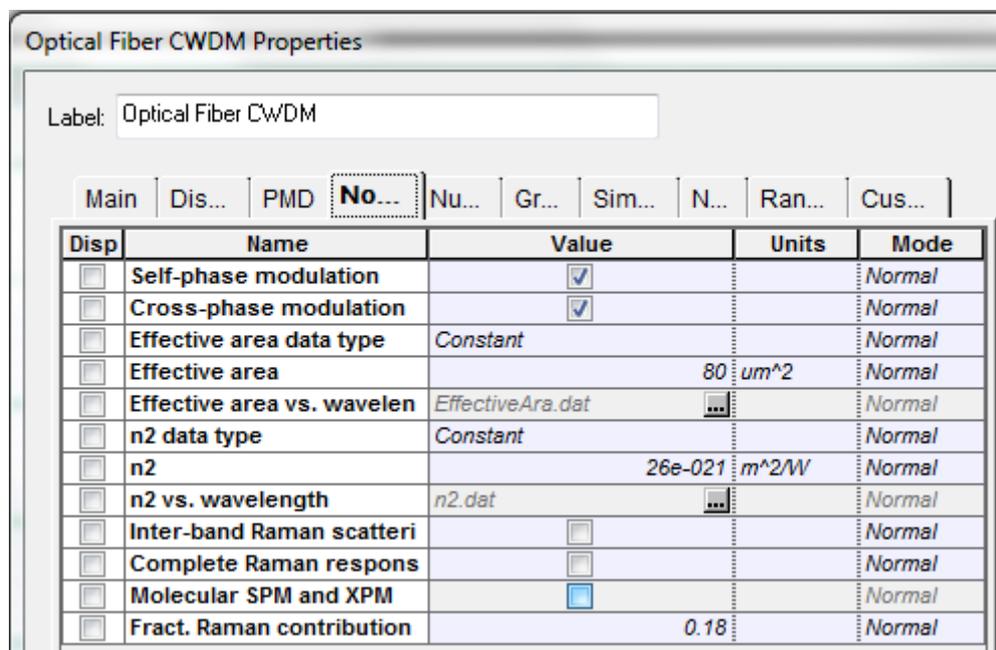


Ilustración 30. . Propiedades de linealidad y no linealidad dentro de la fibra CWDM, para sistema CWDM.

- Luego se incluirá los diferentes elementos que podrán proporcionar la información de lo que está ocurriendo en cada punto de las etapas y poder comparar cada una de ellas en los mismos aspectos.

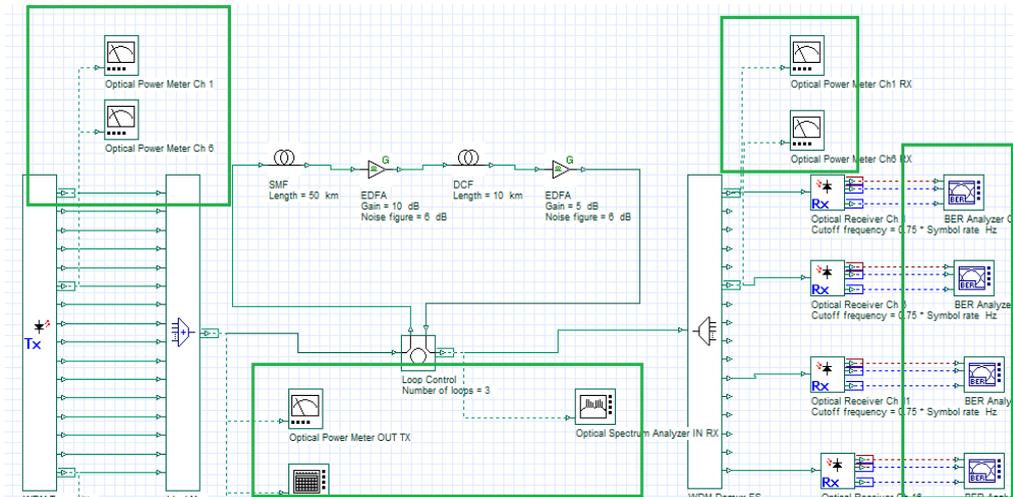
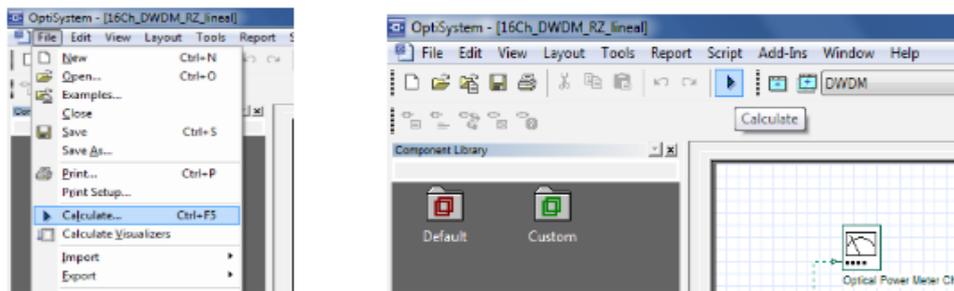


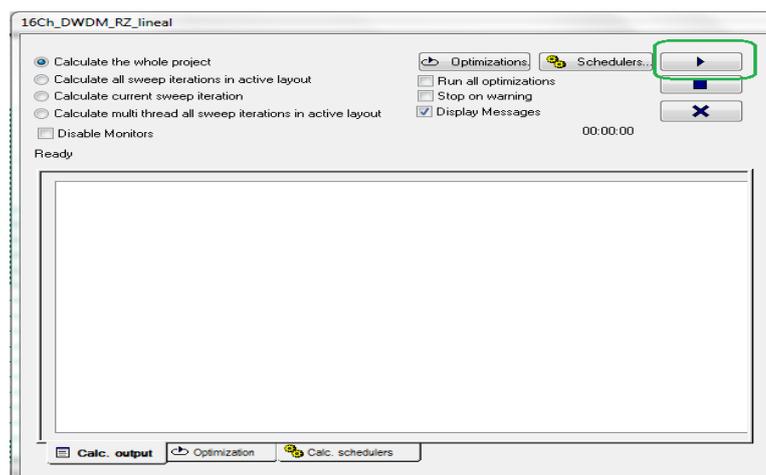
Ilustración 31. Escenario DWDM con parámetros de medida.

- Después se realizan a ejecutar cada uno de los escenarios.



(a)

(b)



(c)

Ilustración 32. Ejecutar la simulación: (a) ejecución mediante el uso del menú de opciones (b) ejecución mediante la utilización del botón New (c) ventana de ejecución para ver el proceso de simulación.

- Una vez terminado el cálculo de cada técnica de modulación se procede a ver cada elemento de medición para observar el comportamiento en cada técnica de modulación.

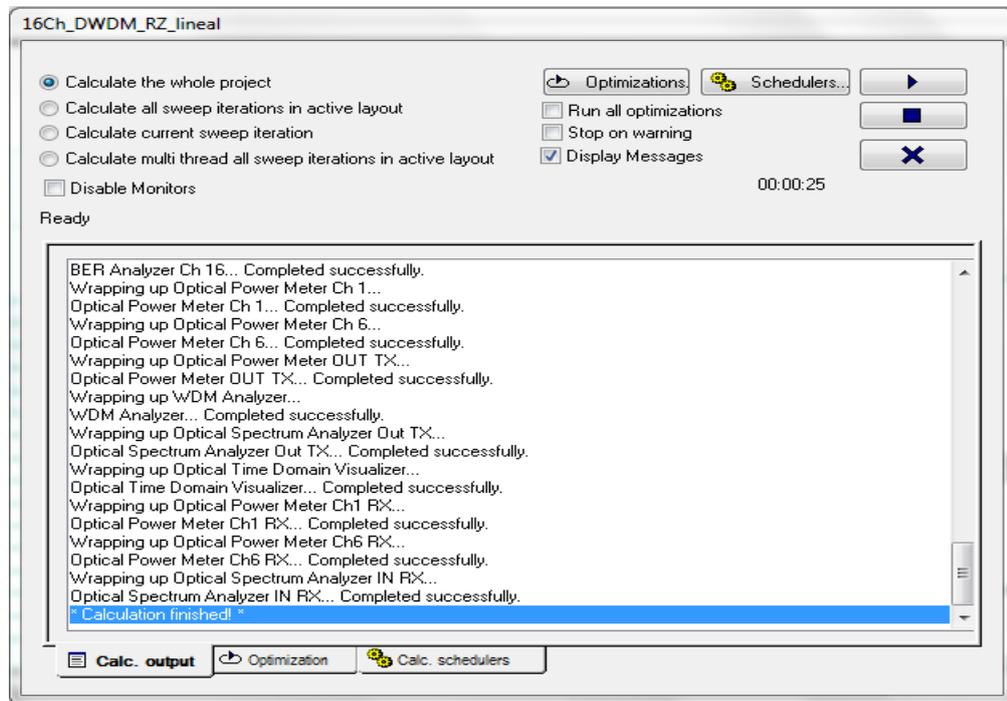


Ilustración 33. Simulación finalizada.

- Se capturar o anota los diferentes parámetros e inconvenientes que va a generar cada una de las técnicas.
- Después se monta dentro de OptiSystem un escenario de una de las técnicas de modulación en este caso WDM y se implementa el módulo de Matlab para así poder emplear por medio de código diferentes interacciones de co-simulación entre estos dos softwares.

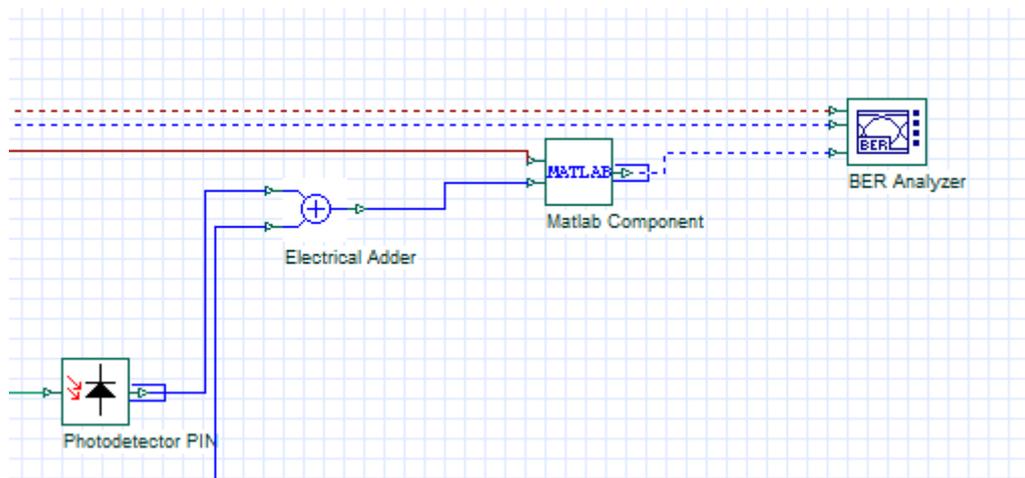


Ilustración 34. Componente Matlab dentro de OptiSystem.

