



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E S C I E N T I A H O M I N I S S A L U S "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO E IMPLEMENTACIÓN
MEDIANTE SIMULACIÓN DE LOS MUX/DEMUX WDM**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**CARRIÓN CABRERA JONATHAN FABRICIO
CASA CALERO EDISON ANDRÉS**

DIRECTORA: M.Sc.MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ

Quito, marzo 2022

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jonathan Fabricio Carrión Cabrera y Edison Andrés Casa Calero, bajo mi supervisión.

M.Sc. María Soledad Jiménez Jiménez
DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Jonathan Fabricio Carrión Cabrera, Edison Andrés Casa Calero declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejamos constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

Jonathan Fabricio Carrión Cabrera

Edison Andrés Casa Calero

DEDICATORIA

Jonathan Fabricio Carrión Cabrera

A María Enid y Nelson Fabián, por ser mentores en los momentos más difíciles y acompañarme durante todos estos años con todo su amor y comprensión.

A Katherine Vanesa y María Belén quienes me apoyaron, cuidaron y motivaron durante todo el trayecto.

DEDICATORIA

Edison Andrés Casa Calero

A mi familia.

AGRADECIMIENTO

Jonathan Fabricio Carrión Cabrera

Expresar mis más sinceros agradecimientos a mis padres, pilar fundamental de todo este proyecto, que gracias a su esfuerzo y sacrificio he alcanzado mis objetivos. A mi hermana Katherine que a pesar de la distancia me ha sabido apoyar desde el primer momento. A mi hermana María Belén que estuvo a mi lado en los peores momentos y supo reconfortarme en los días más difíciles. A Robert por ser un gran amigo a pesar de la lejanía.

Mi Gratitud a la Ing. Ms.C María Soledad Jiménez por la gran apertura desde el inicio del trabajo de titulación y por la constante guía que permitieron culminar con éxito.

A la Escuela Politécnica Nacional que a través de sus conocimientos me permitieron crecer profesional y personalmente. A mis profesores que lograron transmitir con gran entendimiento sus ideas y formar un excelente profesional.

Y a todos mis familiares y amigos que fueron parte del proceso y que estuvieron presentes en todo momento; adicional un agradecimiento especial a Nicole D. por haber sido una gran amiga durante todos los años de estudio.

AGRADECIMIENTO

Edison Andrés Casa Calero

A mis padres, Aida y Víctor, por haber sido mi guía e inspiración para salir adelante y ser cada día una mejor persona, por su sacrificio, paciencia, consejos, motivación y sobre todo por haberme tenido confianza. Gracias a ustedes he llegado a ser quien soy en este momento, este logro es un reflejo de todo el apoyo que me brindaron, sin ustedes nada de esto hubiese sido posible.

A mis hermanos, Víctor, Yesenia, Mónica y a mi cuñado José, por haberme apoyado en cada circunstancia, ya que con sus palabras me motivaban y me daban fuerza para seguir adelante. A mi sobrina María José, que a pesar de ser tan pequeña cada día me sorprende con una ocurrencia nueva, por su carisma y por las sonrisas que me saca siempre.

Agradezco a nuestra tutora, María Soledad Jiménez, por tenernos confianza y ser nuestra guía durante el desarrollo de este trabajo de titulación y por brindarnos un tiempo valioso en la revisión del mismo. De la misma manera, a mi amigo Jonathan por su confianza y tiempo brindado en elaboración del presente trabajo.

A mis amigos, por todas las risas y experiencias compartidas durante mi etapa universitaria, a su motivación en cada momento. Un especial agradecimiento a mi amiga Abigail, por brindarme su ayuda siempre que la necesite y por su motivación en la elaboración del presente trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VII
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.2 ALCANCE	2
1.3 MARCO TEÓRICO.....	3
1.3.1 BREVE HISTORIA DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS	3
1.3.2 SISTEMA DE COMUNICACIONES POR FIBRA ÓPTICA	5
1.3.3 WAVELENGTH DIVISIÓN MULTIPLEXING (WDM)	13
1.3.4 MULTIPLEXORES Y DEMULTIPLEXORES WDM	17
2. METODOLOGÍA.....	24
2.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MULTIPLEXOR/DEMULTIPLEXOR WDM CON INTERFERÓMETROS MACH-ZEHNDER (MZI).....	24
2.1.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MZI.....	24
2.1.2. ACOPLADOR DIRECCIONAL.....	25
2.1.3. MATRIZ DE DISPERSIÓN DEL ACOPLADOR 2x2	27
2.1.4. CONSTRUCCIÓN DEL MULTIPLEXOR/DEMULTIPLEXOR CON MZI	30
2.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MULTIPLEXOR/DEMULTIPLEXOR WDM CON FBG (FIBER BRAGG GRATING).....	35
2.2.1. FIBER BRAGG GRATING (FBG)	36
2.2.2. CIRCULADORES ÓPTICOS	43
2.2.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MUX/DEMUX BASADOS EN FBG Y CIRCULADORES	46
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48

3.1.	SOFTWARE OPTISYSTEM.....	48
3.1.1.	REQUERIMIENTOS Y PROCESO DE INSTALACIÓN	49
3.1.2.	DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX WDM CON SUS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS.....	50
3.2.	SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX CON INTERFERÓMETROS MACH- ZEHNDER.....	54
3.2.1.	MULTIPLEXOR Y DEMULTIPLEXOR CON INTERFERÓMETRO MACH-ZHENDER MZI EN OPTISYSTEM.....	54
3.2.2.	SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX CON MZI PARA 4 CANALES, VARIANDO EL ESPACIAMIENTO DE CANAL Y VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN.....	57
3.2.3.	SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX DE 8 CANALES CON MZI, VARIANDO EL ESPACIAMIENTO DE CANAL Y VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN.....	70
3.2.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MUX/DEMUX WDM CON MZI.....	82
3.3.	SIMULACIÓN DEL MUX/DEMUX WDM CON FILTROS FBG Y CIRCULADORES.....	83
3.3.1.	MULTIPLEXOR Y DEMULTIPLEXOR CON FILTROS FBG Y CIRCULADORES	84
3.3.2.	SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX CON FBG Y CIRCULADORES PARA 4 CANALES, VARIANDO EL ESPACIAMIENTO DE CANAL Y VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN	86
3.3.3.	SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX CON FBG Y CIRCULADORES PARA 8 CANALES, VARIANDO EL ESPACIAMIENTO DE CANAL Y VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN	99
3.3.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MUX/DEMUX WDM BASADO EN FBG Y CIRCULADORES.....	112
3.4.	SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX WDM DISPONIBLE EN OPTISYSTEM	114
3.4.1.	SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX WDM DISPONIBLE EN OPTISYSTEM PARA 4 CANALES, VARIANDO EL ESPACIAMIENTO DE CANAL Y VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN	117
3.5.	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS 3 TIPOS DE MUX/DEMUX WDM	128
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	142
4.1.	CONCLUSIONES.....	142
4.2.	RECOMENDACIONES	145
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147
	ANEXOS	150

ANEXO A. EJEMPLO DE LA GRILLA DE LONGITUDES DE ONDA PARA EL ESTÁNDAR DWDM	152
ANEXO B. GRILLA DE LONGITUDES DE ONDA PARA EL ESTÁNDAR CWDM	155
ANEXO C. EJEMPLO DE CÁLCULO DE DIFERENCIA DE RUTA ΔL PARA UN MUX WDM BASADO EN MZI	156
ANEXO D. RESPUESTA EN FRECUENCIA, DIAGRAMAS DE OJO Y DATOS RECOPIADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MUX/DEMUX WDM PARA 4 CANALES BASADO EN MZI PARA $\Delta f = 100 \text{ GHz}$ Y $V_{tx} = 4, 8, 12, 15 \text{ y } 20 \text{ Gbps}$	158
ANEXO E. RESPUESTA EN FRECUENCIA, DIAGRAMAS DE OJO Y DATOS RECOPIADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MUX/DEMUX WDM PARA 4 CANALES BASADO EN MZI PARA $\Delta f = 50 \text{ GHz}$ Y $V_{tx} = 4, 8, 12, 15 \text{ y } 20 \text{ Gbps}$	165
ANEXO F. RESPUESTA EN FRECUENCIA, DIAGRAMAS DE OJO Y DATOS RECOPIADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MUX/DEMUX WDM PARA 4 CANALES BASADO EN MZI PARA $\Delta f = 25 \text{ GHz}$ Y $V_{tx} = 4, 8, 12, \text{ y } 15 \text{ Gbps}$	172
ANEXO G. RESPUESTA EN FRECUENCIA, DIAGRAMAS DE OJO Y DATOS RECOPIADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MUX/DEMUX WDM PARA 8 CANALES BASADO EN MZI PARA $\Delta f = 100 \text{ GHz}$ Y $V_{tx} = 12, 15, 20 \text{ y } 25 \text{ Gbps}$	178
ANEXO H. RESPUESTA EN FRECUENCIA, DIAGRAMAS DE OJO Y DATOS RECOPIADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MUX/DEMUX WDM PARA 8 CANALES BASADO EN MZI PARA $\Delta f = 50 \text{ GHz}$ Y $V_{tx} = 8, 12, 15 \text{ y } 18 \text{ Gbps}$	186
ANEXO I. RESPUESTA EN FRECUENCIA, DIAGRAMAS DE OJO Y DATOS RECOPIADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MUX/DEMUX WDM PARA 8 CANALES BASADO EN MZI PARA $\Delta f = 25 \text{ GHz}$ Y $V_{tx} = 4, 6, 7 \text{ y } 8 \text{ Gbps}$	194
ANEXO J. DATASHEET DWDM FIBER BRAGG GRATINGS	202
ANEXO K. RESPUESTA EN FRECUENCIA, DIAGRAMAS DE OJO Y DATOS RECOPIADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MUX/DEMUX WDM CON 4 CANALES BASADO EN FBG Y CIRCULADORES PARA $\Delta f = 100 \text{ GHz}$ Y $V_{tx} = 4, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 \text{ y } 50 \text{ Gbps}$	205
ANEXO L. RESPUESTA EN FRECUENCIA, DIAGRAMAS DE OJO Y DATOS RECOPIADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MUX/DEMUX WDM CON 4 CANALES BASADO EN FBG Y CIRCULADORES PARA $\Delta f = 50 \text{ GHz}$ Y $V_{tx} = 4, 8, 10, 12, 15, 20 \text{ y } 25 \text{ Gbps}$	219
ANEXO M. RESPUESTA EN FRECUENCIA, DIAGRAMAS DE OJO Y DATOS RECOPIADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MUX/DEMUX WDM CON 4 CANALES BASADO EN FBG Y CIRCULADORES PARA $\Delta f = 25 \text{ GHz}$ Y $V_{tx} = 4, 8, 10, 12 \text{ y } 15 \text{ Gbps}$	228

ANEXO N. RESPUESTA EN FRECUENCIA, DIAGRAMAS DE OJO Y DATOS RECOPILADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MUX/DEMUX WDM PARA 8 CANALES BASADO EN FBG Y CIRCULADORES PARA $\Delta f = 100 \text{ GHz}$ Y $V_{tx} =$ 10, 15, 20,30,40 y 45 <i>Gbps</i>	235
ANEXO O. RESPUESTA EN FRECUENCIA, DIAGRAMAS DE OJO Y DATOS RECOPILADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MUX/DEMUX WDM PARA 8 CANALES BASADO EN FBG Y CIRCULADORES PARA $\Delta f = 50 \text{ GHz}$ Y $V_{tx} =$ 8, 12, 15 y 20 <i>Gbps</i>	243
ANEXO P. RESPUESTA EN FRECUENCIA, DIAGRAMAS DE OJO Y DATOS RECOPILADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MUX/DEMUX WDM PARA 8 CANALES BASADO EN FBG Y CIRCULADORES PARA $\Delta f = 25 \text{ GHz}$ Y $V_{tx} =$ 4, 8, 10 y 12 <i>Gbps</i>	249
ANEXO Q. TABLAS COMPARATIVAS DE BER Y Q PARA LAS 3 TECNOLOGÍAS MUX/DEMUX WDM PARA 4 CANALES	255
ANEXO R. TABLAS COMPARATIVAS DE BER Y FACTOR Q PARA LAS 3 TECNOLOGÍAS MUX/DEMUX WDM PARA 8 CANALES	259

RESUMEN

El presente trabajo de titulación compara el comportamiento de los MUX/DEMUX WDM implementados con: MZI (*Mach-Zehnder interferometer*), FBG (*Fiber-Bragg Grating*) con circuladores y el dispositivo mux/demux que se encuentra disponible en OptiSystem. El proyecto técnico plantea distintos escenarios para determinar qué MUX/DEMUX WDM obtiene un mejor desempeño.

En el primer capítulo se desarrolla una introducción a los sistemas de comunicaciones ópticas y de la multiplexación y demultiplexación por división de longitud de onda. Además, se mencionan algunas tecnologías para construir componentes que multiplexan y demultiplexan longitudes de onda.

En el segundo capítulo se hace un estudio teórico de los componentes MUX/DEMUX WDM para las tecnologías basadas en FBG con circuladores y MZI. Se realiza una descripción de los fenómenos físicos de cada tipo de tecnología y se presenta la configuración y elementos para construir los mismos.

En el tercer capítulo se presentan las simulaciones realizadas de los MUX/DEMUX WDM con las dos tecnologías construidas en el segundo capítulo y la disponible en OptiSystem; estas simulaciones se realizan en diferentes escenarios variando parámetros como la velocidad de transmisión, espaciamiento de canal y número de canales WDM. Se hace un análisis de los resultados obtenidos y se lleva a cabo una comparación entre las dos tecnologías construidas y la disponible en OptiSystem, se comparan diferentes parámetros que definen el comportamiento de cada una, tales como: Factor Q, BER, respuesta en frecuencia, OSNR y diagramas de ojo.

Finalmente, en el capítulo cuatro se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo de titulación realizado.

PALABRAS CLAVE: Circuladores, FBG, MZI, MUX/DEMUX, OptiSystem, Simulación, WDM.

ABSTRACT

The present titration work compares the performance of MUX/DEMUX WDM implemented with: MZI (Mach-Zehnder interferometer), FBG (Fiber-Bragg Grating) with circulators and the mux/demux device available from OptiSystem. The technical project poses different scenarios to determine which MUX/DEMUX WDM performs best.

The first chapter provides an introduction to optical communications systems and wavelength division multiplexing and demultiplexing. In addition, some technologies to build components that multiplex and demultiplex wavelengths are mentioned.

In the second chapter, a theoretical study of the MUX/DEMUX WDM components for FBG-based technologies with circulators and MZI is made. A description of the physical phenomena of each type of technology is made and the configuration and elements to build them are presented.

The third chapter presents the simulations performed of the MUX/DEMUX WDM with the two technologies built in the second chapter and the one available in OptiSystem; these simulations are performed in different scenarios varying parameters such as transmission speed, channel spacing and number of WDM channels. An analysis of the results obtained is made and a comparison between the two technologies built and the one available in OptiSystem is carried out, comparing different parameters that define the behavior of each one, such as: Q factor, BER, frequency response, OSNR and eye diagrams.