- Preparar la información obtenida para que puedan analizarse correctamente.

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

Después de simular los diferentes escenarios se podrá analizar varios parámetros, sin antes tener presente algunos aspectos antes de su simulación.

Es importante recalcar que cada técnica de modulación se encuentra en un escenario simulado, por lo que proporcionará resultados aproximados, a lo que puede ser un escenario real.

Por otra parte, el simulador está en la capacidad de manejar el incremento en los canales y los componentes adicionales que cada escenario, pero al contener mayor cantidad de elementos requiere un mayor tiempo de proceso.

Dentro de los instrumentos de medida que proporciona OptiSystem se puede citar los siguientes los cuales serán motivo de análisis:

- Instrumentos de Medida para Señales Ópticos.
  - Analizador de Espectro.
  - Medidor de Potencia.
  - Analizador WDM, etc.
- Instrumentos de Medida para Señales Eléctricas.
  - Osciloscopio.
  - Analizador de Espectro.
  - Analizador de BER.
  - Analizador del diagrama del Ojo, etc.

### **5.1. ANÁLISIS DE NIVELES DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN**

#### **WDM**

Dentro de este escenario con una modulación NRZ y parámetros lineales se puede obtener los niveles de potencia en los diferentes puntos que conforman la comunicación a través de la fibra óptica; por lo que se muestra la potencia inicial en el canal 1 y la potencia de llegada en el mismo canal de igual manera la potencia a la salida del transmisor y al ingreso del receptor.

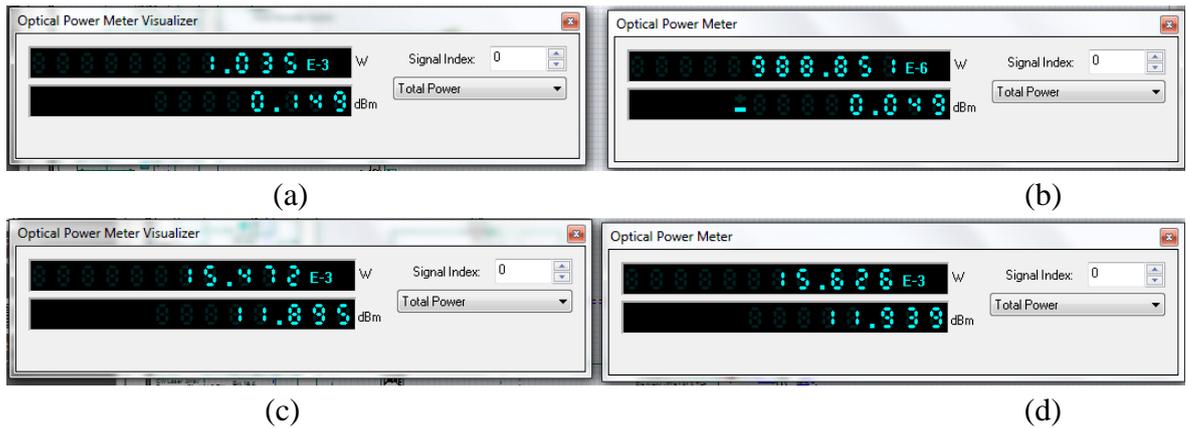


Ilustración 35. Niveles de potencia WDM: (a) Potencia de transmisión del canal 1 (b) Potencia de recepción del canal 1 (c) Potencia a la salida del multiplexor (d) Potencia a la entrada del demultiplexor

### CWDM

Dentro de este escenario con una modulación NRZ y parámetros lineales se puede obtener los niveles de potencia en los diferentes puntos que conforman la comunicación a través de la fibra óptica; por lo que se muestra la potencia inicial en el canal 1 y la potencia de llegada en el mismo canal de igual manera la potencia a la salida del transmisor y al ingreso del receptor.

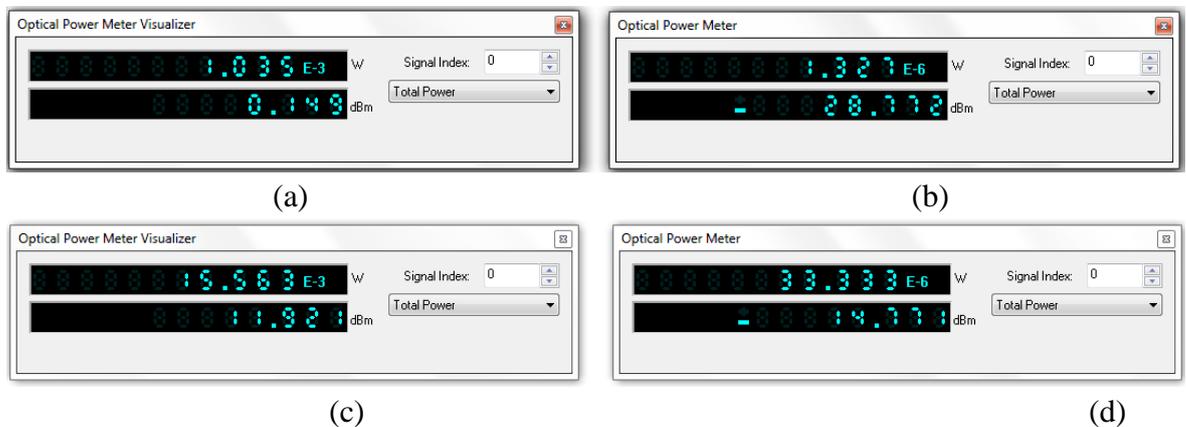


Ilustración 36. Niveles de potencia CWDM: (a) Potencia de transmisión del canal 1 (b) Potencia de recepción del canal 1 (c) Potencia a la salida del multiplexor (d) Potencia a la entrada del demultiplexor

### DWDM

Dentro de este escenario con una modulación NRZ y parámetros lineales se puede obtener los niveles de potencia en los diferentes puntos que conforman la comunicación a través de la fibra óptica; por lo que se muestra la potencia inicial en el canal 1 y la potencia de llegada en el mismo canal de igual manera la potencia a la salida del transmisor y al ingreso del receptor.

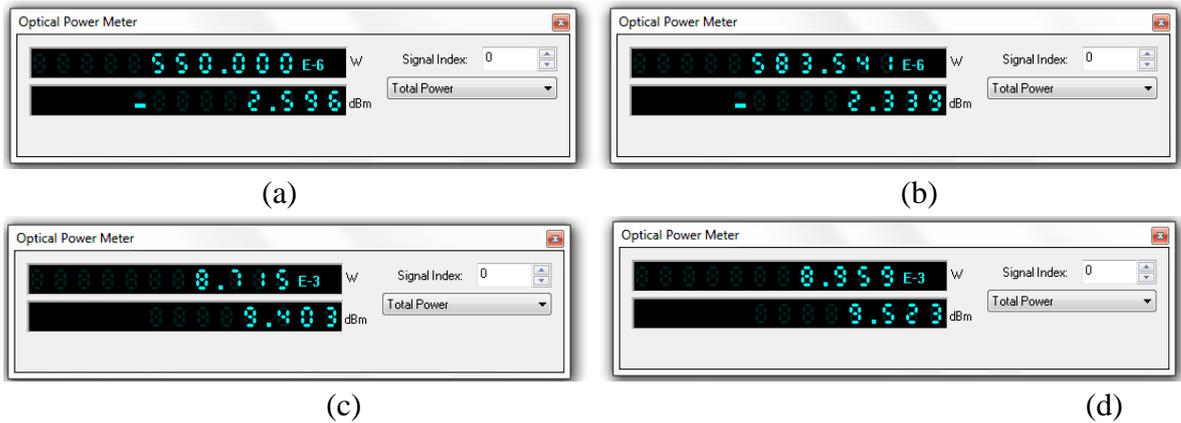


Ilustración 37. Niveles de potencia DWDM: (a) Potencia de transmisión del canal 1 (b) Potencia de recepción del canal 1 (c) Potencia a la salida del multiplexor (d) Potencia a la entrada del demultiplexor

Al observar los niveles de potencia se puede notar los siguientes cambios entre las técnicas de modulación:

- Entre WDM y CWDM la potencia de transmisión del canal 1 es idéntica, pero la potencia de llegada al canal 1 en el receptor es totalmente diferente.
- A pesar de tener los mismos parámetros la potencia a la salida del multiplexor y entrada del demultiplexor en los tres sistemas es completamente diferente.

## 5.2 ANÁLISIS DE ESPECTRO DE FRECUENCIA EN LA SALIDA DEL MULTIPLEXOR Y ENTRADA DEL DEMULTIPLEXOR

El analizador de espectro muestra las frecuencias de cada una de las longitudes de onda de los 16 canales que posee cada uno de los sistemas, en una forma alineada en amplitud, tomando en cuenta que cada canal posee una potencia de transmisión similar y dentro del cual se podrá observar parámetros de frecuencia, potencia de transmisión, ruido y relación señal a ruido de todas las ondas transmitidas.

### WDM

Dentro de este escenario con una modulación NRZ y parámetros lineales se obtiene en la ilustración 38. una pantalla del analizador WDM de los 16 canales con las medidas de potencia, ruido y OSNR.



Ilustración 38. Niveles de potencia WDM de los 16 canales a la salida del multiplexor.

En la ilustración 39. se puede observar los niveles máximos y mínimos de la potencia ópticas de las longitudes de onda totales en la etapa de transmisión.

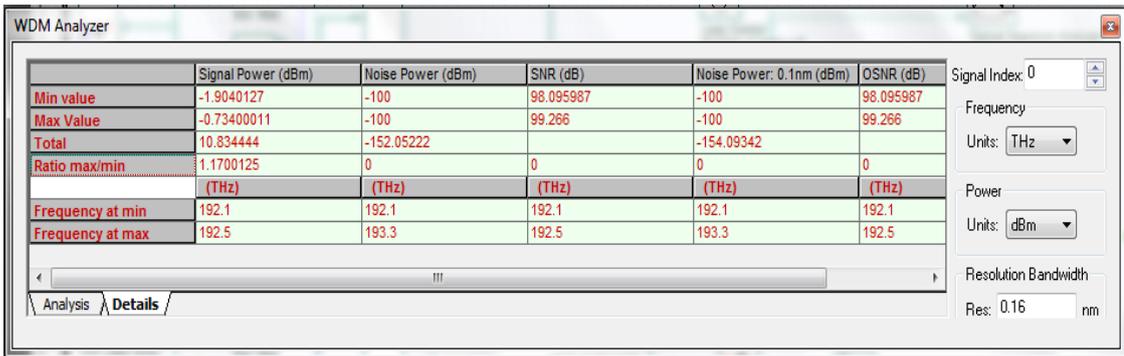
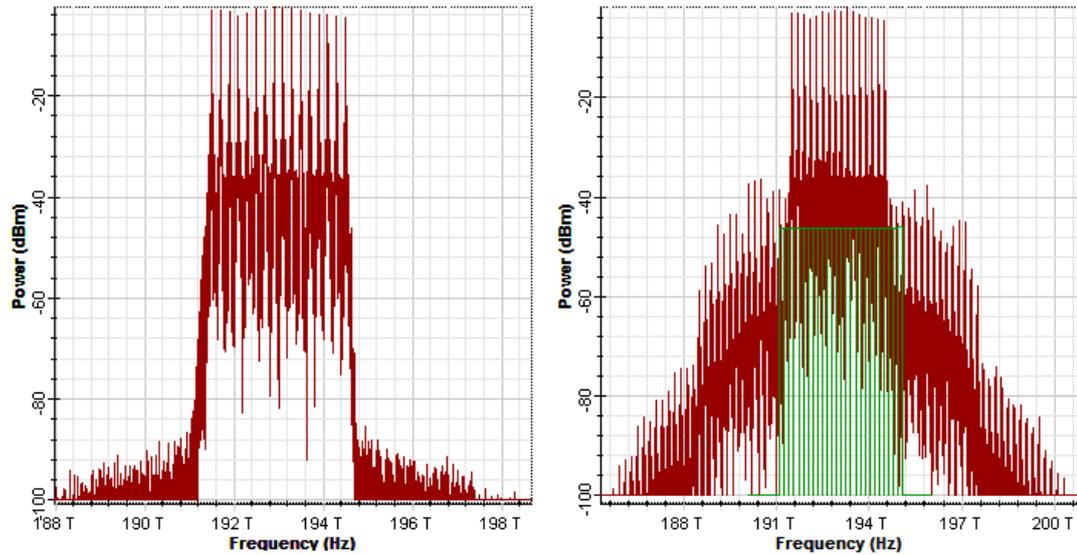


Ilustración 39. Niveles de potencia máximos y mínimos a la salida del multiplexor WDM

Los niveles de potencia a la salida del loop de control, distan de los niveles de salida del multiplexor, debido a que ha pasado por un proceso de amplificación dentro del enlace óptico, sin embargo, en el espectro de la señal que ingresa al demultiplexor ya se evidencia una señal de ruido, la cual se la debe mantener lo más alejada de la señal, y conservar una relación señal a ruido (SNR) adecuado. En la siguiente ilustración se muestra el espectro de la señal a la salida del multiplexor y la señal a la entrada del multiplexor, en la cual se pueden apreciar las similitudes y las diferencias de la señal que se está propagando.



(a)

(b)

Ilustración 40 Espectros de frecuencia WDM. (a) Espectro de frecuencia a la salida del multiplexor (b) Espectro de frecuencia a la entrada del demultiplexor

Por último, ya con la señal en el demultiplexor, este se encarga de distribuir de manera ordenada de cada uno de los canales, provenientes del multiplexor, correspondientes a cada una de las longitudes de onda que han sido transmitidas.

## CWDM

Dentro de este escenario con una modulación NRZ y parámetros lineales se obtiene en la ilustración 41. una pantalla del analizador WDM de los 16 canales con las medidas de potencia, ruido y OSNR.



Ilustración 41. Niveles de potencia CWDM de los 16 canales a la salida del multiplexor.

En la ilustración 42. se puede observar los niveles máximos y mínimos de la potencia ópticas de las longitudes de onda totales en la etapa de transmisión.

	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	SNR (dB)	Noise Power: 0.1nm (dBm)	OSNR (dB)
Min value	-15.682076	-100	84.317924	-100	84.317924
Max Value	-14.639565	-100	85.360435	-100	85.360435
Total	-2.9325205	-170.30707		-172.34827	
Ratio max/min	1.0425105	0	0	0	0
	(THz)	(THz)	(THz)	(THz)	(THz)
Frequency at min	194.5	191.5	194.5	194.5	194.5
Frequency at max	191.5	193.1	191.5	193.1	191.5

Ilustración 42.. Niveles de potencia máximos y mínimos a la salida del multiplexor CWDM

Los niveles de potencia a la salida del loop de control, distan de los niveles de salida del multiplexor, debido a que ha pasado por un proceso de amplificación dentro del enlace óptico, sin embargo, en el espectro de la señal que ingresa al demultiplexor ya se evidencia una señal de ruido, la cual se la debe mantener lo más alejada de la señal, y conservar una relación señal a ruido (SNR) adecuado. En la siguiente ilustración se muestra el espectro de la señal a la salida del multiplexor y la señal a la entrada del multiplexor, en la cual se pueden apreciar las similitudes y las diferencias de la señal que se está propagando.

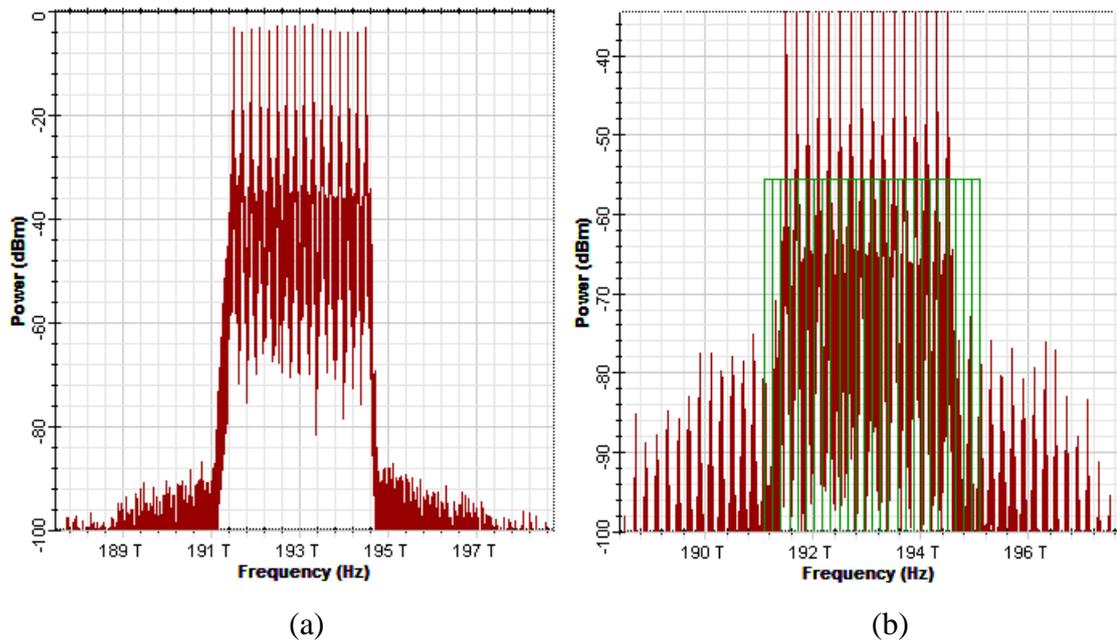


Ilustración 43. Espectros de frecuencia CWDM. (a) Espectro de frecuencia a la salida del multiplexor (b) Espectro de frecuencia a la entrada del demultiplexor

Por último, ya con la señal en el demultiplexor, este se encarga de distribuir de manera ordenada de cada uno de los canales, provenientes del multiplexor, correspondientes a cada una de las longitudes de onda que han sido transmitidas.

## DWDM

Dentro de este escenario con una modulación NRZ y parámetros lineales se obtiene en la ilustración 44. una pantalla del analizador WDM de los 16 canales con las medidas de potencia, ruido y OSNR.

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	SNR (dB)	Noise Power: 0.1nm (dBm)	OSNR (dB)
193.41449	-2.6766406	-33.617084	30.940443	-35.658284	32.981643
193.51449	-2.6811252	-33.632021	30.950896	-35.673221	32.992096
193.61449	-2.6913619	-33.765047	31.073685	-35.806247	33.114885
193.71449	-2.7537644	-34.072358	31.318594	-36.113558	33.359793
193.81449	-2.7457347	-33.936493	31.190758	-35.977892	33.231958
193.91449	-2.6933432	-33.49806	30.804717	-35.53926	32.845917
194.01449	-2.7433605	-31.386512	28.643151	-33.427712	30.684351
194.11449	-2.7387364	-30.789427	28.050691	-32.830627	30.091891
194.21449	-2.696924	-30.848768	28.151844	-32.889967	30.193043
194.31449	-2.6884879	-31.336023	28.647535	-33.377223	30.688735
194.41449	-2.7377963	-33.665412	30.927616	-35.706612	32.968816
194.51449	-2.7412324	-33.97757	31.236337	-36.018769	33.277537
194.61449	-2.745343	-33.59354	30.848197	-35.634739	32.889396
194.71449	-2.6921576	-33.739847	31.04769	-35.781047	33.08889
194.81449	-2.6923079	-33.818852	31.126544	-35.860051	33.167744
194.91449	-2.7363642	-33.658905	30.922541	-35.700105	32.963741

Ilustración 44. Niveles de potencia DWDM de los 16 canales a la salida del multiplexor

En la ilustración 45. se puede observar los niveles máximos y mínimos de la potencia ópticas de las longitudes de onda totales en la etapa de transmisión.