Finally, chapter four presents the conclusions and recommendations of the degree work carried out.

KEYWORDS: Circulators, FBG, MZI, MUX/DEMUX, OptiSystem, Simulation, WDM

1. INTRODUCCIÓN

La industria de las telecomunicaciones y en especial las comunicaciones ópticas han experimentado un crecimiento rápido desde finales de los años 90 [1, p. 3]. Los avances asistieron a cambios drásticos que tienen implicaciones de gran alcance. Existen muchos factores que han impulsado estos cambios, uno de los más importantes es la continua necesidad de aumentar la capacidad de las redes [2, p. 1]. Actualmente se tienen increíbles progresos que influyen en el desarrollo de las comunicaciones ópticas y estas se lograron gracias a cuatro hitos: la invención del láser en los años 50, el desarrollo de la fibra óptica de bajas pérdidas en los años 70, la invención del amplificador EDFA en la década de 1980 y el último, la invención de la rejilla de difracción de Bragg en la década de 1990 [3, p. 1].

A partir de la década de 1990 y de las necesidades comerciales de Internet, surge un desafío para los proveedores de servicios al tener que transportar más tráfico, se desarrollaron tecnologías que han servido para superar las expectativas de ancho de banda y cumplir con las demandas de la sociedad de la información. Surgen tecnologías como WDM, un esquema de multiplexación de división por longitud de onda que permite incrementar la capacidad del sistema considerablemente, llevando por el mismo hilo de fibra diferentes canales de información.

La multiplexación por división de longitud de onda (WDM, *Wavelength División Multiplexing*) es una tecnología que utiliza métodos ópticos para combinar los canales dentro de la fibra para que en recepción puedan ser extraídos [4, p. 71]. WDM utiliza multiplexores para unir los canales ópticos y demultiplexores para separar los mismos.

Los multiplexores y demultiplexores cumplen el rol más importante en los sistemas WDM al incrementar la capacidad de estos en términos de ancho de banda. En el presente trabajo de titulación se realiza un estudio técnico donde se compara el comportamiento de tres tipos de multiplexores y demultiplexores WDM, aquellos implementados a partir de filtros basados en rejillas de difracción de Bragg (FBG, *Fiber-Bragg Grating*) con circuladores, los basados en interferómetros Mach Zehnder (MZI) y los que están disponibles en el software de simulación OptiSystem. Se efectuará un análisis con diferentes escenarios para determinar en qué condiciones los diferentes multiplexores y demultiplexores obtienen los mejores resultados.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es: Analizar técnicamente y comparar el comportamiento de los multiplexores y demultiplexores WDM implementados con elementos pasivos y filtros disponibles en OptiSystem con los bloques MUX/DEMUX WDM del software, mediante simulación.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Realizar un estudio técnico del funcionamiento de los multiplexores y demultiplexores WDM, parámetros técnicos, características principales y su comportamiento.
- Simular sistemas de comunicaciones ópticas de alto desempeño donde se comparen los multiplexores y demultiplexores WDM implementados en el software de simulación en diferentes escenarios para evaluar su comportamiento.
- Identificar las ventajas y desventajas de las diferentes implementaciones de multiplexores y demultiplexores, tanto los construidos con elementos pasivos como los ya disponibles en OptiSystem en los distintos escenarios de aplicación.
- Comparar los resultados obtenidos en las simulaciones con la teoría del funcionamiento y comportamiento de cada bloque multiplexor y demultiplexor WDM.

1.2 ALCANCE

En el trabajo de titulación se realizará un estudio bibliográfico detallado de los multiplexores y demultiplexores desde el punto de vista técnico, estos serán implementados en el software de simulación OptiSystem, centrándose en dos tecnologías: una configuración de interferómetros Mach Zehnder (MZI) y otra de filtros FBG con circuladores, mismos elementos que ya se encuentran modelados dentro del software de simulación y serán utilizados para la construcción de los dos MUX/DEMUX WDM.

Luego de detallar el funcionamiento a partir de la teoría, se contrastará mediante simulación el comportamiento de los MUX/DEMUX WDM implementados con MZI, filtros FBG con circuladores y el bloque MUX/DEMUX WDM que se encuentra disponible en el software de simulación, esto se obtendrá al variar parámetros como: velocidad de transmisión, frecuencia central, espaciamiento de canal (basándonos en el estándar WDM ITU-T G.694.1) y número de canales.

Para propósitos de realizar el análisis técnico comparativo de los diferentes MUX/DEMUX considerados, se evaluará y comparará parámetros tales como BER, OSNR, Factor de calidad Q, respuesta en frecuencia y diagrama de ojo, mediante los cuales se evidenciará el comportamiento de cada uno de los multiplexores y demultiplexores. Los resultados serán contrastados con el estudio teórico para así encontrar resultados que validen las simulaciones, de modo que se llegue a conclusiones sobre el comportamiento de dichos bloques multiplexores y demultiplexores WDM.

En este trabajo no se incluyen todos los posibles multiplexores y demultiplexores que se pueden implementar con los diferentes filtros y otros dispositivos, sino que se centrará y enfocará en los indicado anteriormente. Además, este proyecto de titulación no cuenta con un producto final demostrable, ya que se enfoca en un análisis técnico mediante simulación de los multiplexores y demultiplexores WDM.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 BREVE HISTORIA DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS

Para comprender el rotundo avance de las comunicaciones ópticas es importante realizar una revisión histórica, en la que se destaque los principales avances en este campo.

Las nuevas tecnologías en comunicaciones ópticas han sido impulsadas en gran parte por el desarrollo del láser y la fibra óptica que han revolucionado la forma de transmitir datos. [5, p. 3]. El primer indicio de transmisión de datos nace por parte de Claude Chappe en 1792, año en el que transmitió mecánicamente mensajes codificados a largas distancias mediante el uso de estaciones retransmisoras que actuaban como repetidores, fue considerado como el primer sistema de comunicación óptica.

En 1880, Alexander Graham Bell patentó el fonógrafo, un dispositivo telefónico óptico para la transmisión de voz mediante un haz de luz [6, p. 3]. En el año de 1920 se realizó un experimento en conjunto con laboratorios Bell, J. L. Baird de Inglaterra y C. W. Hansell de EE. UU, que consistía en retransmitir imágenes de televisión utilizando un conjunto de fibras sin manto.

En 1960, Theodore Maiman de los laboratorios Hughes logró desarrollar el primer láser, que sería el elemento clave de transmisión dentro de un sistema de comunicaciones óptica, al funcionar a frecuencias mucho más altas prometía una capacidad de transmisión mucho mayor [5, p. 10][7, p. 6].

Al partir de la creación del láser surgen diferentes investigaciones acerca de una guía de onda que transporte la luz. Un equipo de STL (*Standard Telecommunication Laboratories*)

empezó una investigación sobre la fibra óptica, impulsando a la experimentación de núcleos de fibra con diferentes materiales para tener pérdidas de tan solo 10 dB/Km [8, p. 110-115].

En 1970 en una innovación revolucionaria los científicos de Corning Maurer, Keck y Schultz desarrollaron la primera fibra monomodo de sílice fundida a una longitud de onda de 633 nm con una atenuación menor a 20 dB/Km, dando paso a la comunicación por fibra óptica e iniciando su despliegue comercial a través del mundo [8, p. 139].

1.3.1.1 AVANCE DE LA COMUNICACIÓN POR FIBRA ÓPTICA

Los sistemas de comunicación por fibra óptica tuvieron un significativo avance desde la década de 1970, en la cual la fase de investigación generó enormes progresos. La primera generación de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica inicio en la década de 1970 con los primeros sistemas comerciales, los cuales tenían una atenuación menor a 3 dB/Km en la que utilizaban Leds infrarrojos de Arseniuro de Galio (GaAs) con una longitud de onda cercana a los 850 nm [6, p. 3]. Estos sistemas proporcionaron una velocidad de transmisión de datos de entre 10 Mbps y 45 Mbps a una distancia entre repetidores de 10 Km. Estos sistemas podían ser mejorados si utilizaban longitudes de onda de entre 1300 nm en la cual la atenuación era inferior a 1 dB/Km y presentaban una dispersión mínima [9, p. 5], lo cual condujo a que las investigaciones se enfoquen en láseres que operen en aquella ventana de transmisión.

La segunda generación estuvo disponible a partir de 1980, la misma que se basó en sistemas que operan en la región de longitud de onda de 1300 nm, con pérdidas menores a 1 dB/Km, esto se logró gracias al desarrollo del láser semiconductor de Fosforo de Arseniuro de Indio y Galio (InGaAs) y el uso de fibras monomodo que reducen el tamaño del núcleo, minimizando la dispersión modal presentes en las fibras multimodo usadas en la anterior generación. A partir de 1987 se tenían sistemas de comunicaciones por fibra óptica que alcanzaban velocidades de 1.7 Gbps y una distancia entre repetidores de 50 Km.

La tercera generación surge a partir de una serie de problemas superados, en primer lugar, la gran dispersión cromática en la región de 1550 nm y la otra las limitaciones del láser de InGaAs debido a la dispersión del pulso que se producía como resultado de la oscilación simultánea de varios modos.

Los problemas mencionados se ven superados cuando se diseñan fibras de dispersión desplazadas, en las cuales la dispersión a 1550 nm es mínima y se diseñan láseres monomodo limitando el espectro [9, p. 6]. A esta longitud de onda se obtuvieron

atenuaciones teóricas de 0.2 dB/Km, ofreciendo velocidades de 2.4 Gbps con distancias de repetición de 100 Km [6 , p. 3].

En esta generación se mejoran las técnicas de detección en la recepción, aumentando la sensibilidad de los receptores utilizando sistemas coherentes, incrementando la distancia de separación entre repetidores. En 1990 se obtuvieron sistemas de tercera generación con una capacidad de operar hasta una tasa de bits de 10 Gbps.

La cuarta generación inicia con la llegada de WDM para aumentar la velocidad de datos y de los métodos de amplificación óptica para incrementar las distancias entre repetidores. WDM inició una evolución en términos de velocidad ya que duplicó la velocidad de datos cada 6 meses [6, p. 3]. Las pérdidas entre enlaces de larga distancia principalmente fueron compensadas periódicamente por amplificadores de fibra dopada con Erblio (EDFA, *Erbium-Doped Fiber Amplifier*) que trabajan en la región espectral que va de 1450 a 1620 nm, esto permitió que los enlaces transatlánticos evitarán la conversión electroóptica y con eso reducir significativamente los costos.

En los años de 1998 y 2001 ya existía una red global que cubría 250 000 Km de fibra óptica alrededor del mundo como compensación al aumento del tráfico a nivel mundial, esta tenía una capacidad de 2.56 Tbps con 64 canales WDM a 10 Gbps sobre 4 pares de fibra [9, p. 7].

La quinta generación de los sistemas de comunicación por fibra óptica se ocupó de ampliar la gama de longitudes de onda en la que un sistema WDM puede funcionar simultáneamente. La banda de operación se amplía a la L y S, además de la C que cubre las longitudes de onda de entre 1530 a 1570 nm. La utilización de las nuevas bandas se debe al desarrollo de la técnica de amplificación de Raman y el diseño de fibras desplazadas no nulas (NZDSF, *Non Zero Dispersion Shifted Fiber*) [10, p. 7], lo que permitió utilizar la región de longitudes de onda de 1300 a 1650 nm para el funcionamiento simultáneo de miles de canales WDM a una velocidad de hasta 160 Gbps por canal.

1.3.2 SISTEMA DE COMUNICACIONES POR FIBRA ÓPTICA

Los sistemas de comunicaciones por fibra óptica basan su diseño en un transmisor, un canal de comunicaciones constituido de fibra óptica y un receptor. A continuación, se hace una revisión general acerca de estos elementos y de la fibra óptica.

1.3.2.1 Conceptos básicos de la fibra óptica

El principio de funcionamiento de la fibra óptica se debe a que las ondas de luz se propagan a través de un medio compuesto por un material transparente como vidrio o plástico con

características que permiten la reflexión interna total, con la cual la luz se propaga de forma adecuada como en una guía de onda [6 , p. 60].

La fibra óptica está compuesta de un núcleo y manto, en la que el índice de refracción del núcleo es relativamente superior al del manto, en donde el haz de luz se lanza a la fibra y es guiada mediante un fenómeno llamado reflexión interna total. El rayo de luz incidente se refleja en la interfaz núcleo-manto con un ángulo superior al ángulo crítico (cuando el ángulo de refracción es 90°) para asegurar que el haz de luz quede contenido en el núcleo de la fibra. Si el ángulo de incidencia es menor al ángulo crítico la luz se refractará al manto por lo que no cumplirá con el principio de propagación de reflexión interna total [6, p. 47].

La fibra óptica puede clasificarse por el tipo de perfil de índice de refracción con el cual está diseñado el núcleo. Existen diferentes tipos de perfiles estos pueden ser gradual, escalonado o en W. Se crearon las fibras ópticas con diferentes perfiles de índice de refracción para mejorar la calidad de los enlaces, alcanzar mayores distancias y sobre todo disminuir los efectos de la dispersión.

La fibra óptica al actuar como una guía de onda solo puede propagar un número de modos específico, esto debido a que no todos los modos cumplen con el principio de reflexión interna total. Si el diámetro del núcleo de la fibra es suficientemente estrecho, entonces puede soportar un solo modo de propagación de la luz, estas fibras son conocidas como monomodo. Si el diámetro de las fibras son lo suficientemente grande, la luz que ingresa con diferentes ángulos excitará diferentes modos de propagación, estas fibras se denominan multimodo [6, pp. 59-63].

1.3.2.1.1 Dispersión en la fibra Óptica

La dispersión es un fenómeno que ocurre cuando el pulso óptico incrementa su anchura a medida que avanza en la fibra. La dispersión ocurre debido a la diferencia en el tiempo que le toma a los diferentes rayos de luz que atraviesan diferentes rutas de propagación, si estos son lo suficientemente grandes pueden interferir con los otros pulsos e interferirse uno con otro [6, p. 73].

Las fibras multimodo principalmente sufren de dispersión modal debido a los varios modos que se propagan, este tipo de fibra se usa en enlaces de cortas distancias debido a la interferencia que se generan entre pulsos.

Las fibras monomodo sufren de dispersión cromática que puede ser de guía de onda y de material. La dispersión cromática de material se produce debido a que cada longitud de onda percibe diferente índice de refracción y viaja entonces a diferente velocidad; y, la

dispersión cromática de guía de onda se da porque una parte de la potencia óptica viaja por el manto de la fibra y no totalmente confinada en el núcleo, lo que provoca la dispersión del pulso debido a la diferencia de índices de refracción. Las fibras monomodo también pueden ser afectadas por la dispersión por modo de polarización, debido a que las señales ópticas ocupan dos estados de polarización ortogonales, tomando en cuenta que la fabricación de la fibra no es totalmente perfecta, las componentes ortogonales sufren retardos diferentes debido a que cada modo ve índices de refracción distintos en consecuencia el pulso tiende a ensancharse y aumenta el BER (*Bit error rate*) [13, p. 115].