	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	SNR (dB)	Noise Power: 0.1nm (dBm)	OSNR (dB)
<b>Min value</b>	-2.7537644	-34.072358	28.050691	-36.113558	30.091891
<b>Max Value</b>	-2.6766406	-30.789427	31.318594	-32.830627	33.359793
<b>Total</b>	9.3253694	-20.870034		-22.911234	
<b>Ratio max/min</b>	0.077123825	3.2829308	3.2829308	3.2829308	3.2829308
<b>(THz)</b>	<b>(THz)</b>	<b>(THz)</b>	<b>(THz)</b>	<b>(THz)</b>	<b>(THz)</b>
<b>Frequency at min</b>	193.71449	193.71449	194.11449	193.71449	194.11449
<b>Frequency at max</b>	193.41449	194.11449	193.71449	194.11449	193.71449

Ilustración 45. Niveles de potencia máximos y mínimos a la salida del multiplexor DWDM

Los niveles de potencia a la salida del loop de control, distan de los niveles de salida del multiplexor, debido a que ha pasado por un proceso de amplificación dentro del enlace óptico, sin embargo, en el espectro de la señal que ingresa al demultiplexor ya se evidencia una señal de ruido, la cual se la debe mantener lo más alejada de la señal, y conservar una relación señal a ruido (SNR) adecuado. En la siguiente ilustración se muestra el espectro de la señal a la salida del multiplexor y la señal a la entrada del

multiplexor, en la cual se pueden apreciar las similitudes y las diferencias de la señal que se está propagando.

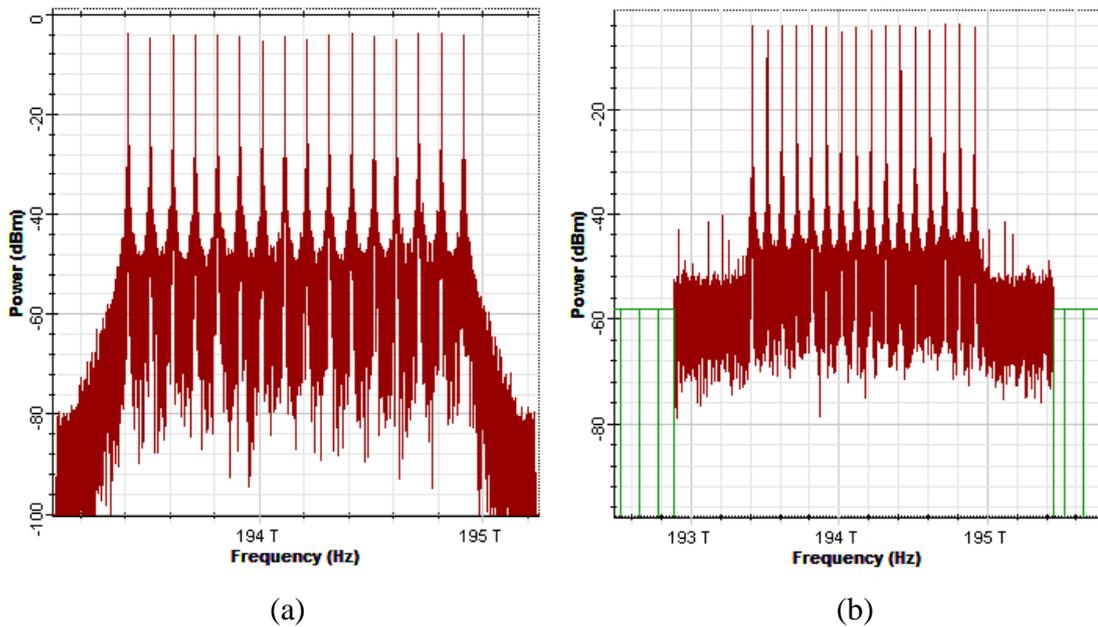


Ilustración 46. Espectros de frecuencia DWDM. (a) Espectro de frecuencia a la salida del multiplexor (b) Espectro de frecuencia a la entrada del demultiplexor

Por último, ya con la señal en el demultiplexor, este se encarga de distribuir de manera ordenada de cada uno de los canales, provenientes del multiplexor, correspondientes a cada una de las longitudes de onda que han sido transmitidas.

### 5.3 RESULTADOS POR PARTE DEL ANÁLIZADOR DE LA TASA DE BIT ERRADOS (BER)

OptiSystem proporciona el elemento BER Analyzer que aparte de analizar la tasa de bits errados (BER), permite visualizar también el diagrama de ojo que posee los canales del sistema, también se puede observar los valores de factor de calidad, de límite, valor de umbral, entre otros parámetros.

## WDM modulación NRZ parámetros lineales

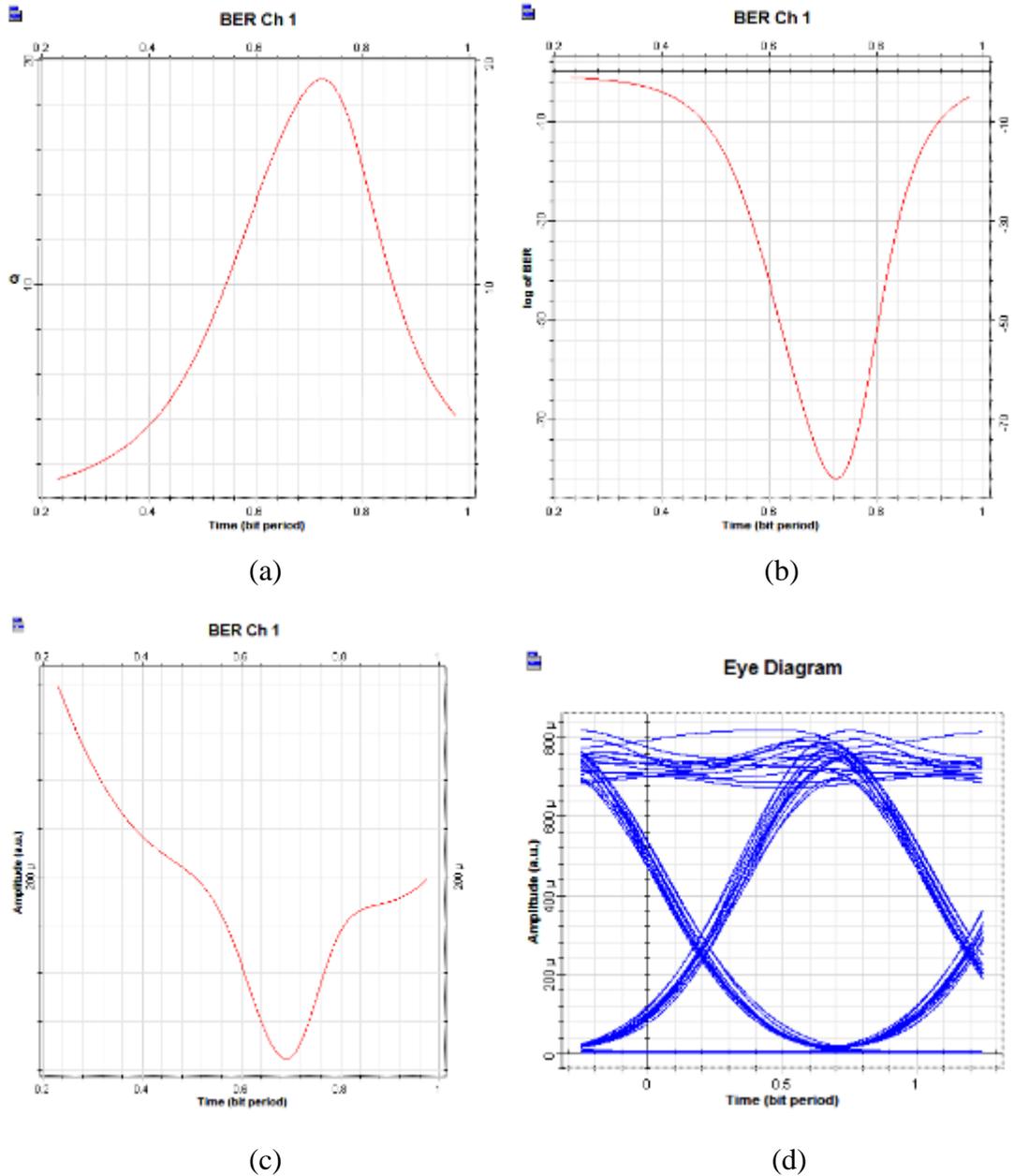


Ilustración 47. BER Analyzer WDM: (a) Curva de factor de calidad (b) Curva de la tasa de bits errados BER (c) Curva de Umbral (d) Diagrama de ojo

Los resultados obtenidos en la simulación a 16 canales, demuestran que los niveles de factor de calidad y tasa de bits errados BER, son óptimos para la transmisión de información.

El diagrama del ojo para estas condiciones, mostrado en la ilustración 47 literal (d), presenta una buena apertura de ojo, la parte superior indica la presencia de ruido, pero

es mínima y no ingresa al centro del ojo, lo que demuestra que el enlace no tiene interferencia intersímbolo, no tiene distorsión y el ruido no afecta a la recepción.

### CWDM modulación NRZ parámetros lineales

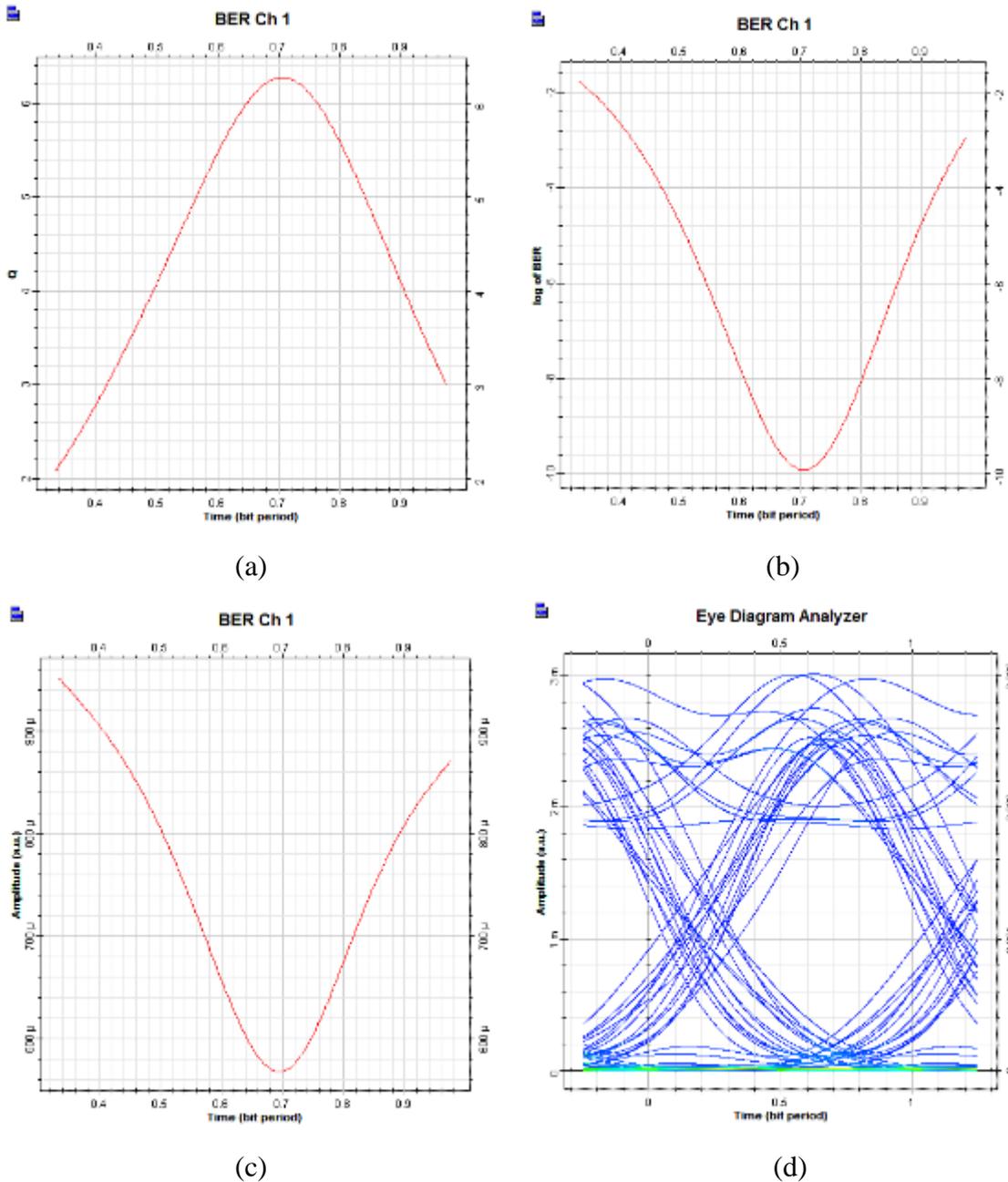


Ilustración 48. BER Analyzer CWDM: (a) Curva de factor de calidad (b) Curva de la tasa de bits errados BER (c) Curva de Umbral (d) Diagrama de ojo

Los resultados obtenidos en la simulación a 16 canales, demuestran que los niveles de factor de calidad y tasa de bits errados BER, son óptimos para la transmisión de información.

El diagrama del ojo para estas condiciones, mostrado en la ilustración 48 literal (d), presenta una apertura de ojo aceptable, la parte superior indica la presencia de ruido, pero

es mínima y no ingresa al centro del ojo, lo que demuestra que el enlace no tiene interferencia intersímbolo, no tiene distorsión y el ruido no afecta a la recepción

### DWDM modulación NRZ parámetros lineales

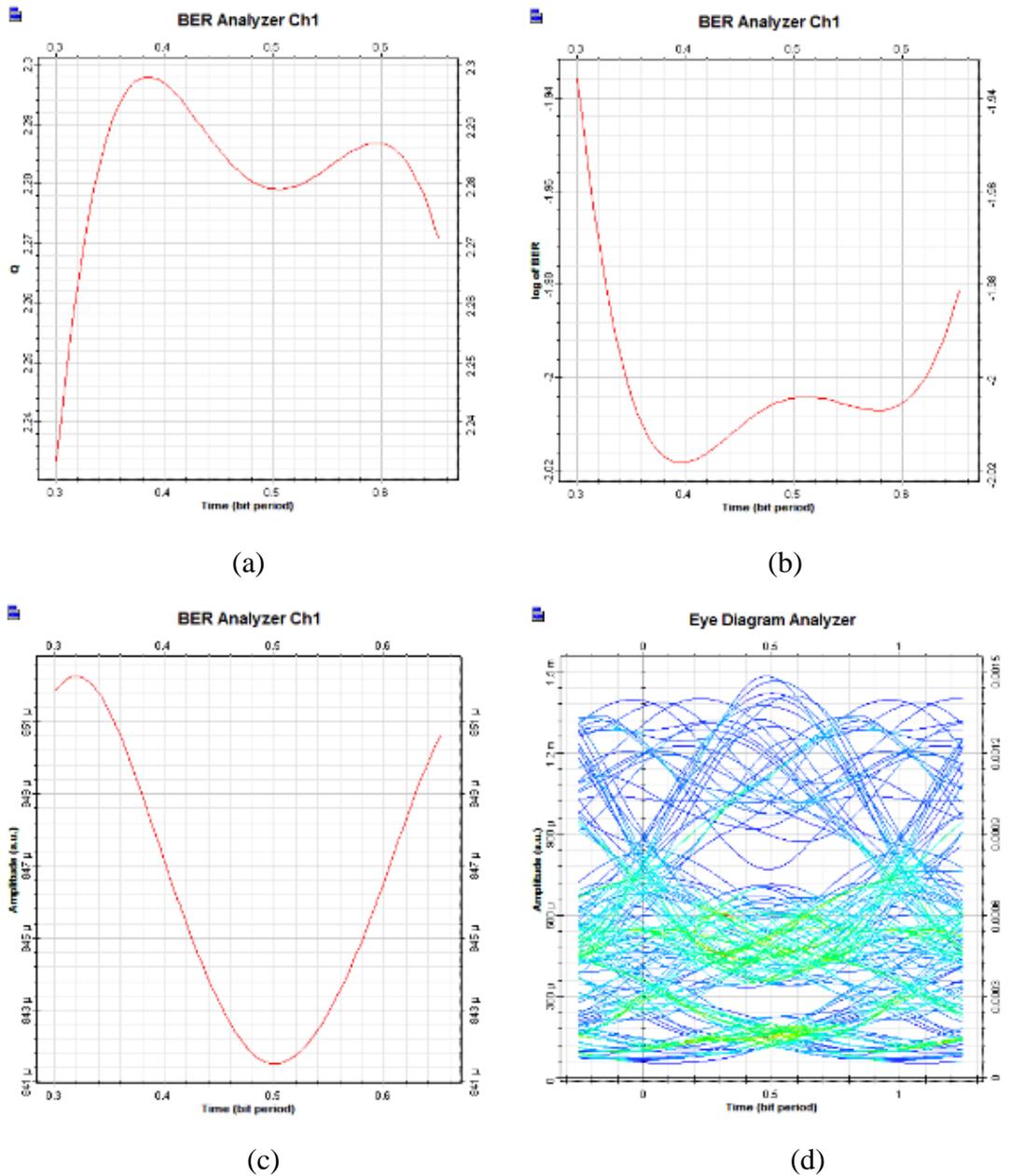


Ilustración 49. BER Analyzer DWDM: (a) Curva de factor de calidad (b) Curva de la tasa de bits errados BER (c) Curva de Umbral (d) Diagrama de ojo

Los resultados obtenidos en la simulación a 16 canales, demuestran que los niveles de factor de calidad y tasa de bits errados BER, no son óptimos para la transmisión de información.

El diagrama del ojo para estas condiciones, mostrado en la ilustración 49 literal (d), presenta una apertura de ojo casi reconocible, la parte superior e inferior indica la

presencia de ruido, que ingresa al centro del ojo, lo que demuestra que el enlace, tiene distorsión y el ruido afecta gran parte de la recepción debido a que la potencia con la que la señal llega al receptor no supera la sensibilidad del mismo, por lo que el detector únicamente toma la señal que recibe como ruido. Para dar una posible solución lo que se realiza es un aumento en la ganancia que deban poseer los amplificadores para que la señal llegue con la potencia necesaria y el receptor pueda detectarlo.