1.3.2.1.2 Atenuación en la fibra óptica

La fibra óptica sufre diferentes pérdidas que causan la degradación de la señal, estas pueden ser causadas por absorción de material que se da por la composición de esta que dependerá de los niveles energéticos y por el proceso de fabricación de la fibra. La absorción intrínseca es originada por interacción de uno o más compones básicos del vidrio desembocando en pérdidas ultravioleta e infrarrojas. La absorción extrínseca se origina por las impurezas de vidrio y por los iones de hidroxilo. Las pérdidas por dispersión de Rayleigh son causadas por irregularidades submicroscópicas, que produce cambios en el índice de refracción como resultado de las técnicas de fabricación lo que ocasiona difracción y que cierta parte de la luz se dirija al manto lo que representa pérdidas. Las fibras también sufren pérdidas debido a la curvaturas producidas por la manipulación de las mismas y microcurvaturas debido a las irregularidades núcleo-manto resultado de la fabricación de la fibra no ideal [13, pp. 103-113]. En la figura 1.1 se presentan las diferentes pérdidas presentes en una fibra óptica.

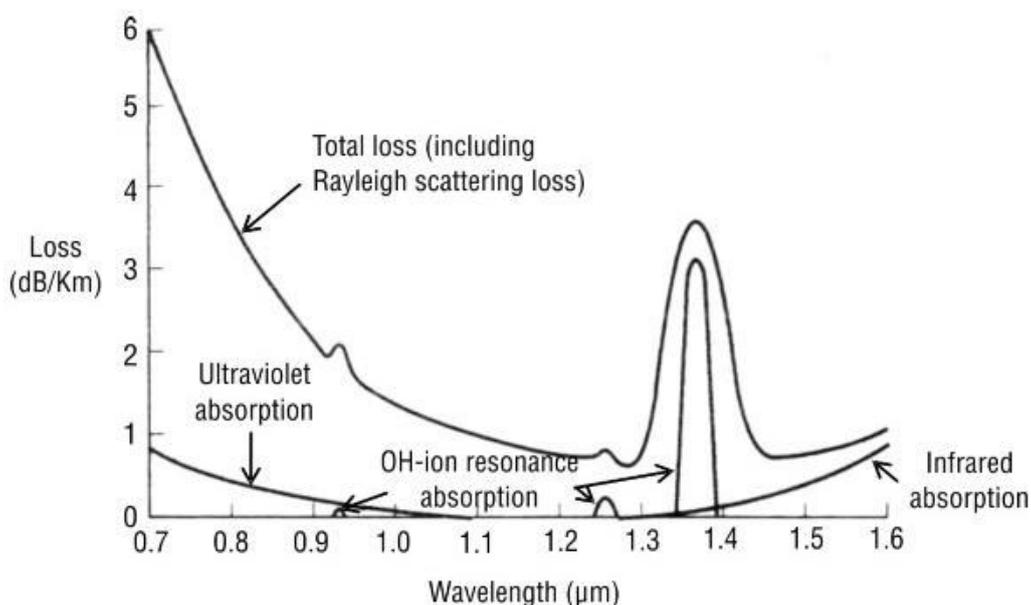


Figura 1.1. Pérdidas en la fibra óptica [6, p. 98].

1.3.2.1.3 Bandas de transmisión

Dentro de las comunicaciones ópticas se tienen varias bandas o ventanas para transmitir por fibra óptica. La UIT-T dividió las comunicaciones por fibra óptica en 6 bandas O, E, S, C, L y U. Cada banda tiene sus propias características y su uso puede ser variado dependiendo de su aplicación y pérdidas que presenta. En la tabla 1.1 se puede apreciar las distintas bandas usadas actualmente en transmisiones por fibra óptica.

Tabla 1.1. Bandas de transmisión en fibra óptica [2, p. 37].

Banda	Ventana	Descripción	Rango de longitud de onda (nm)
Banda-O	Segunda	Original	1260 a 1360
Banda-E	Quinta	Extendida (Extended)	1360 a 1460
Banda-S	--	Corta (Short)	1460 a 1530
Banda-C	Tercera	Convencional (Conventional)	1530 a 1565
Banda-L	Cuarta	Larga (Long)	1565 a 1625
Banda-U	--	Ultra-Larga (Ultra-Long)	1625 a 1625

1.3.2.2 Transmisor y Receptor Óptico

1.3.2.2.1 Conceptos Básicos de un transmisor

Un transmisor óptico es un dispositivo encargado de convertir una señal eléctrica en señal óptica y adecuarla para enviarla a través la fibra óptica. En el diagrama de bloques de la figura 1.2 se puede observar que un transmisor óptico está formado por una fuente óptica, un controlador, un modulador alimentado por una señal eléctrica y un acoplador de canal.

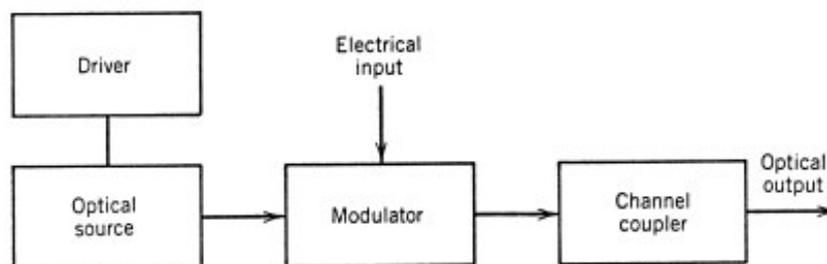


Figura 1.2. Componentes de un transmisor óptico [9, p. 17]

La fuente óptica es el elemento principal de un transmisor óptico, su rol es convertir de manera eficiente la energía eléctrica en energía óptica (un pulso de luz). Existen dos tipos principales de fuentes ópticas que se usan con más frecuencia, LED (*Light-Emitting Diode*) y LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Las fuentes LED pueden proporcionar unos pocos mW de potencia mientras que algunos láseres pueden brindar unos pocos watts de potencia [6, p. 161].

El controlador (Driver) brinda energía eléctrica a la fuente óptica y modula la salida de luz dependiendo de la señal que será transmitida. Los circuitos controladores pueden ser sencillos para el uso de LEDs, sin embargo, su complejidad aumenta con transmisores ópticos de altas velocidades como los láseres. A menudo se emplea un refrigerador termoeléctrico que ayuda a proporcionar estabilidad a la temperatura de funcionamiento de la fuente óptica [9, p. 121].

El modulador óptico modifica la portadora emitida por la fuente de luz para añadir la información en la señal que será transmitida. Existen dos tipos de modulación, que dependiendo de si el modulador controla la corriente que se inyecta a la fuente óptica será modulación directa o si el modulador cambia características de un flujo constante de luz generado por la fuente óptica se tratará de modulación externa [10, p. 15].

1.3.2.2.2 Light-Emitting Diodes (LEDs)

Los LEDs son dispositivos semiconductores de unión diseñados para producir luz cuando se los utiliza en polarización directa. La luz producida por los LEDs se compone por varios modos o colores, razón por la cual se considera como fuente óptica de gran espectro para trabajar a bajas velocidades de transmisión en comunicaciones por fibra óptica [6, p. 137]. Están basados en la emisión espontánea y emiten luz de forma incoherente ya que todos los modos son propagados en varias direcciones aleatorias.

Dentro de las estructuras de LEDs más utilizadas están: ELED (*Edge Emitting LED*), la luz que es emitida por el ELED tiene salida por el borde de la estructura que se acopla directamente a la fibra óptica. SLED (*Burrus Type Surface Emitting LED*), la zona emisora está definida por un área circular pequeña donde se originan los fotones que posteriormente serán guiados a través del medio [6, p. 139].

1.3.2.2.3 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)

A diferencia del LED los Láseres están basados en la emisión estimulada y emiten luz de forma coherente, es decir propagan la luz en una sola dirección. En términos de velocidad de transmisión presenta un rendimiento mucho mejor que los LEDs. Sin embargo es dependiente de la temperatura, los circuitos de accionamiento son muy complejos, además de tener un elevado costo [6, p. 147].

Exista una amplia clasificación de los tipos de láseres tales como: Fabry Perot, es el más común del láser y está conformado por espejos reflectores a los extremos de la guía denominados cavidad Fabry Perot que permite la emisión parcial de luz, donde el resto de la luz es reflejada y amplificada en longitudes de onda específicas dentro de la cavidad, debido al gran trabajo que realiza su tiempo de vida media no es muy extenso. Otro tipo de

láser es el VCSEL (*Vertical Cavity Surface Emitting Laser*), que también está conformado por superficies reflectantes, pero en la parte superior e inferior de la capa activa. Como su nombre lo indica emiten luz desde una superficie vertical, obteniendo una superficie de emisión mayor que el láser Fabry Perot, además de consumir menos potencia y por lo tanto presentan un tiempo de vida mayor. Por otro lado, también existen los láseres DFB (*Distributed FeedBack Laser*) y DBR (*Distributed Bragg Reflection Laser*), estos tipos de láseres son monomodo y presentan una rejilla de difracción ubicada debajo de la zona activa para determinar la longitud de onda de emisión, en el caso de los DFB y a un extremo o ambos de la zona activa en un DBR. En este tipos de láseres se puede obtener anchuras espectrales de 0.1 nm o menores, sin embargo son muy susceptibles a los cambios de temperatura, requiriendo un control muy estricto de este parámetro [6, pp. 149-158].

1.3.2.2.4 Conceptos Básicos de un Receptor

La función que realiza un receptor óptico es totalmente contraria a la de un transmisor óptico, ya que se encarga de recibir la señal óptica en el extremo de salida de la fibra y convertirla en la señal eléctrica original. Básicamente un receptor óptico está formado por un acoplador, un fotodetector y un demodulador, tal y como se muestra en la figura 1.3.

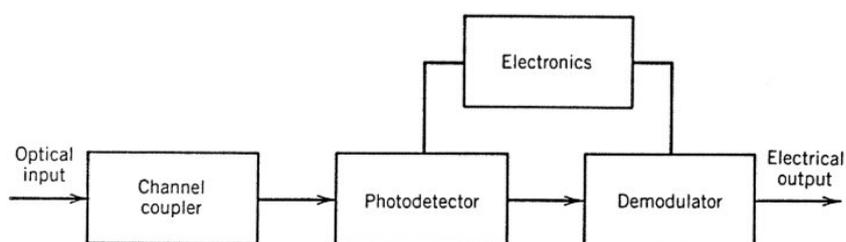


Figura 1.3. Componentes de un receptor óptico [9, p. 18].

El acoplador se encarga de enfocar la señal óptica hacia el fotodetector. Por otro lado el fotodetector convierte la señal óptica recibida en su señal eléctrica equivalente haciendo uso del efecto fotoeléctrico [6, p. 178]. El demodulador se encarga de obtener el flujo de bits que se transmitió originalmente, demodulando la señal que se recibe en el receptor óptico. En gran parte de los sistemas de comunicación óptica se utiliza un esquema de modulación de intensidad con detección directa, la demodulación se hace a partir de un circuito de detección que identifica 1 o 0 dependiendo de la amplitud de la señal [9, p. 18].

1.3.2.2.5 Detectores PIN y APD

Los fotodetectores semiconductores utilizados en un sistema de comunicaciones ópticas son el PIN (*P-intrinsic-N*) y el APD (*Avalanche Photo Diode*) respectivamente.

Dentro de las ventajas del fotodetector PIN es que permite el funcionamiento a frecuencias de modulación relativamente altas, además de tener una mayor eficiencia cuántica, una alta eficiencia de potencia y una alta eficiencia de ancho de banda, razones por las cuales el PIN es muy utilizado en comunicaciones por fibra óptica [6, pp, 180-190].

El APD puede alcanzar un valor mucho mayor de capacidad de respuesta porque son diseñados para ofrecer una ganancia de corriente interna. Los APD se utilizan cuando la cantidad de potencia óptica disponible es limitada a la entrada de un receptor óptico.

1.3.2.3 Amplificador Óptico

Los sistemas de comunicaciones ópticas y principalmente los sistemas que utilizan multiplexación por división de longitud de onda están limitados por pérdidas en la fibra óptica. A continuación, se realiza una breve introducción acerca de los amplificadores ópticos.

Los amplificadores ópticos son dispositivos muy utilizados en los sistemas de comunicaciones ópticas ya que se encargan de amplificar la señal óptica generada por un transmisor óptico. Con la amplificación las señales ópticas mejoran la relación señal al ruido y por ende la tasa de errores de bit (BER, *Bit Error Rate*), lo que permite anchos de banda muy grandes y distancias de miles de kilómetros [9, p. 226]. Existen diferentes tipos de amplificadores que operan en las diferentes bandas de frecuencias, a continuación, se presenta algunos amplificadores ópticos.

Los amplificadores ópticos de semiconductor (SOA) son en sí un láser especial, pues tienen una similitud con las cavidades resonantes donde tienen una región activa y en sus extremos reflectores lo que permite que la señal óptica pase por la cavidad de amplificación [6, p. 238]. Basándose en la estructura, existen dos tipos de amplificador de semiconductor que son: amplificador de láser Fabry-Perot (FPLA) y amplificador de láser semiconductor de onda viajera (TWSLA).

Los amplificadores de fibra dopada de Erblio son amplificadores que operan en banda C y actualmente en la banda L, donde la fibra óptica tiene las menores pérdidas. El amplificador se basa en la emisión estimulada en donde un láser de bombeo produce una señal óptica a una longitud de onda de 980 y 1480 nm a alta potencia.

Los EDFA disponen de ciertas características que han ido mejorando con el paso del tiempo, una de estas es que ofrece excelentes ganancias con valores de hasta 50 dB y una sensibilidad inferior a -27 dBm. Además, el EDFA puede amplificar en un rango de longitudes de onda muy amplia, pero presenta una desventaja debido al tipo emisión ya

que añade ruido al enlace, este se acumula y debe contrarrestarse para no degradar el OSNR. Los EDFA tienen una figura de ruido cercanos a 5 dB lo que hace que el OSNR no se vea afectado de manera significativa [14, pp. 290-293].

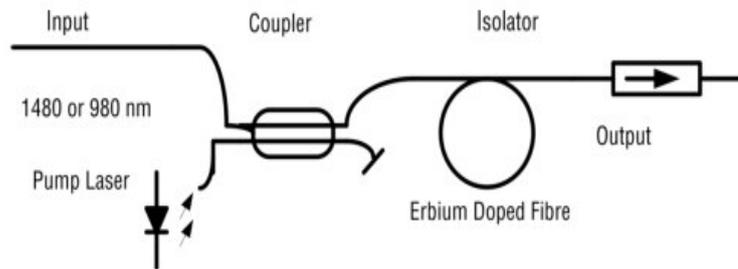


FIGURA 1.4. Esquema básico de un amplificador EDFA [6, p. 251].

El amplificador Raman se basa en el efecto no lineal de dispersión estimulada de Raman (SRS, *Stimulated Raman Scattering*), esto ocurre cuando una señal de alta potencia o señal de bombeo se propaga a través de la fibra donde se produce la dispersión estimulada de Raman (SRS, *Stimulated Raman Scattering*), lo que provoca que los fotones incidente de la señal óptica de bombeo cedan una parte de energía para crear otros de menor energía a una frecuencia inferior [12, p. 282].