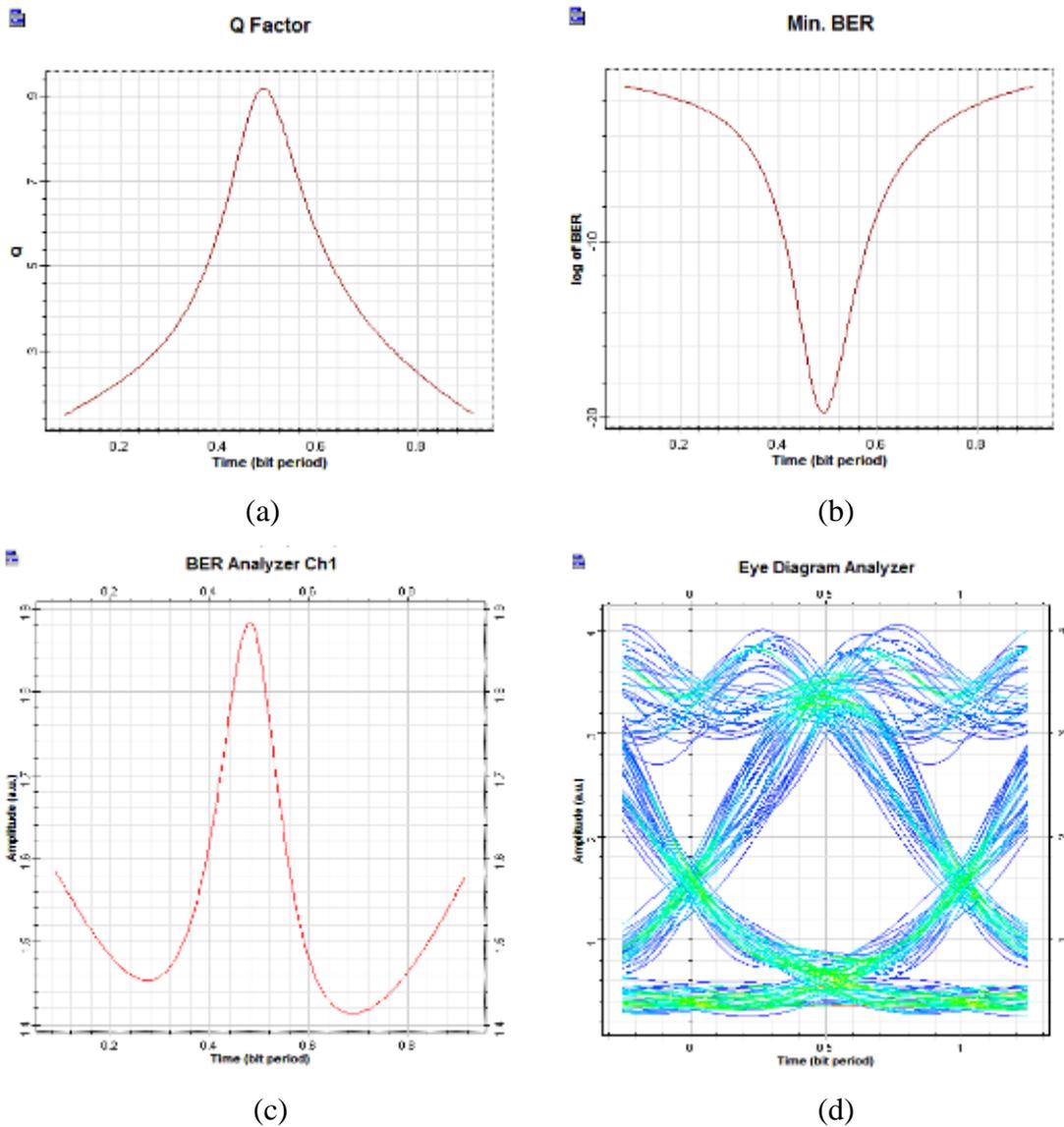


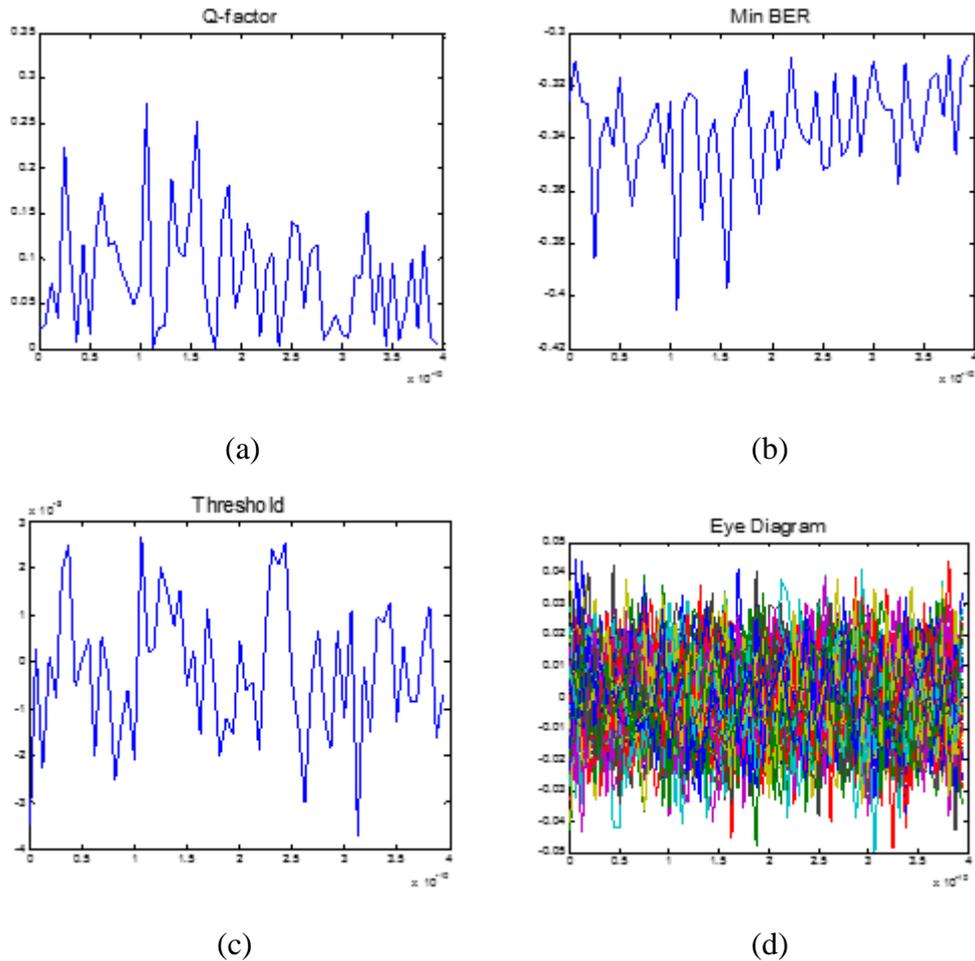
Ilustración 50. BER Analyzer DWDM con mayor amplificación: (a) Curva de factor de calidad (b) Curva de la tasa de bits errados BER (c) Curva de Umbral (d) Diagrama de ojo

Los resultados obtenidos en la simulación a 16 canales, demuestran que los niveles de factor de calidad y tasa de bits errados BER, son óptimos para la transmisión de información.

El diagrama del ojo para estas condiciones, mostrado en la ilustración 50 literal (d), presenta una apertura de ojo aceptable, la parte superior indica la presencia de ruido, pero

es mínima y no ingresa al centro del ojo, lo que demuestra que el enlace no tiene interferencia intersímbolo, no tiene distorsión y el ruido no afecta a la recepción

#### 5.4 ANÁLISIS DE LA CO-SIMULACIÓN ENTRE OPTISYSTEM Y MATLAB



*Ilustración 51. BER Analyzer WDM co-simulación con Matlab: (a) Curva de factor de calidad (b) Curva de la tasa de bits errados BER (c) Curva de Umbral (d) Diagrama de ojo*

Los resultados obtenidos en la co-simulación entre OptiSystem y Matlab, demuestran que es posible enviar diferentes parámetros a Matlab para que en ellos puedan ser procesados y obtener a través de Matlab las gráficas de niveles de factor de calidad, tasa de bits errados BER y diagrama de ojo que son los parámetros más importantes a analizar.

El diagrama del ojo mostrado en la ilustración 51 literal (d), no presenta una apertura de ojo aceptable, lo que más se presencia es ruido, y es debido a que se ingresa una señal de ruido conjuntamente después del receptor óptico lo que crea afectaciones a la recepción.

## 6. CONCLUSIONES

- El objetivo principal de éste proyecto fue evaluar el desempeño de técnicas de modulación en sistemas de fibra óptica, aplicando un software de simulación para medir los parámetros básicos que debe cumplir una comunicación óptica del cual se puede concluir que se obtuvo acceso a un software de simulación para fibra que fue OptiSystem el cual es de gran importancia ya que al lograr integrar esta herramienta a futuro dentro de la formación académica se puede generar nuevos proyectos que mejoren los conocimientos para los futuros ingenieros y al ser una herramienta muy completa dado el análisis de los escenarios de las modulaciones realizadas se da por hecho que uno de los mejor método de modulación es DWDM ya que permite integrar mayor cantidad de canales y a su vez soportar parámetros absurdos los cuales pueden ser analizados, no obstante las otras modulaciones permiten establecer nuevas líneas de investigación, ya que no poseen información explotada como en el caso de DWDM.
- Este proyecto proporciono ampliar y complementar los conocimientos en sistemas comunicaciones ópticas mediante la manipulación del software OptiSystem, teniendo como resultados sólidos conceptos de comunicaciones ópticas, tanto teóricos como prácticos con el fin de llevarlos a aplicar en la vida profesional, ya sea para diseño, implementación o solución de problemas.
- En los sistemas de comunicaciones ópticas se cuenta con tres principales elementos: el transmisor, el canal de comunicaciones o enlace óptico y el receptor y mediante el software de simulación se puede elaborar varios escenarios y al ser una herramienta computacional completa permiten la variación en los parámetros tales como: índices de refracción, distancias, longitud de onda, velocidad de transmisión, potencia de la fuente, modificar los componentes del enlace como el tipo de fibra óptica, el tipo de detector entre otros.
- Una ventaja de los detectores PIN es que poseen menor costo que los detectores APD y que además son los más utilizados en los sistemas de comunicaciones, debido a que su diseño no es tan complejo.
- El diagrama del ojo y el BER que se puede observar en cada sistema, permiten el análisis de la señal transmitida, los parámetros que presenta el diagrama de ojo permite determinar la presencia de interferencia intersímbolo, efectos del ruido,

distorsión de señal, etc. Mientras que el apartado del BER permite saber si el sistema no presenta tolerancia de error de transmisión

## 7. RECOMENDACIONES

- El uso de OptiSystem como herramienta de simulación, no es la única alternativa para que forme parte de la formación de un ingeniero dentro de las comunicaciones ópticas, ya que hay alternativas que ofrecen diferentes características según lo que se necesite emplear y a su vez esté al alcance para adquirirlo.
- A pesar de que los simuladores con interfaces gráficas son bastante intuitivos, es necesario revisar los manuales que en este caso OptiSystem proporciona, para conocer a detalle cada parte del software y con su uso constante y una práctica continua se podrá llegar a adquirir la experiencia necesaria y poder manipular los parámetros requeridos para obtener resultados deseados.
- Dependiendo el escenario o el entorno que se vaya a simular la cantidad de componentes que se ubique en el área de trabajo de OptiSystem, el tiempo de simulación variara. Por lo que se recomienda utilizar los componentes que sean necesarios, o a su vez modificar los parámetros dentro del área de trabajo, para que la velocidad de simulación no influya en retardos o inconvenientes.
- Es recomendable al poseer una herramienta de simulación darle un uso adecuado ya que en este caso en condiciones reales ayudaría a determinar las características de los elementos del enlace óptico antes de la adquisición en hardware, visualizado de forma aproximada los efectos que pueden afectar al rendimiento del enlace con el fin de poder minimizarlos y garantizar que el sistema opere en óptimas condiciones.
- Dentro de las comunicaciones ópticas se puede contar con estos dos grandes softwares que permiten emplear bloques de visualización tanto de Matlab como de OptiSystem, permiten el análisis gráfico de las señales en diferentes puntos del escenario que se quiera simular. Por lo que se recomienda antes de utilizarlos, conocer las características principales sus parámetros, efectos que se presenten para de esta manera llegar a interpretar de manera correcta los gráficos presentados por cada bloque, como, por ejemplo, el analizador de diagrama del ojo, el analizador de espectro óptico, entre otros.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Aralyteck Communications. (30 de Abril de 2017). *Manul de Usuario- Pon Design software*. Obtenido de slideshare: <https://es.slideshare.net/Aralyteck/software-para-redes-opticas-pasivas-pon-wdm>
- ITU. (5 de Julio de 2017). *CWDM. Your up-to-date optical transmission systems solutions*. Obtenido de [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-t/oth/0B/04/T0B0400002F2C01PDFE.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/0B/04/T0B0400002F2C01PDFE.pdf)
- ITU. (5 de Julio de 2017). *DWDM. Your up-to-date optical transmission systems solutions*. Obtenido de [www.itu.int](http://www.itu.int). Retrieved 5 July 2017, from [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-t/oth/1D/01/T1D010000090001PDFE.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/1D/01/T1D010000090001PDFE.pdf)
- ITU. (5 de Julio de 2017). *Recomendación UIT-T G.694.2*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I/es>
- MathWorks. (5 de Julio de 2017). *MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico*. Obtenido de <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- MathWorks. (5 de Julio de 2017). *Pricing and Licensing*. Obtenido de <https://es.mathworks.com/pricing-licensing.html?prodcode=ML&intendeduse=comm>
- Millán Tejedor, R. J. (5 de Julio de 2017). *CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)*. Obtenido de [ramonmillan.com](http://www.ramonmillan.com): <http://www.ramonmillan.com/tutoriales/coarsewavelengthdivisionmultiplexing.php>
- Optiwave. (5 de Julio de 2017). *OptiSystem Overview*. Obtenido de <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
- Rafael. (5 de Julio de 2017). *Modulacion en Fibras Opticas*. Obtenido de scribd: <https://es.scribd.com/doc/35427423/Modulacion-en-Fibras-Opticas>
- synopsys. (10 de Mayo de 2017). *RSoft's Photonic Component Design Suite*. Obtenido de [synopsys.com](http://synopsys.com): <https://optics.synopsys.com/rsoft/rsoft-component-design.html>