A continuación, se presenta el espectro donde operan los diferentes tipos de amplificadores y la tabla 1.2 con las bandas de frecuencia.

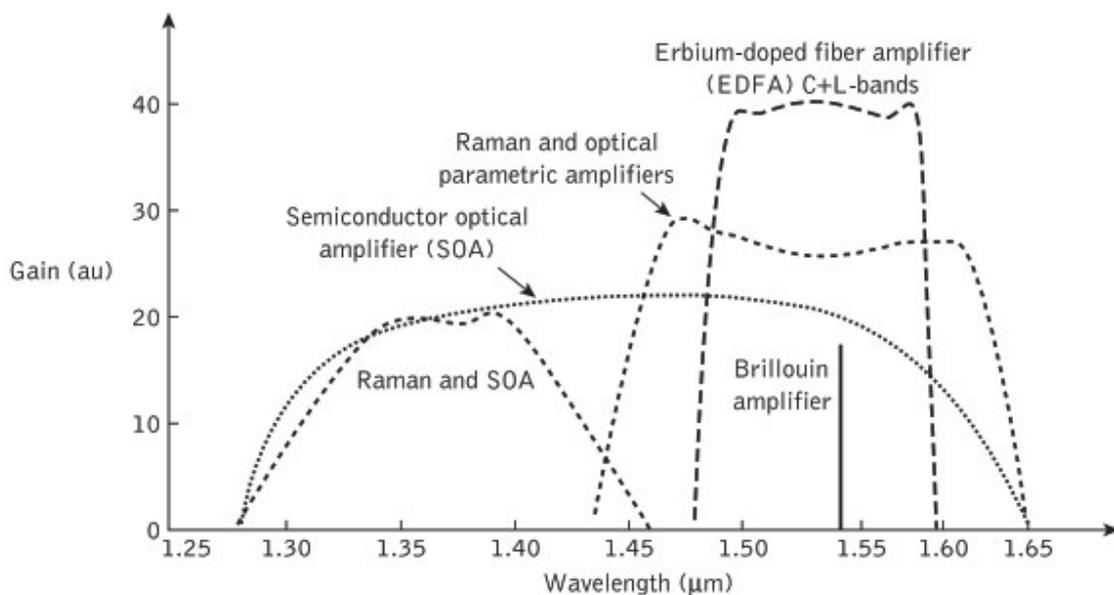


FIGURA 1.5. Características de ganancia de ancho de banda de los diferentes amplificadores ópticos [11, p. 551].

Tabla 1.2. Región de funcionamiento de los amplificadores ópticos

Acrónimo	Estructura	Banda de Operación
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	Banda O y C
RFA	Raman Fiber amplifier	1260 a 1650 nm
EDFA	Erbium-doped fiber amplifier	Banda C y L

1.3.3 WAVELENGTH DIVISIÓN MULTIPLEXING (WDM)

1.3.3.1 Principio de operación de WDM

WDM es una tecnología utilizada para combinar o separar dos o más longitudes de onda de diferente longitud de onda central. Permite ampliar el número de canales y aumentar la capacidad del sistema. La asignación de la longitud de onda central, el número de canales y el espaciamiento entre estos, están documentados por estándares internacionales definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T), las señales se transmiten con una intensidad total baja para evitar efectos no lineales en la fibra como mezcla de cuatro ondas (FWM, *Four wave mixing*) o la dispersión estimulada de Brillouin (SBS, *Stimulated Brillouin Scattering*). Las señales se combinan mediante un multiplexor WDM y se propagan por la fibra óptica. En el otro extremo de la fibra las señales se separan con un demultiplexor WDM [13, p. 377].

Los sistemas WDM operan con dispositivos pasivos y activos para distribuir, aislar y amplificar la potencia óptica en diferentes longitudes de onda, estas bandas van desde las longitudes de onda de la banda O hasta la S [14, p. 167]. En la figura 1.6 se muestra un esquema básico WDM.

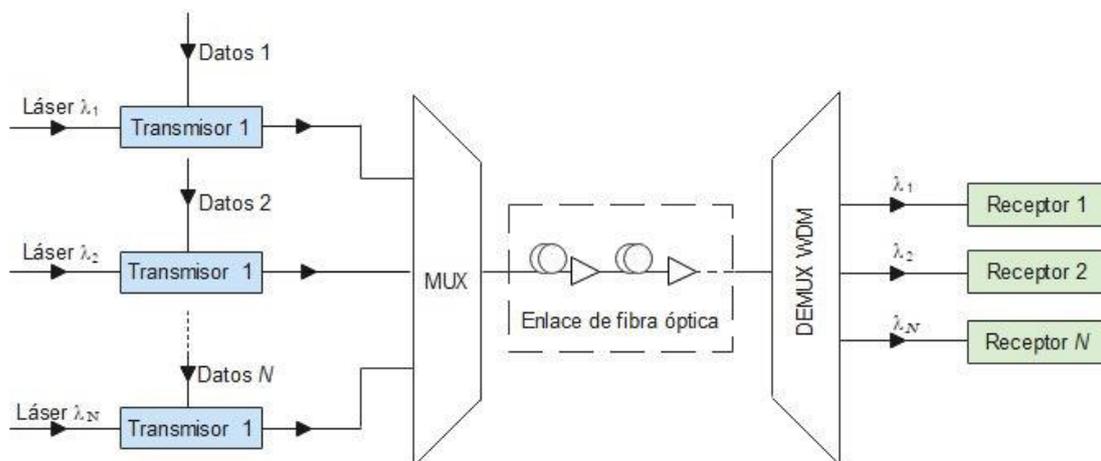


FIGURA 1.6. Esquema básico WDM de un enlace punto a punto: MUX=multiplexor, DEMUX= demultiplexor.

Las regiones operativas abarcan varias bandas desde la banda O hasta la S, la cual se determina en términos de anchura espectral. En estas existen bandas de guarda entre longitudes de onda, este espaciamiento es necesario para evitar efectos no lineales y posibles interferencias entre canales WDM. La relación para definir la separación entre longitudes de onda adyacentes está descrita en la ecuación 1.1.

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta f \cdot \lambda^2}{c} \quad (1.1)$$

Donde Δf es la desviación en frecuencia correspondiente a la desviación de la longitud de onda $\Delta\lambda$ en torno a longitud de onda central (λ) [13, p. 378], [6, p. 321].

1.3.3.2 Estándares WDM

Las tecnologías WDM pueden clasificarse en tres grupos específicos: DWDM (*Dense Wavelength División Multiplexing*), CWDM (*Coarse Wavelength División Multiplexing*) y banda cruzada que han sido especificadas en varias recomendaciones por la UIT-T.

1.3.3.2.1 DWDM (*Dense Wavelength División Multiplexing*)

DWDM dispone de un plan de frecuencias para aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda densa publicado por la UIT-T en la recomendación G.694.1. El plan de frecuencias toma como frecuencia central inicial la de 193.1 THz o 1552.524 nm y soporta diversos espaciamientos de canal que van desde los 12.5 GHz a 100 GHz y espaciamientos mayores con múltiplos de 100 GHz hasta 1000 GHz [15, p. 1].

UIT-T ha designado una grilla de frecuencias centrales con espaciado de 200 (1.6 nm), 100 (0.8 nm), 50 (0.4 nm), 25 (0.2 nm) y 12.5 GHz (0.1 nm). La separación de canales menores a 12.5 GHz se denomina Ultra-DWDM (UDWDM). Para calcular la frecuencia central de cualquier canal DWDM basta con multiplicar por un número entero n el espaciamiento de canal Δf en Tera hercios (THz) y sumarle a la frecuencia central inicial de 193.1 THz como en el ecuación 1.2 [14, p. 184].

$$f_c = 193.10 + n \cdot \Delta f \quad (1.2)$$

Donde f_c es la frecuencia central de la grilla de frecuencias DWDM en THz.

La UIT-T en su documento especifica las separaciones de longitud de onda en las bandas S, C y L para servicios de red metropolitana (MAN) y de red de área amplia (WAN) de alta calidad y velocidad [13, p. 379]. En el anexo A en la tabla A.1 se da un ejemplo de las recomendaciones especificadas por la UIT-T.

UDWDM (*Ultra Dense Wavelength División Multiplexing*) es un plan de frecuencia que utiliza espaciamientos de canales menores a DWDM los cuales están entre 2.5, 5 y 12.5

GHz lo cual permite una densidad de canales más alta. UDWDM es capaz de transmitir hasta 1022 canales por un mismo hilo de fibra con velocidades de hasta 10 Gbps por canal, lo que teóricamente se obtiene una capacidad superior a 1 Tbps. Esta técnica se usa en redes de Acceso PON (Red Óptica Pasiva, *Passive Optical Network*) como para enlaces a nivel internacional de largas distancias.

1.3.3.2.2 CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)

WDM grueso (*coarse*) es un estándar que surge en el año 2002, publicado en la recomendación G.694.2 de la UIT-T. La rejilla de CWDM se compone de 18 longitudes de onda definidas a lo largo del rango de 1270 nm a 1610 nm en las bandas O a la L. El espaciamiento de canal es de 20 nm. En el año 2004 se publica las recomendaciones G.695 que describe las especificaciones de la interfaz óptica para CWDM multicanal para distancias de 40 y 80 Km. En el anexo B en la tabla B.1 se encuentra la grilla de longitudes de onda para el estándar CWDM especificadas en la recomendación [13, p. 410], [16, p. 3].

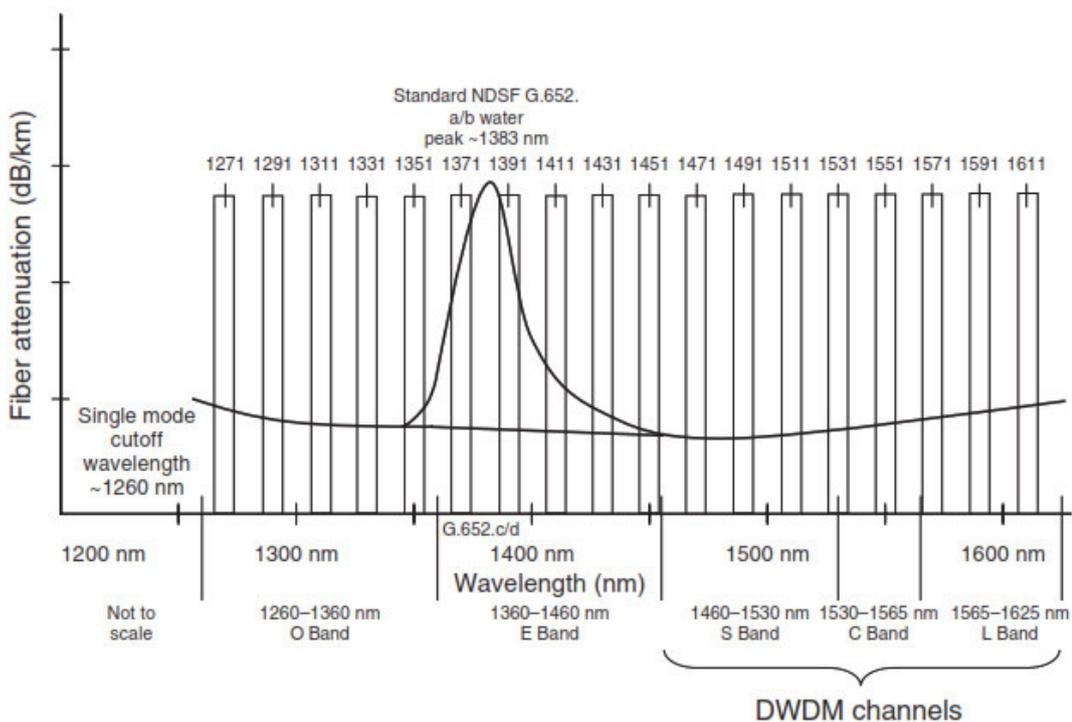


FIGURA 1.7. Espectro CWDM [15, p. 191].

1.3.3.3 Aplicaciones de los sistemas WDM

Los sistemas WDM se han convertido en la vía principal de transporte de tráfico mundial por sus grandes capacidades de ancho de banda por lo que los sistemas basados en WDM tienen muchas aplicaciones, a continuación, se revisan algunas de estas en forma general.

1.3.3.3.1 Enlaces WDM de alta velocidad punto a punto

La tecnología WDM permite aumentar la tasa de bits a nivel mundial para enlaces de fibra óptica de largas distancia punto a punto que sirven de núcleo para las diferentes redes de telecomunicaciones de área amplia (WAN) [6, p. 324]. Si se multiplexan N canales con igual velocidad de bits mediante multiplexores ópticos y se transmiten por la misma fibra, la capacidad global de la tasa de bits aumenta en un factor N. Los enlaces WDM de alta velocidad actualmente recorren miles de kilómetros aumentando la capacidad de los sistemas e interconectando diferentes redes, por lo que los sistemas WDM de alta velocidad punto a punto son la columna vertebral de las telecomunicaciones actuales.

1.3.3.3.2 WDM para redes Metropolitanas (MAN), de área amplia (WAN) y de acceso (LAN)

Los sistemas WDM se utilizan para conectar una gran cantidad de usuarios dentro de una zona geográfica específica. Las redes MAN y WAN que utilizan tecnologías WDM principalmente se diseñan bajo una topología en anillo mientras que las redes de acceso LAN son en estrella. Las LAN se interconectan con la MAN mediante routers de longitud de onda pasiva. A nivel más alto las MAN se conectan con las WAN cuyos nodos están conectados en una topología de malla. A nivel WAN la red hace un uso extensivo de switches y convertidores de longitud de onda para configurarse dinámicamente [17, p. 2]. Las aplicaciones dentro de estas redes son muy amplias y actualmente una gran parte de estas son ópticamente transparentes, que no requiere una conversión del dominio óptico al eléctrico.

Actualmente con la conmutación de longitudes de onda y enrutamiento de las señales ópticas da lugar a las redes WDM de acceso múltiple, en la cual cada usuario puede transmitir datos a cualquier otro usuario que esté siempre conectado a la red WDM, así como recibirlos. Esto proporciona un acceso de datos bidireccional entre ellos [9, p. 334].

1.3.3.4 Componentes de los sistemas WDM

Los sistemas WDM pueden configurarse utilizando una amplia gama de componentes que están diseñados para realizar varias funciones, como la generación y combinación de señales ópticas con múltiples longitudes de onda, el transporte y la amplificación de estas señales, entre otras más. Los componentes que tiene mayor relevancia dentro de los sistemas WDM son: filtros ópticos, amplificadores, rejillas, transmisores y receptores WDM, multiplexores y demultiplexores WDM, además de dispositivos pasivos como: circuladores, acopladores y aisladores que puede ser utilizados para construir otros componentes más complejos.

1.3.4 MULTIPLEXORES Y DEMULTIPLEXORES WDM

Los sistemas WDM en sus diferentes aplicaciones requieren de elementos que acoplen y separen longitudes de onda y proporcionen una excelente selectividad, por lo que se utiliza filtros ópticos con tecnologías de alta precisión que permiten que las longitudes de onda se acoplen o se separen. Un multiplexor WDM (MUX WDM) es un dispositivo óptico que combina varias señales ópticas cada una con diferentes longitudes de onda la cual se alimenta a una fibra común para su transmisión, mientras que un demultiplexor WDM (DEMUX WDM) separa varias longitudes de onda de entrada en longitudes de onda individuales [6, p. 339].

Los MUX WDM deben tener pérdidas de inserción por canal bajas y el DEMUX WDM debe tener la capacidad de separar cada canal sin ninguna fuga de los canales adyacentes, ser insensible a la polarización de la señal incidente y tener una interferencia entre canal menor a 20 dB.

Las tecnologías que multiplexan y demultiplexan longitudes de onda se clasifican según en el mecanismo de selección de longitud de onda empleado para la construcción del MUX/DEMUX WDM, estos pueden ser basados en difracción (Gratings) que utiliza una rejilla de difracción que separa la señal óptica multiplexada incidente en sus diferentes componentes de longitud de onda. El otro mecanismo es basado en la interferencia que combinan o separan longitudes de onda haciendo uso de dispositivos WDM como acopladores ópticos direccionales de 3 dB y filtros ópticos [6, p. 338]. A continuación, se explica de forma general algunos MUX/DEMUX WDM.

1.3.4.1 Multiplexor/Demultiplexor WDM basado en MZI

Un dispositivo usado frecuentemente en los sistemas de comunicaciones ópticas es el interferómetro Mach-Zehnder debido a su gran variedad de aplicaciones, estas van desde moduladores hasta el objeto de estudio de este trabajo de titulación que son los multiplexores y demultiplexores ópticos WDM. En este apartado se explica de manera general al interferómetro Mach Zehnder (MZI), mientras que su principio de funcionamiento, ecuaciones, elementos que lo conforman e implementación, se explicarán en el siguiente capítulo por su importancia para el desarrollo de los resultados.

Los interferómetros MZI usados como MUX/DEMUX principalmente son 2x2 y para multiplexar una cantidad mayor de señales se realiza un modelo en cascada. Los MZI constan de tres etapas: un acoplador direccional de 3 dB, una sección central de dos guías de onda, (brazos del MZI) en la que una de las guías de onda es más larga en ΔL que la

otra, para dar un desplazamiento de fase a la longitud de onda entre los dos brazos y otro acoplador de 3 dB a la salida que recombina las señales.

Dos señales WDM entran al acoplador de 3 dB y pasan por las guías de onda que sufren un desplazamiento de fase diferencial debido a la diferencia ΔL en las dos guías para luego recombinarse en el segundo acoplador, lo cual genera una señal multiplexada en uno de los brazos, mientras que en el segundo brazo no hay señal.

Esta interferencia se logra debido a que al dividir las señales e introducir un desplazamiento de fase en uno de los trayectos, las señales recombinadas interferirán constructivamente en una salida y destructivamente en la otra. La figura 1.8 se muestra un esquema de un interferómetro Mach Zehnder [18, p. 59].

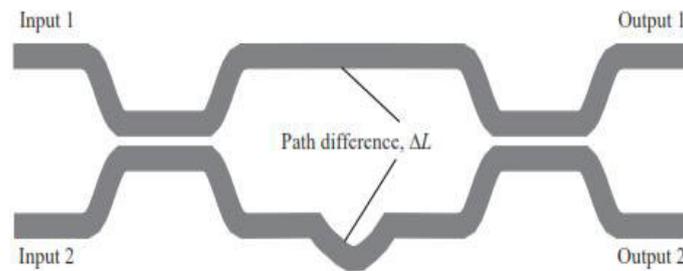


FIGURA 1.8. Construcción de un MZI con acopladores direccionales de 3dB [2, p. 142].

1.3.4.2 Multiplexor/Demultiplexor basado en AWG

El dispositivo WDM basado en arreglos de rejillas de guía de onda (AWG, *Arrayed Waveguide Gratings*) es un dispositivo versátil que puede funcionar como un multiplexor y demultiplexor, como elemento de inserción-extracción (drop-insert) o enrutador de longitudes de onda [19, p. 343]. AWG es una generalización del interferómetro Mach-Zehnder (MZI), la cual consta de tres componentes: dos acopladores multipuerto en estrella interconectados con un conjunto de guía de ondas con longitudes diferenciales y guías de onda de entrada y salida. Las guías de entrada y de salida, los acopladores multipuerto y las guías de onda dispuestas se fabrican en un único sustrato, usualmente de Silicio y las guías de onda pueden ser de Silicio dopado con Germanio o solo de Silicio [18, p. 54].

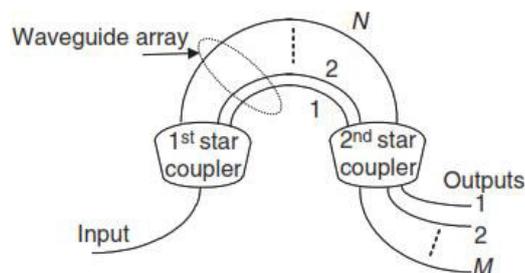


FIGURA 1.9. Ilustración de una estructura AWG [13, p. 343].

El principio de funcionamiento se basa en la interferencia, debido a que cada guía de onda tiene una longitud óptica ligeramente diferente se producen interferencias cuando las señales se combinan en la salida, por lo que la selectividad de la longitud de onda se basa en la interferencia multitrayecto [18, p. 55].

El diseño se basa en disponer de M_{in} guías de onda de entrada y M_{out} guías de onda de salida que se conectan a dos acopladores estrella idénticos. Un conjunto de N guías de onda no acopladas que tiene una constante de propagación β se conectan a los acopladores estrella. En la región del arreglo de rejillas, la longitud de la guía de onda difiere en una cantidad muy precisa ΔL de las longitudes de los brazos adyacentes de modo que forman una rejilla de tipo Mach-Zehnder [19, p. 343].

Para el diseño de un multiplexor, el número de guías de onda de entrada es igual al número de guías de onda no acopladas $M_{in}=N$, y las guías de onda de salida es igual a 1 $M_{out}=1$. La geometría del acoplador estrella de la figura 1.10 muestra cómo actúa como un lente de longitud L_f . El parámetro X es el espacio entre los centros de las guías de onda de entrada y de salida de las interfaces del acoplador en estrella, d es el espacio entre las guías de onda del conjunto de rejilla y θ es el ángulo de difracción en la guía de entrada de entrada o de salida. Los índices de refracción del acoplador en estrella y de las guías de onda conjunto de rejillas son n_s y n_c respectivamente.

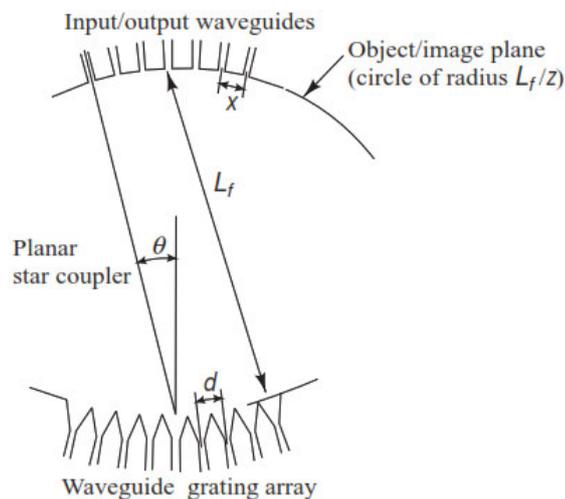


FIGURA 1.10. Geometría del acoplador en estrella utilizado en los dispositivos WDM AWG (waveguide arrayed structure) [13, p. 408].

Las longitudes del conjunto de rejillas difieren en una longitud precisa ΔL , estas diferencias puede elegirse de forma que todas las longitudes de onda emerjan en el acoplador estrella de salida con diferentes retrasos de fase que están dados por la ecuación 1.3.

$$\Delta\Phi = 2\pi \cdot n_c \cdot \frac{\Delta L}{\lambda} \quad (1.3)$$

El acoplador de salida a través de sus lentes reenfoca la luz de las guías de onda de salida, la cual enfoca una guía de onda de salida diferente a partir de la condición de coincidencia de fase. Las guías de onda del canal de salida deben satisfacer la ecuación 1.4 llamada ecuación de rejilla (*grating equation*).

$$n_s d \sin \theta + n_c \Delta L = m\lambda \quad (1.4)$$

Donde el número entero m es el orden de difracción de la rejilla. La focalización se logra, haciendo que las diferencias de longitud de trayecto ΔL entre las guías de onda adyacentes del conjunto, medida dentro del conjunto, sea un múltiplo entero, esto se logra con la ecuación 1.5 con un ángulo de difracción $\theta=0$.

$$\Delta L = m \frac{\lambda_c}{n_c} \quad (1.5)$$

Donde λ_c es la longitud de onda central en el vacío, se define como la longitud de onda de paso para el trayecto desde la guía de onda de entrada central hasta la guía de onda central de salida. Para poder encontrar el espaciado entre canales se debe calcular la dispersión angular, que se encuentra especificada en la ecuación 1.6.

$$\frac{d\theta}{dv} = - \frac{m\lambda^2}{n_s c d} \frac{n_g}{n_c} \quad (1.6)$$

Donde el índice de grupo de las guías de onda del conjunto de rejillas se define en la ecuación 1.7.

$$n_g = n_c - \lambda \frac{dn_c}{d\lambda} \quad (1.7)$$

O en términos de frecuencia, el espacio entre canales $\Delta\nu$ está descrito en la ecuación 1.8.

$$\Delta\nu = \frac{X}{L_f} \left(\frac{d\theta}{dv} \right)^{-1} = \frac{X}{L_f} \frac{n_s c d}{m\lambda^2} \frac{n_c}{n_g} \quad (1.8)$$

O en términos de longitud de onda se define en la ecuación 1.9.

$$\Delta\lambda = \frac{X}{L_f} \frac{n_s d}{m} \frac{n_c}{n_g} = \frac{X}{L_f} \frac{\lambda_0 d}{\Delta L} \frac{n_s}{n_g} \quad (1.9)$$

Las ecuaciones 1.8 y 1.9 describen las frecuencias de paso o las longitudes de onda para las cuales funciona el multiplexor, dado que está diseñado para una longitud de onda central λ_c . Al hacer ΔL más grande, el dispositivo puede multiplexar y demultiplexar señales ópticas con espaciamientos de longitud de onda muy pequeños [13, pp. 407-410].

1.3.4.3 Multiplexor/Demultiplexor basado en FBG

Los dispositivos basados en rejillas de Bragg (FBG, *Fiber Bragg Grating*) son relativamente sencillos y pueden conseguirse simplemente modulando el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica mediante una fuente de luz ultravioleta. Las rejillas de Bragg en fibra se han vuelto dispositivos fundamentales en los sistemas de comunicación óptica avanzados. Los filtros basados en rejillas de Bragg suelen ser filtros de rechazo y se utilizan junto con circuladores para construir dispositivos MUX/DEMUX WDM [20, p. 52].

Para combinar o separar N longitudes de onda, es necesario realizar una configuración en cascada de $N-1$ FBG y $N-1$ circuladores [13, p. 402]. Dependiendo de si se requiere combinar o separar las longitudes de onda, la configuración de los componentes tendrá ciertas variaciones para su correcto funcionamiento. Una de las ventajas de estos MUX/DEMUX WDM es que al configurarlos en cascada se puede obtener un MUX/DEMUX WDM de mayor capacidad, equivalente a la capacidad de los MUX/DEMUX WDM configurados en cascada.

1.3.4.4 Multiplexor/Demultiplexor basado en Filtros TFF

TFF (*Dielectric Thin-Film Filter*) se trata de un filtro pasa banda, ya que permite que una banda particular de longitud de onda muy estrecha pase directamente a través de él y refleje las demás. La estructura de un TFF se puede apreciar en la figura 1.11, consiste en una cavidad formada por dos superficies paralelas reflectantes, denominada interferómetro de Fabry-Perot o etalón.

Su principio de funcionamiento consiste en que, si una señal incide en la superficie izquierda del etalón, esta señal atravesará la cavidad y llegará a la superficie inferior de la derecha, provocando que parte de la luz salga de la cavidad y otra parte se refleje dependiendo de la reflectividad de la superficie. Si la distancia de ida y vuelta entre los dos espejos es un múltiplo integral de una longitud de onda, toda la luz en esas longitudes de onda que pasa por la faceta derecha se suma en fase. Estas longitudes de onda conocidas como longitudes de onda resonantes de la cavidad se interfieren constructivamente en el haz de salida sumándose en intensidad [13, p. 403].

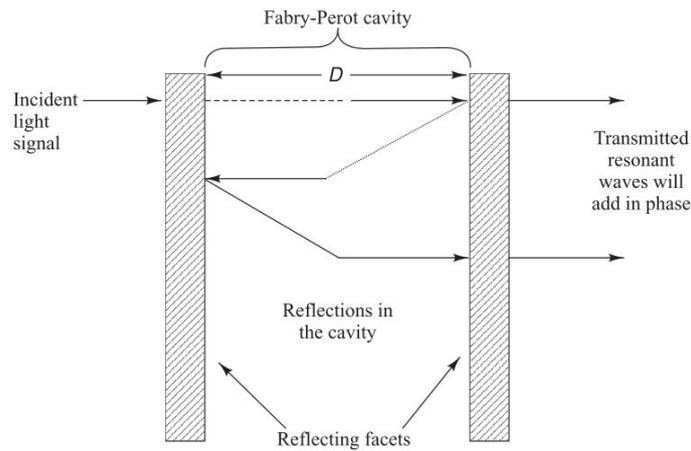


FIGURA 1.11. Cavidad Fabry-Perot o etalón [13, p. 404].

Los TFF son frecuentemente utilizados para la construcción de dispositivos MUX/DEMUX WDM. Para construir un dispositivo MUX/DEMUX WDM que combine o separe N longitudes de onda se necesita colocar en cascada $N-1$ TFF. En la figura 1.12 se puede apreciar la forma en la que 4 longitudes de onda se multiplexan en base a TFF. Los TFF están colocados en un ángulo ligero para dirigir la luz de un TFF a otro. El primer filtro TFF_2 refleja la longitud de onda λ_1 y deja pasar la longitud de onda λ_2 . A continuación, estas dos señales se reflejan en el filtro TFF_3 , donde se unen con la longitud de onda λ_3 . Tras un proceso similar en el filtro TFF_4 , las cuatro longitudes de onda pueden acoplarse en una fibra mediante un mecanismo de lentes. Por otro lado para demultiplexar las cuatro longitudes de onda se invierte la dirección de las flechas [13, pp. 406-407].