## 9. ANEXOS

### 9.1 ANEXOS 1: ESCENARIOS DE SIMULACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE MODULACIÓN EN OPTISYSTEM

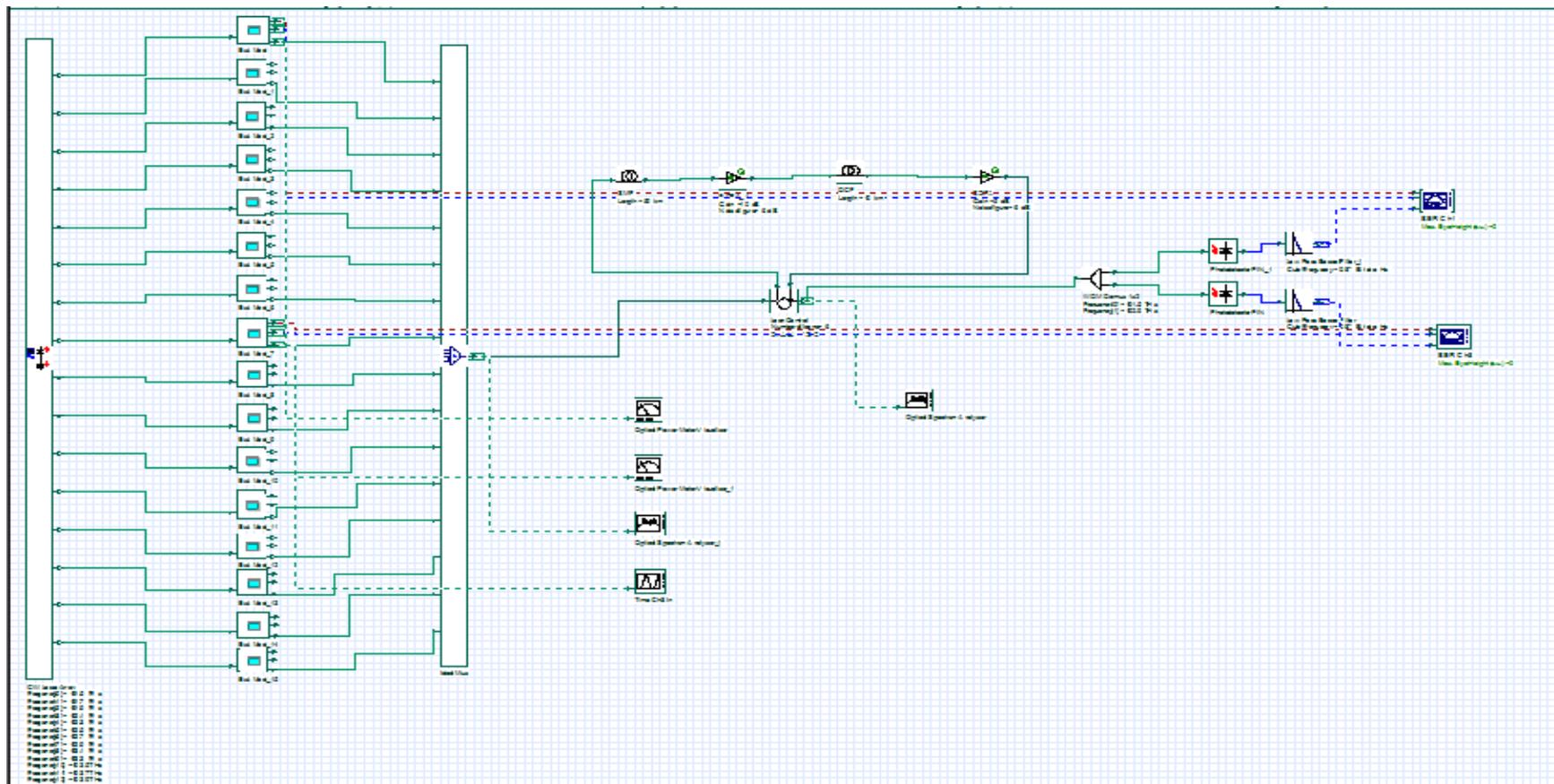


Ilustración 52. Escenario para modulación WDM

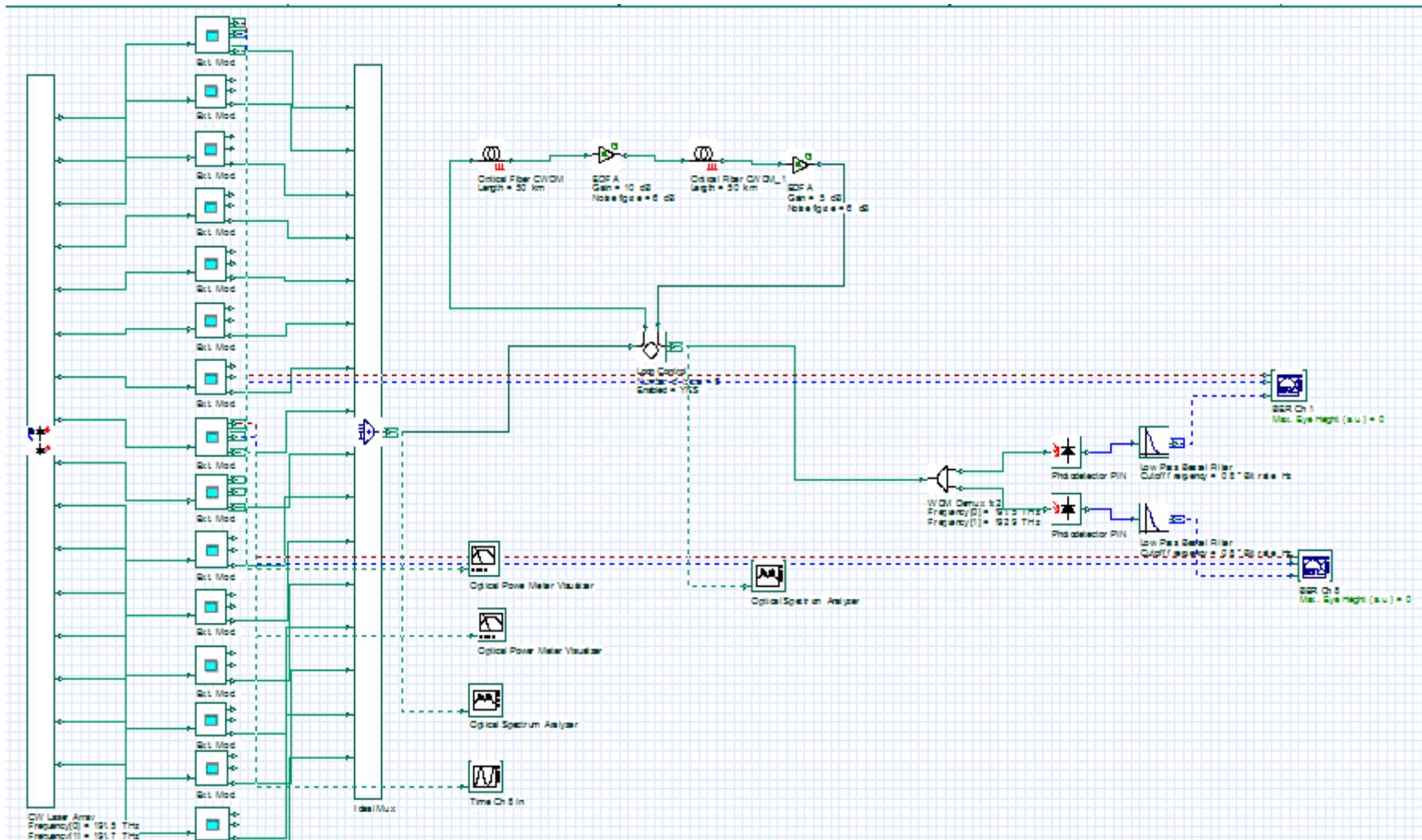


Ilustración 53. Escenario para modulación CWDM

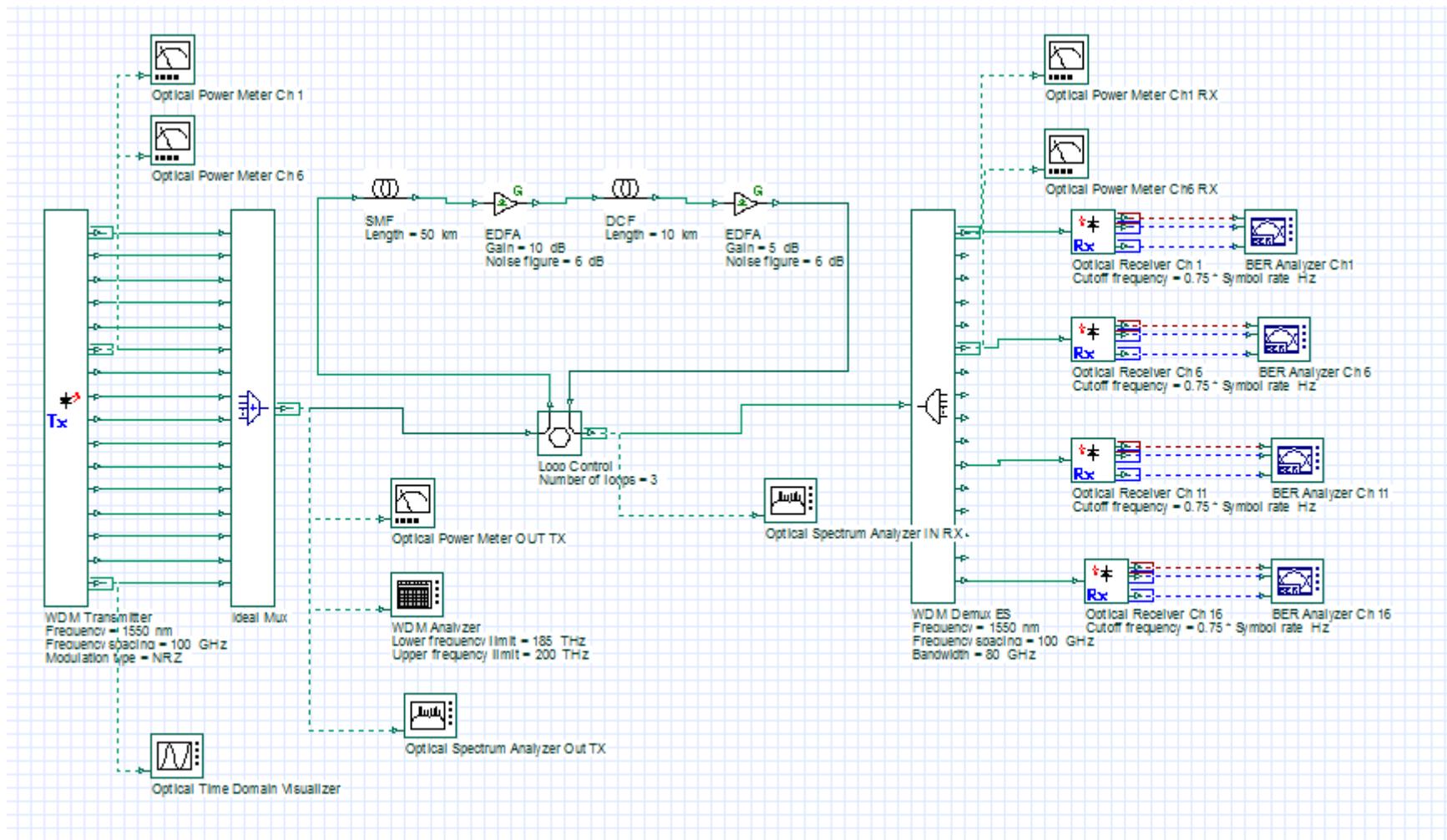


Ilustración 54. Escenario para modulación DWDM

## 9.2 ANEXOS 2: ESCENARIO DE LA CO-SIMULACIÓN ENTRE OPTISYSTEM Y MATLAB

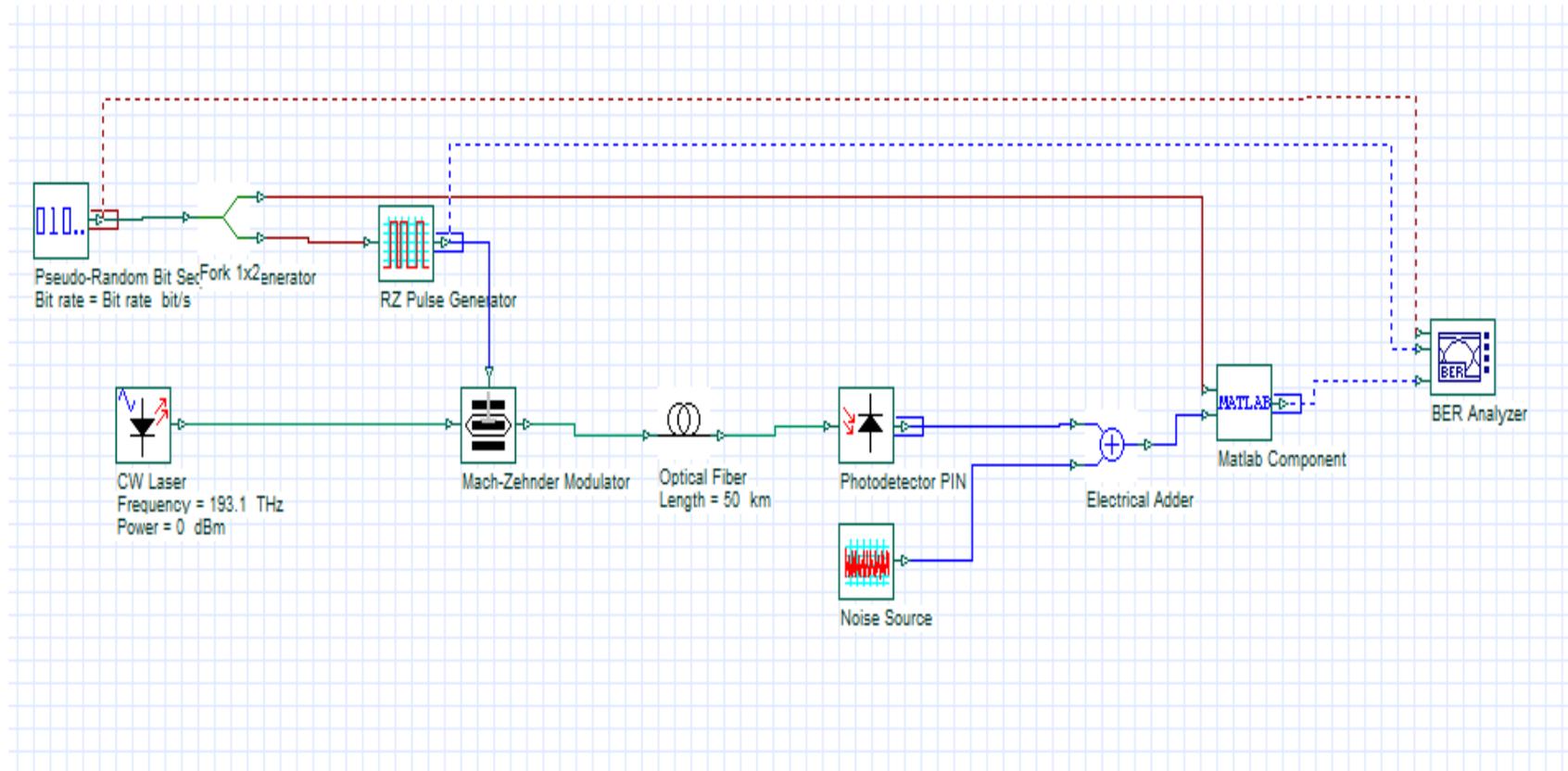


Ilustración 55. Escenario de Co-Simulación OptiSystem y Matlab

### 9.3 ANEXO 3: CÓDIGO EN MATLAB PARA OBTENER PARÁMETROS DE OPTISYSTEM

```
%%% ANALIZADOR DE BER %%%
%%% input port %%%
binary = InputPort1.Sequence;
electrical = InputPort2.Sampled.Signal + InputPort2.Noise.Signal;
time = InputPort2.Sampled.Time;
%%% ESPACIO DE TIEMPO ENTRE DIFERENTES MUESTRAS %%%
timeSpace = time(2) - time(1);
samples = length(electrical)/length(binary);
%%% ASIGNACION DE VALORES INICIALES %%%
timeArray(1) = 0;
spaceIndex = 0;
markIndex = 0;
elecIndex = 0;
threshold = 0.5;
%%% SEPARACION DE MUESTRA POR MEDIO DE ARRAYS %%%
for i = 1:length(binary)
    if (binary(i) == 0)
        spaceIndex = spaceIndex + 1;
        for j = 1:samples
            spaceArray(spaceIndex, j) = electrical(elecIndex+j);
        end;
    else
        markIndex = markIndex + 1;
        for j = 1:samples
            markArray(markIndex, j) = electrical(elecIndex+j);
        end;
    end;
    elecIndex = elecIndex + samples;
end;
%%% CREACION DEL TIEMPO PARA LA GRAFICA EN X-AXIS %%%
for i = 2:samples
    timeArray(i) = timeArray(i-1) + timeSpace;
end;
%%% DIGRAMA DE OJO %%%
figure
plot(timeArray, markArray, timeArray, spaceArray);
title('Eye Diagram','FontSize',16);
pause(3);
%%% PARAMETROS PARA DESVIACION ESTANDAR, FACTO Q Y LIMITE
DE OJO %%%
for j = 1:samples
    for i = 1:markIndex
        temp1(i) = markArray(i,j);
    end
    u1(j) = sum(temp1)/markIndex;
    std1(j) = std(temp1);
    for i = 1:spaceIndex
```

```

    temp0(i) = spaceArray(i,j);
end;
u0(j) = sum(temp0)/spaceIndex;
std0(j) = std(temp0);
if (std1(j)+std0(j) == 0)
    Q(j) = 0;
else
    Q(j) = abs(u1(j)-u0(j))/(std1(j)+std0(j));
    eyeHeight(j) = (u1(j)-3*std1(j)^2) - (u0(j)+3*std0(j)^2);
end;
end

%%% plots the Q-factor %%%
figure
plot(timeArray, Q);
title('Q-factor','FontSize',16);
pause(3);

%%% plots the Eye Height%%%
figure
plot(timeArray, eyeHeight);
title('Eye Height','FontSize',16);
pause(3);

```