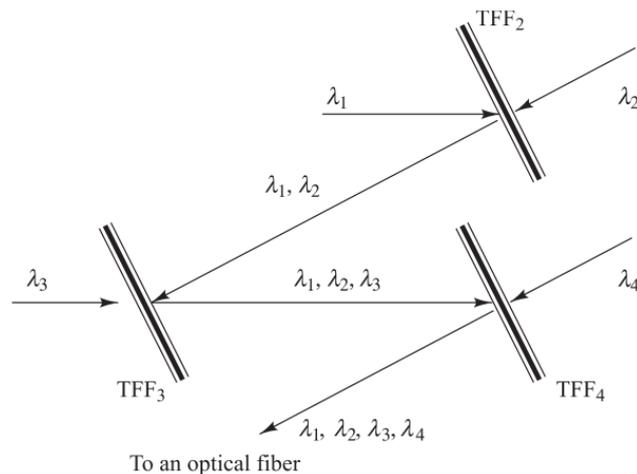


FIGURA 1.12. Multiplexación de 4 longitudes de onda usando Thin-Film Filters [13, p. 406].

Se dispone de otros dos métodos para formar dispositivos MUX/DEMUX WDM que separen longitudes de onda utilizando TFF. Uno de ellos es utilizar un acoplador en estrella que divida por igual la potencia de una luz entrante en N componentes y a continuación colocar varios TFF correspondientes a la longitud de onda deseada, tal y como se muestra en la figura 1.13. Estos dispositivos son fáciles de fabricar, sin embargo tienen altas pérdidas de inserción debido a la división de potencia, es por ello que solo se utiliza para demultiplexar pocos canales [20, p. 49].

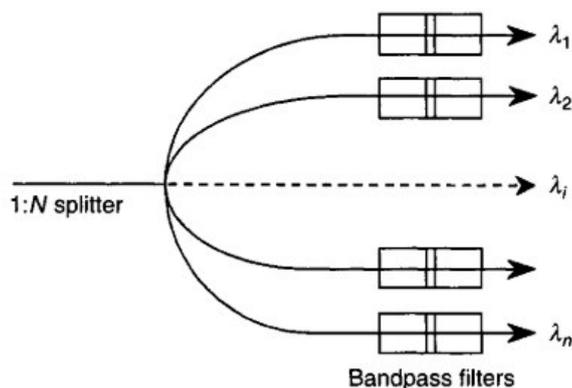


FIGURA 1.13. DEMUX multicanal basado en un divisor 1xN y Thin-Film Filters [20, p. 50].

Otro método consiste en colocar varios acopladores de 3 puertos en cascada tal y como se observa en la figura 1.14. Este método ofrece una buena flexibilidad en la configuración de los canales y una pérdida de inserción menor. Los DEMUX basados en este método están disponibles comercialmente para demultiplexar 40 canales con separación de 100 GHz utilizando un diseño modular [20, pp. 49-50].

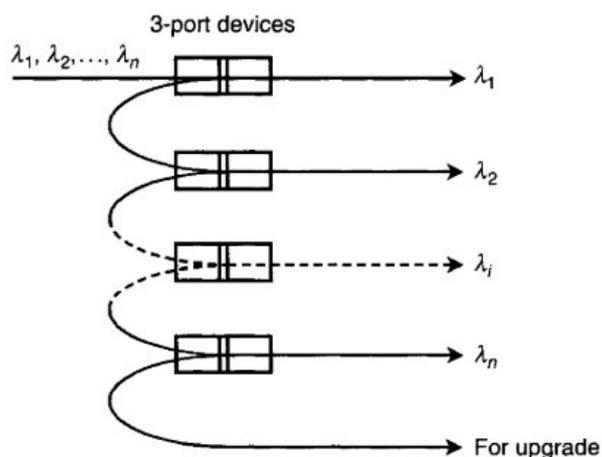


FIGURA 1.14. DEMUX multicanal basado en acopladores de 3 puertos y Thin-Film Filter [20, p. 50].

2. METODOLOGÍA

Los Multiplexores WDM ópticos son los dispositivos encargados de insertar canales ópticos a una sola fibra y los demultiplexores WDM ópticos en cambio separan dichas señales en algún punto del sistema WDM ofreciendo una excelente selectividad. En la actualidad existen distintas tecnologías, que dependiendo de las características de la red pueden o no ser utilizadas.

En el desarrollo de este capítulo se analizará a detalle el interferómetro Mach-Zehnder (MZI) y la rejilla de Bragg en fibra (FBG) en conjunto con circuladores. En cada análisis se aprecia el principio de funcionamiento y ecuaciones principales del MUX/DEMUX WDM de estas características, con los elementos pasivos ya mencionados y se presenta una configuración de ejemplo de un MUX/DEMUX WDM en función de los parámetros de entrada y salida para cada tecnología. El proceso de implementación y ejecución de pruebas se realiza en el software de simulación OptiSystem como herramienta de simulación principal para el desarrollo del proyecto de titulación.

2.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MULTIPLEXOR/DEMULTIPLEXOR WDM CON INTERFERÓMETROS MACH-ZEHNDER (MZI)

Los interferómetros Mach-Zehnder (MZI) son dispositivos que pueden desempeñar muchas funcionalidades dependiendo de la configuración que se disponga. Para nuestro análisis el MZI es una tecnología que se ocupará para diseñar MUX/DEMUX WDM con una configuración en cascada, con parámetros adecuados para un buen comportamiento.

Como se mencionó en el capítulo anterior, un MZI está compuesto por dos acopladores direccionales, uno a la entrada y otro en la salida, con una sección central formada por dos guías de onda conectadas a los acopladores, uno de los brazos de longitud L , y el otro de longitud $L + \Delta L$, este desfase entre las señales crea una interferencia en la cual las señales pueden sumarse o restarse (interferencia constructiva o destructiva respectivamente) [18, p. 59].

2.1.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MZI

Para explicar el funcionamiento del Interferómetro Mach-Zehnder tomamos como referencia el funcionamiento del MZI como demultiplexor, en donde solo a la entrada superior del MZI se le aplica señal. Al pasar la señal por el primer acoplador direccional, la potencia se divide en partes iguales entre ambos brazos considerando un acoplamiento igual, con la diferencia de que el segundo brazo o brazo inferior tiene un desfase de $\frac{\pi}{2}$ con respecto al brazo superior o primer brazo. Al existir una diferencia ΔL entre los brazos, se

introduce un retraso de fase de $\beta\Delta L$ en el brazo inferior. En el siguiente acoplador direccional, la señal del brazo inferior sufre otro retardo de fase de $\frac{\pi}{2}$ al dirigirse al brazo superior. La diferencia de fase relativa total en la primera salida o superior entre las dos señales es: $\frac{\pi}{2} + \beta\Delta L + \frac{\pi}{2}$.

En la segunda salida o salida inferior del segundo acoplador direccional, la señal del brazo superior al dirigirse a la salida inferior se desfasa en fase con respecto a la señal del brazo inferior en $\frac{\pi}{2}$, con esto se obtendrá una salida relativa total en la segunda salida o inferior entre las dos señales de: $\frac{\pi}{2} + \beta\Delta L - \frac{\pi}{2} = \beta\Delta L$. Por lo tanto, si $\beta\Delta L = k\pi$ y k es impar, las señales de la salida superior se suman en fase, mientras que en la salida inferior se restan, y, por tanto, se anulan. Las longitudes de onda que pasan de la entrada superior a la salida inferior son aquellas longitudes de onda para las cuales $\beta\Delta L = k\pi$ y k es par. Para encontrar estos desfases de forma teórica se necesita analizar la matriz de transferencia o Scattering del interferómetro Mach-Zehnder que se explica a continuación [2, p. 143].

2.1.2. ACOPLADOR DIRECCIONAL

El acoplador direccional es un dispositivo pasivo que funciona en el dominio óptico para dividir y combinar flujos de luz. Los dispositivos WDM de manera general son variaciones del acoplador estrella, por lo que es importante analizar el concepto de acoplador direccional. En los acopladores direccionales la potencia óptica de N fibras de entrada se divide uniformemente en los núcleos de las N fibras de salida a través del acoplamiento de potencia en la región fusionada de los núcleos. El esquema de la figura 2.1 muestra un acoplador direccional en estrella equipotencial $N \times N$, en el cual la potencia total de entrada se reparte por igual en cada puerto de salida, [21, p.161].

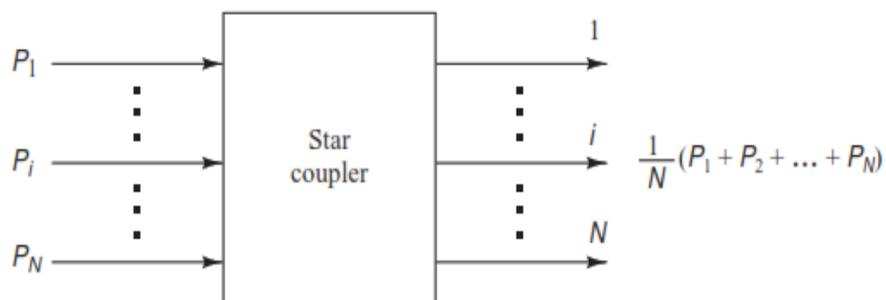


FIGURA 2.1. Concepto Básico de acoplador estrella para combinar o dividir las potencias ópticas [13, p. 381].

2.1.2.1. Acoplador Direccional 2x2

El acoplador direccional 2x2 es una configuración en la cual se tiene 2 entradas y 2 salidas. Es un dispositivo óptico fundamental con el que se cumple el principio de funcionamiento del MZI. Para la construcción del acoplador se fabrica retorciendo, fundiendo y tirando dos fibras monomodo, con el objetivo de que en una sección uniforme de longitud W se fusionen como se observa en la figura 2.2. Cada fibra de entrada y salida está compuesta de una sección larga y cónica de longitud L por lo que la longitud total de tracción \mathcal{L} se calcula con la ecuación 2.1 [13, p. 382].

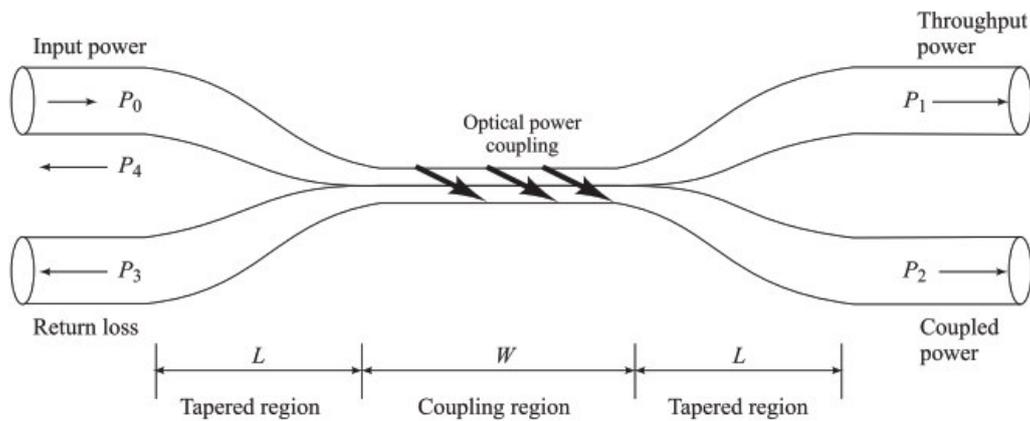


FIGURA 2.2. Vista de la sección de un acoplador de fibra que tiene una región de acoplamiento W y dos regiones cónicas de longitud L [13, p. 382].

$$\mathcal{L} = 2L + W \quad (2.1)$$

Como se observa en la figura 2.2 la potencia de entrada es P_0 y P_1 es la potencia en la salida superior, P_2 es la potencia acoplada en la fibra inferior. Los parámetros P_3 y P_4 son niveles de señal reflejadas extremadamente bajos (entre 50 y 70 dB por debajo del nivel de entrada) que resultan de las reflexiones debido a la fabricación del acoplador, pues solo una fracción de la potencia óptica se refleja a cualquiera de los puertos de entrada, por esto se los conoce como acopladores direccionales ya que la luz viaja en un solo sentido.

Los acopladores tienen pérdidas poco considerables por lo que se puede determinar la potencia de salida en el puerto 2 P_2 a lo largo de una distancia axial z como:

$$P_2 = P_0 \cdot \sin^2(kz) \quad (2.2)$$

Donde k es el coeficiente de acoplamiento que describe la interacción entre las dos fibras. Por conservación de la potencia, para fibras idénticas se tiene:

$$P_1 = P_0 - P_2 = P_0 (1 - \sin^2(kz)) = P_0 \cdot \cos^2(kz) \quad (2.3)$$

Por lo tanto, la señal de la fibra 2 siempre va 90° por detrás de la señal de la fibra 1 cuando $Z = 0$. Esta relación de fase continúa al aumentar Z , hasta a una distancia que satisface que $kz = \frac{\pi}{2}$, donde toda la potencia se transfiere de la fibra 1 a la fibra 2. Cuando se alcanza el modo $\frac{\pi}{2} \leq kz \leq \pi$ la señal de la fibra 1 va por detrás de la señal de la fibra 2 y así sucesivamente. Como resultado de esta relación de fase, el acoplador 2x2 es un acoplador direccional [13, p. 383].

Los acopladores ópticos deben especificar su rendimiento de potencia, dicho rendimiento del acoplador se suele indicar de forma porcentual relacionando la potencia óptica de sus puertos de entrada y salida. La relación de acoplamiento indica la división porcentual de la potencia óptica entre los puertos de salida mediante la relación de división, la ecuación 2.4 muestra esta relación.

$$\text{Relación de acoplamiento} = \left(\frac{P_2}{P_1 + P_2} \right) \times 100\% \quad (2.4)$$

Si la potencia se divide de forma uniforme, con la mitad de potencia de la señal yendo a cada salida, se denomina acoplador direccional de 3 dB. En los acopladores existen pérdidas cuando la luz lo atraviesa, las pérdidas básicas que se pueden calcular son pérdidas por exceso y pérdidas por inserción. Las pérdidas de exceso se definen como la relación entre la potencia de entrada y la potencia total de salida. Las pérdidas de exceso se expresan en decibelios en la ecuación 2.5.

$$\text{Pérdidas por exceso} = 10 \log \left(\frac{P_0}{P_1 + P_2} \right) \quad (2.5)$$

En cambio, las pérdidas por inserción se definen como las pérdidas de un determinado trayecto entre los puertos de entrada y salida. Un ejemplo es la ruta desde el puerto de entrada i al puerto de salida j , la ecuación 2.6 determina las pérdidas de inserción en decibelios [13, pp. 383-385].

$$\text{Pérdidas de Inserción} = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_j} \right) \quad (2.6)$$

2.1.3. MATRIZ DE DISPERSIÓN DEL ACOPLADOR 2x2

Es importante analizar la matriz de dispersión del acoplador 2x2 para profundizar en el análisis de los MUX/DEMUX WDM y de la construcción del MZI. La matriz de dispersión es una forma de representación de un dispositivo de cuatro terminales que tiene dos entradas y dos salidas, como se observa en la figura 2.3 [13, p. 386]. La matriz de dispersión o matriz S define la relación entre las dos intensidades de campo de entrada a_1 y a_2 , y las dos intensidades de campo de salida b_1 y b_2 , lo que por definición de la matriz es:

$$b = Sa, \text{ donde } b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad y \quad S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} \\ S_{12} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

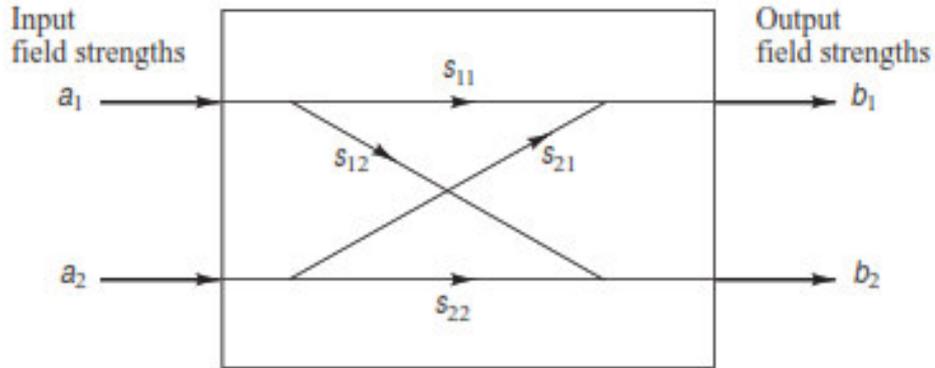


FIGURA 2.3. Acoplador 2x2 donde S_{ij} son los parámetros de la matriz de dispersión [13,p. 386].

La expresión $S_{ij} = |S_{ij}|e^{j\phi_{ij}}$ representa el coeficiente de acoplamiento de la transferencia de potencia óptica desde el puerto de entrada i hasta el puerto de salida j , siendo $|S_{ij}|$ la magnitud de fase en el puerto j respecto al puerto i .

Un dispositivo real debe cumplir con ciertas condiciones que surgen de las leyes de Maxwell. Una condición que debe cumplir es la de reciprocidad ya que las ecuaciones son invariantes en el tiempo, lo que conlleva a que existan dos soluciones en dirección de propagación opuestas a través del dispositivo, suponiendo un funcionamiento monomodo.

De la primera condición se deduce:

$$S_{12} = S_{21} \quad (2.8)$$

La otra condición es una restricción que debe cumplir, que surgen a partir de los principios de conservación de la energía y del supuesto que el dispositivo no tiene pérdidas.

Asumiendo que el dispositivo no tiene pérdidas y partiendo de la segunda restricción en donde la suma de las intensidades de salida I_o debe ser igual a la suma de las intensidades de entrada I_i , se tiene:

$$I_o = b_1^*b_1 + b_2^*b_2 = I_i = a_1^*a_1 + a_2^*a_2 \quad (2.9)$$

El superíndice * significa el complejo conjugado. Sustituyendo las ecuaciones 2.7 y 2.8 en la ecuación 2.9 se obtiene el siguiente conjunto de tres ecuaciones:

$$S_{11}^*S_{11} + S_{12}^*S_{12} = 1 \quad (2.10)$$

$$S_{11}^* S_{12} + S_{12}^* S_{22} = 0 \quad (2.11)$$

$$S_{22}^* S_{22} + S_{12}^* S_{12} = 0 \quad (2.12)$$

Luego de las demostraciones, se supone que el acoplador ha sido construido de tal forma que la fracción $(1 - \epsilon)$ de la potencia óptica de la entrada 1 aparece en el puerto de salida 1 y el resto ϵ va al puerto 2, entonces reemplazando en las ecuaciones anteriores se tiene:

$$S_{11} = \sqrt{(1 - \epsilon)} \quad (2.13)$$

La ecuación 2.13 entrega un número real entre 0 y 1. Esto se logra, asumiendo que no existen pérdidas y que el campo eléctrico en la salida 1 tiene un desplazamiento de fase nulo con respecto a la entrada 1; es decir $\phi_{11} = 0$. Por lo que se deduce que el cambio de fase en el acoplador es simétrico, entonces, se tiene:

$$S_{22} = \sqrt{(1 - \epsilon)} \quad (2.14)$$

A esta situación aplica que el desplazamiento de fase es $\phi_{22} = 0$.

Con las expresiones encontradas se puede determinar las fases ϕ_{12} de las salidas acopladas en relación con las señales de entrada y definir las restricciones en las salidas cuando ambos puertos de entrada reciben potencia. Para encontrar los valores de S_{12} se reemplaza las ecuaciones 2.13 y 2.14 en la ecuación 2.11 en la cual $S_{12} = |S_{12}|e^{j\phi_{12}}$, en donde $|S_{12}|$ es la magnitud y ϕ_{12} la fase, se determina que:

$$e^{j2\phi_{12}} = -1 \quad (2.15)$$

Esta condición se cumple cuando:

$$\phi_{12} = (2n + 1)\frac{\pi}{2}, \quad \text{donde } n = 0,1,2,.. \quad (2.16)$$

De modo que la matriz de dispersión de la expresión 2.7, luego de varios cálculos se transforma en:

$$S = \begin{bmatrix} \sqrt{(1 - \epsilon)} & j\sqrt{\epsilon} \\ j\sqrt{\epsilon} & \sqrt{(1 - \epsilon)} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Para lograr ciertas condiciones como, que una gran parte de la potencia de la entrada 1 emerja por el puerto de salida 1, debe tener un valor pequeño ϵ , variando este parámetro se puede obtener dos distintas longitudes de onda en un mismo puerto con una gran parte de la potencia [13, pp. 385-387].

2.1.4. CONSTRUCCIÓN DEL MULTIPLEXOR/DEMULTIPLEXOR CON MZI

La técnica de interferencia en la que se basa el interferómetro Mach-Zehnder puede ser utilizada para multiplexar y demultiplexar longitudes de onda WDM. Las longitudes de onda WDM mencionadas no exigen condiciones de potencia altas fuera de la anchura espectral asignada; debido a que existe la suficiente separación entre canales WDM con una banda de guarda entre ellos y a que los láseres transmiten energía con un ancho espectral estrecho. En el otro extremo los demultiplexores disponen de filtro ópticos muy estrechos con longitudes de onda bien definidas en la entrada del detector.

Los MUX/DEMUX WDM fabricados con MZI tienen diferentes técnicas de fabricación y para explicar su funcionamiento como MUX/DEMUX se empieza con la referencia del acoplador direccional 2x2 de 3dB explicado en la sección anterior y se demuestra la matriz de transferencia del MZI. Al final se construye un MZI 2x2 y se explica el funcionamiento de un MUX de N canales multiplexados con un sistema en cascada. Para el proceso de separar longitudes de onda se hace el mismo procedimiento.

2.1.4.2. Matriz de dispersión o transferencia del MZI

Para entender el funcionamiento del MZI se debe analizar la matriz de dispersión, en donde se hará uso de la sección anterior donde se explicó la matriz de dispersión del acoplador direccional 2x2. La figura 2.4 ilustra los componentes de un interferómetro Mach-Zehnder individual que consta de 3 etapas: un acoplador direccional de 3 dB que divide las señales de entrada, una sección que une las guías de onda en donde uno de los brazos es más largo, dependiendo de la longitud de onda se produce un desplazamiento de fase y a la salida un acoplador que recombina las señales. Se produce la interferencia debido a que las señales de entrada se dividen y se introduce un desplazamiento de fase en uno de los caminos, al final las señales recombinadas se interfieren constructivamente en una salida y destructivamente en la otra [22, p. 1].

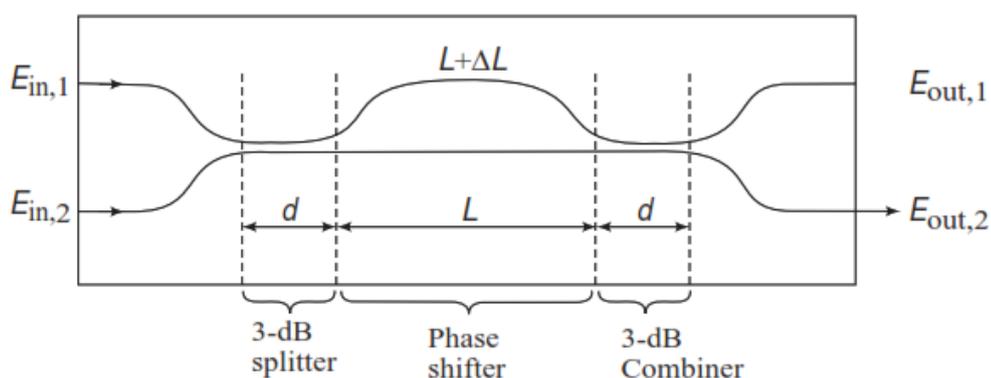


FIGURA 2.4 Esquema Básico de un interferómetro Mach-Zehnder [13, p. 393].

La matriz de transferencia de la ecuación 2.17 muestra los parámetros del acoplador, considerando que es un acoplador que divide la potencia por igual, se tiene que:

$$S_{acoplador3dB} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

En la región central, cuando las señales de los dos brazos provienen de la misma fuente de luz, las salidas de estas dos guías tienen una diferencia de fase dada por:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n_1}{\lambda} L - \frac{2\pi n_2}{\lambda} (L + \Delta L) \quad (2.19)$$

En donde la diferencia de fase puede surgir de una longitud de trayectoria diferente (dada por ΔL) o por una diferencia de índice de refracción si $n_1 \neq n_2$. Para la explicación se considera que ambos brazos tienen el mismo índice de refracción $n_1 = n_2 = n_{eff}$ (índice de refracción efectivo), entonces la ecuación 2.19 queda expresada de la siguiente manera [13, pp. 393-394]:

$$\Delta\phi = k\Delta L \quad (2.20)$$

Donde k es igual a:

$$k = \frac{2\pi \cdot n_{eff}}{\lambda} \quad (2.21)$$

Para una determinada $\Delta\phi$, la matriz de dispersión para la diferencia de fase queda expresada de la siguiente manera:

$$S_{\Delta\phi} = \begin{bmatrix} e^{jk\frac{\Delta L}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-jk\frac{\Delta L}{2}} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Los campos de salida $E_{out,1}$ y $E_{out,2}$ se relacionan con los campos de entrada $E_{in,1}$ y $E_{in,2}$ mediante la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} E_{out,1} \\ E_{out,2} \end{bmatrix} = S_{MZI} \begin{bmatrix} E_{in,1} \\ E_{in,2} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Donde la matriz de transferencia del interferómetro queda expresada de la siguiente manera:

$$S_{MZI} = S_{acop3dB} \cdot S_{\Delta\phi} \cdot S_{acop3dB} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{21} \\ M_{12} & M_{22} \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{k\Delta L}{2}\right) & \cos\left(\frac{k\Delta L}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{k\Delta L}{2}\right) & -\sin\left(\frac{k\Delta L}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

2.1.4.3. Multiplexor y Demultiplexor con interferómetro Mach-Zehnder MZI

Para la construcción de un multiplexor con MZI, las entradas deben tener diferentes longitudes de onda; es decir en, $E_{in,1}$ está λ_1 y en $E_{in,2}$ está λ_2 . Se determina a partir de la ecuación 2.23 que los campos de salida $E_{out,1}$ y $E_{out,2}$ son cada uno la suma de las contribuciones individuales de los dos campos de salida [23, pp. 1-3]. Los campos de salida se pueden obtener cuando la señal se pasa a través de la matriz de propagación mostrada en el literal 2.24, representada como:

$$E_{out,1} = j \left[E_{in,1}(\lambda_1) \sin\left(\frac{k_1 \Delta L}{2}\right) + E_{in,2}(\lambda_2) \cos\left(\frac{k_2 \Delta L}{2}\right) \right] \quad (2.25)$$

$$E_{out,2} = j \left[E_{in,1}(\lambda_1) \cos\left(\frac{k_1 \Delta L}{2}\right) - E_{in,2}(\lambda_2) \sin\left(\frac{k_2 \Delta L}{2}\right) \right] \quad (2.26)$$

Donde k_m es:

$$k_m = \frac{2\pi \cdot n_{eff}}{\lambda_m} \quad (2.27)$$

En el cual $m = 1,2$, para dos longitudes de onda. Las potencias de salida se encuentran a partir de las intensidades de la luz, que es el cuadrado de las intensidades de campo, las cuales son:

$$P_{out,1} = E_{out,1} \cdot E_{out,1}^* = \sin^2\left(\frac{k_1 \Delta L}{2}\right) P_{in,1} + \cos^2\left(\frac{k_2 \Delta L}{2}\right) P_{in,2} \quad (2.28)$$

$$P_{out,2} = E_{out,2} \cdot E_{out,2}^* = \cos^2\left(\frac{k_1 \Delta L}{2}\right) P_{in,1} + \sin^2\left(\frac{k_2 \Delta L}{2}\right) P_{in,2} \quad (2.29)$$

Donde $P_{in,m} = |E_{in,m}|^2$. De las ecuaciones 2.28 y 2.29 se determina que, para obtener la potencia óptica de las dos señales de entrada en un mismo puerto de salida, se tiene que cumplir con la siguiente condición:

$$\frac{k_1 \Delta L}{2} = \pi, \text{ y } \frac{k_2 \Delta L}{2} = \frac{\pi}{2}, \text{ ó} \quad (2.30)$$

$$(k_1 - k_2) \Delta L = 2\pi \cdot n_{eff} \left[\left(\frac{1}{\lambda_1}\right) - \left(\frac{1}{\lambda_2}\right) \right] \quad (2.31)$$

Por lo tanto, la diferencia en la longitud de los brazos debe ser:

$$\Delta L = \left[2n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \right]^{-1} = \frac{c}{2n_{eff} \cdot \Delta f} \quad (2.32)$$

Donde Δf es el espaciado de canal determinado por el estándar WDM.

El multiplexor WDM es un dispositivo con reciprocidad, por lo tanto, si enviamos en el sentido contrario funcionará como demultiplexor separando las dos longitudes de onda.

Para obtener un número mayor de señales multiplexadas se hace un modelo en cascada, en el que se añaden más etapas. Para calcular el número de MZI necesarios, se usa la siguiente ecuación:

$$\#MZI = N - 1 \quad (2.33)$$

Donde N es el número de longitudes de onda que se desea multiplexar, por ejemplo, para multiplexar 4 longitudes de onda se requieren 3 MZI. En el caso de un multiplexor $N \times 1$, $N = 2^n$; con $n \geq 1$, siendo n el número de etapas del multiplexor. El número de MZI en una etapa j será:

$$\#MZI_j = 2^{n-j} \quad (2.34)$$

La diferencia ΔL_{etapa} de cada etapa j viene dada entonces por:

$$\Delta L_{etapa} = \frac{c}{2(2^{n-j} \cdot n_{eff} \cdot \Delta f)} \quad (2.35)$$

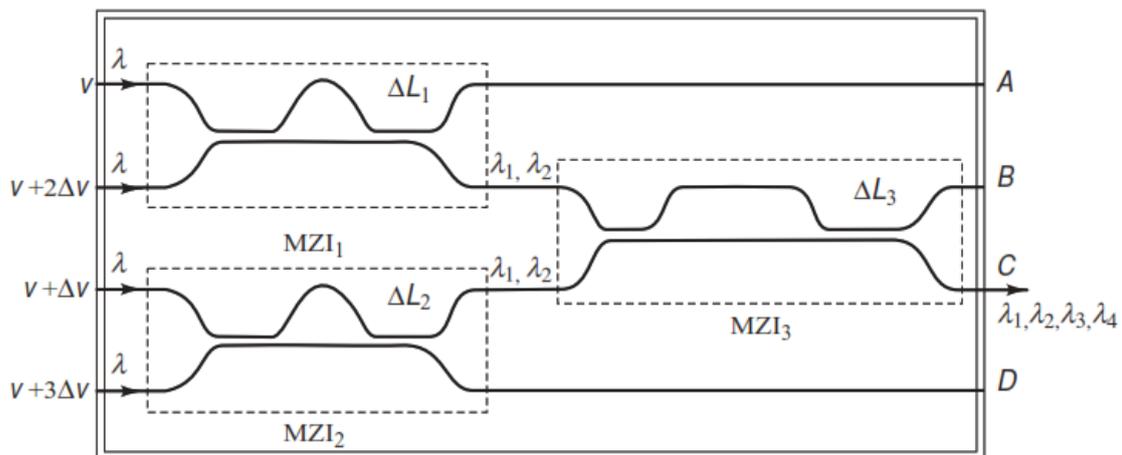


FIGURA 2.5 Ejemplo de MUX WDM utilizando MZI 2x2, donde Δv representa el espaciamento de canal [13, p. 395].

Realizando los cálculos necesarios para cualquier espaciamento de canal se encuentra que la diferencia de ruta en una etapa específica ΔL_j es el doble con respecto a la etapa anterior ΔL_{j-1} ; por ejemplo, en la figura 2.5 se visualiza que ΔL_1 está en la misma etapa que ΔL_2 por lo tanto $\Delta L_1 = \Delta L_2$, en la etapa dos solo se tiene ΔL_3 , esta es igual a $\Delta L_3 = 2\Delta L_2$ por lo que el desfase se incrementa en proporciones iguales de la diferencia de ruta, siendo el doble con respecto a la etapa anterior.

En el anexo C se presenta un ejemplo en una tabla de diferencia de ruta ΔL para diferentes etapas j y diferentes espaciamentos de canal.

Debido a la reciprocidad del MZI se puede construir el demultiplexor de la misma manera que el multiplexor. Los demultiplexores WDM construidos a partir de interferómetros Mach Zehnder se obtienen al conectar en cascada con el mismo número de etapas y de MZI por etapas que en los multiplexores.

A diferencia que el multiplexor, en los demultiplexores WDM se desea obtener que en cada brazo de salida se obtenga una sola longitud de onda con la mayor potencia, de tal manera, las ecuaciones para calcular la potencia a la salida del demultiplexor son:

$$P_{out,1} = \sin^2\left(\frac{k_1\Delta L}{2}\right)P_{in,1} \quad (2.36)$$

$$P_{out,2} = \cos^2\left(\frac{k_2\Delta L}{2}\right)P_{in,1} \quad (2.37)$$

Con estas potencias de salida se consigue que la transferencia de potencia en el brazo superior sea máxima mientras que en el brazo inferior es nula, además se obtiene una de las longitudes de onda en cada brazo de salida, dando como resultado el demultiplexor, de este se tiene las siguientes consideraciones para calcular el ΔL .

$$k_1\Delta L = (2m + 1)\pi, m = 0, \pm 1, \pm 2 \quad (2.38)$$

$$k_2\Delta L = 2l\pi, l = 0, \pm 1, \pm 2 \quad (2.39)$$

De esta forma se logra que las longitudes de onda aparezcan en los puertos de salida 1 y 2 respectivamente, por lo tanto, se elige las longitudes de onda de la siguiente manera:

$$\frac{n\Delta L}{\lambda_1} = \frac{2m+1}{2} \quad (2.40)$$

$$\frac{n\Delta L}{\lambda_2} = l \quad (2.41)$$

Reemplazando las ecuaciones 2.40 y 2.41 se obtiene las potencias en los brazos de salida

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda_1\lambda_2(2m'+1)}{2n\Delta L}, m' = m - l = 0, \pm 1, \pm 2 \quad (2.42)$$

Considerando $f_j = \frac{c}{\lambda_j}$ y las ecuaciones 2.38 y 2.39 se deduce la ecuación de desplazamiento de ruta.

$$\Delta f = \frac{(2m'+1)c}{2n_{eff}\Delta L} \quad (2.43)$$

Considerando un m' de 0, la ecuación para el desplazamiento de ruta es igual a:

$$\Delta L = \frac{c}{2n_{eff}\Delta f} \quad (2.44)$$

De la cual se llega a la conclusión de que los MUX/DEMUX WDM son dispositivos recíprocos ya que sus ecuaciones de cálculo de desplazamiento de ruta son iguales. La principal diferencia es que para demultiplexar las señales se calculan el retardo de la etapa final, por lo tanto, el ΔL de una etapa es la mitad de la etapa superior. Adicionalmente, se comprende que el desplazamiento de ruta de la primera etapa del multiplexor es igual al desplazamiento de ruta de la etapa final del demultiplexor independientemente del número de canales. La figura 2.6 Muestra un DEMUX WDM con MZIs para cuatro canales.

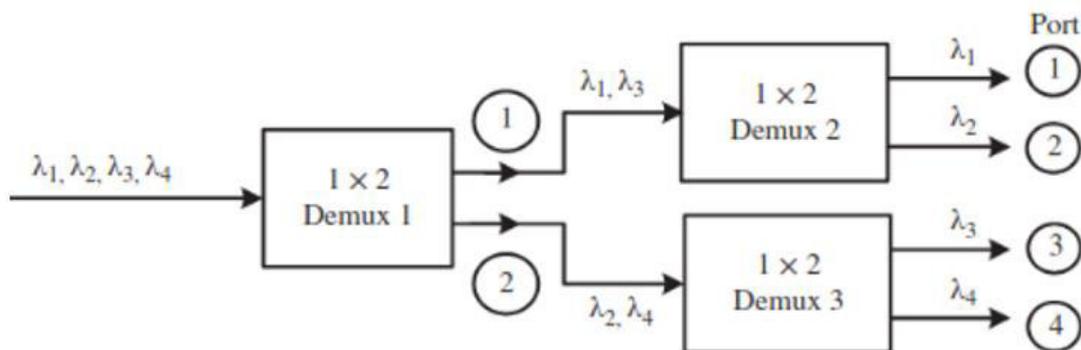


FIGURA 2.6 Ejemplo de DEMUX WDM de 4 canales [13, p. 395].

La figura 2.6 muestra que las longitudes de onda impares salen por el puerto de salida superior y las pares por el brazo inferior del DEMUX1, esto se logra escogiendo el ΔL de tal forma que se repartan con un periodo de $2\Delta f$. En el análisis de resultados se expondrá cómo calcular los desfases en el software de simulación de OptiSystem.

2.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MULTIPLEXOR/DEMULTIPLEXOR WDM CON FBG (FIBER BRAGG GRATING)

Los MUX/DEMUX WDM basados en FBG utilizan el principio de difracción de Bragg producido por una rejilla de Bragg en fibra (FBG), permitiéndole reflejar un rango específico de longitudes de onda y dejar pasar el resto de las longitudes de onda de la luz que incide en la rejilla, lo que resulta muy importante en el diseño de MUX/DEMUX WDM. Para esto, la construcción de un MUX/DEMUX WDM se enfoca en la configuración estratégica de varios FBG combinados con circuladores. Debido a la reciprocidad inherente de la onda de luz, el dispositivo construido puede utilizarse como multiplexor o demultiplexor con ligeras variaciones en la configuración de sus componentes y dependiendo de la dirección de propagación [9, p. 344].

Dentro de la construcción de un MUX/DEMUX WDM basado en FBG, cada rejilla es responsable de la reflexión de solo una longitud de onda. Esto implica que el número de

componentes (FBG y circuladores) dependerá de la cantidad de longitudes de onda o canales que se deseen combinar o dividir [6, p. 339].

Las rejillas de Bragg en fibra (FBG) son muy adecuadas para la construcción de MUX/DEMUX en sistemas WDM, debido a su versatilidad, bajo coste de fabricación y propiedades de filtrado. Sin embargo, la capacidad de un MUX/DEMUX WDM es condicionada cuando se utilizan rejillas de Bragg. Dado que se necesita un FBG para cada longitud de onda y normalmente la operación es secuencial, transmitiéndose las longitudes de onda de una FBG a otra, en consecuencia, las pérdidas nos son uniformes de un canal a otro, ya que cada longitud de onda pasa por un número diferente de FBG y circuladores, cada uno de los cuales añade pérdidas al canal. Tomando en cuenta las pérdidas presentes en un MUX/DEMUX WDM basado en FBG y circuladores. El diseño puede ser considerado aceptable para un pequeño número de canales, debido a la diferencia en pérdidas que existe entre el primer y último canal que ingresan al MUX/DEMUX [13, p. 403].

2.2.1. FIBER BRAGG GRATING (FBG)

En sistemas WDM las rejillas son elementos de principal importancia para realizar la multiplexación y demultiplexación de longitudes de onda individuales. Una rejilla es básicamente una estructura o una perturbación en un material (Fibra óptica). Esta perturbación en el material permite reflejar o transmitir la luz en una determinada dirección dependiendo de la longitud de onda [13, p. 399].

Una FBG o también conocida como rejilla de periodo corto se basa en la perturbación periódica del índice de refracción del núcleo de la fibra. Actúa como un filtro de reflexión óptico, debido a que refleja parte de la luz incidente en la fibra y transmite el resto. Son capaces de acoplar la luz del modo de propagación hacia adelante a un modo de contra propagación de la fibra óptica. Este tipo de acoplamiento se produce a una longitud de onda específica que viene dada por la condición de Bragg [6, p. 156].

Las FBG son muy útiles para aplicaciones en sistemas WDM debido a las propiedades que presentan. Se pueden encontrar en varios componentes como filtros, elementos ópticos de Add/Drop y compensadores de dispersión [2, p. 133]. Otra aplicación muy importante de las FBG es en MUX/DEMUX WDM, esencialmente en demultiplexores WDM al trabajar en conjunto con circuladores, tal como se lo mencionó en apartados anteriores.

2.2.1.1. Principio de operación

Para comprender el principio de operación de una FBG se consideran dos ondas con constante propagación β_0 y β_1 respectivamente, las cuales son propagadas en direcciones

opuestas. Estas ondas serán acopladas solo si satisface la condición de coincidencia de fase de Bragg, mediante la siguiente ecuación:

$$|\beta_0 - \beta_1| = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.45)$$

Donde Λ representa el periodo de la rejilla. Considerando que la constante de propagación β_1 se propaga de izquierda a derecha en la fibra, además tomando en cuenta que la energía del modo de propagación hacia adelante de una onda con una longitud de onda adecuada se acopla a un modo de propagación hacia atrás [2, p. 130]. La energía de esta onda se acoplará únicamente si se cumple lo siguiente:

$$|\beta_0 - (-\beta_0)| = 2\beta_0 = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.46)$$

Como se le mencionó anteriormente las FBG consisten en la variación del índice de refracción con un periodo Λ . En la figura 2.7 se puede apreciar que al lanzar una luz en un extremo de la fibra que contiene una rejilla de Bragg, parte de la luz coincidente con la longitud de onda de la rejilla de Bragg se reflejará de regreso y el resto de la luz será transmitida [20, p. 52].

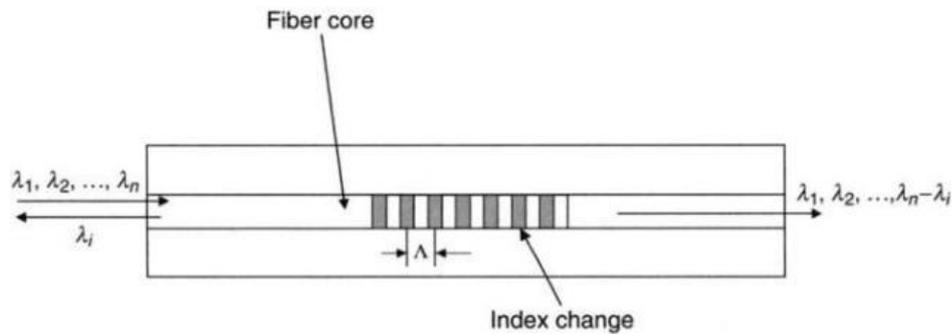


FIGURA 2.7. Diagrama esquemático de una rejilla de Bragg [20, p. 53].

Conociendo que $\beta_0 = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B}$, siendo n_{eff} el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra y λ_B la longitud reflejada de la rejilla de Bragg. Partiendo de la condición de coincidencia de fase de la ecuación (2.45) y reemplazando la variable β_0 en la ecuación (2.46) se obtiene lo siguiente:

$$2 \left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.47)$$

Al reducir la ecuación (2.47) la longitud de onda de la rejilla de Bragg puede expresarse como:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.48)$$

De la ecuación (2.48) se aprecia que la longitud de onda de la rejilla de Bragg depende del índice efectivo de la fibra y del periodo de la rejilla. Concluyendo que las FBG pueden utilizarse como dispositivos MUX/DEMUX WDM para extraer señales con una longitud de onda determinada de un flujo de señales.

2.2.1.2. Propiedades de la FBG

Las rejillas se califican en rejillas de periodo corto o de periodo largo. Como se lo mencionó anteriormente, las rejillas de Bragg son denominadas de periodo corto ya que su periodo es comparable a una longitud de onda de alrededor de $0.5\mu m$ [2, p. 132]. En la ecuación (2.49) se puede apreciar cómo se obtiene el valor aproximado del periodo de una rejilla de Bragg.

Considerando $n_{eff} \approx 1.45$ que es un valor aproximado del índice de refracción del núcleo de las fibras ópticas y $\lambda_B = 1550nm$ que es una longitud de onda de trabajo común en comunicaciones ópticas. Al reemplazar estos valores en la ecuación (2.48) se puede obtener el siguiente valor aproximado del periodo de la rejilla de Bragg:

$$\Lambda \approx \frac{1550nm}{2*1.45} \approx 0.5\mu m \quad (2.49)$$

En aplicaciones DWDM las pérdidas de inserción, la diafonía, el ancho de banda de paso y la estabilidad de la longitud de onda, son parámetros muy importantes. En una FBG la pérdida de inserción vienen dada principalmente por la reflectividad de la rejilla [20, p. 54]. La ecuación que define la reflectividad en una FBG se puede expresar como:

$$R = \tanh^2 \left[\frac{\pi \Delta n L}{\lambda} \left(1 - \frac{1}{V^2} \right) \right] \quad (2.50)$$

Donde, Δn es la variación del índice de refracción, L la longitud de la rejilla y V la frecuencia normalizada de la fibra. De la ecuación (2.50) se observa que la reflectividad de la rejilla es directamente proporcional a la variación del índice de refracción y a la longitud de la rejilla.

En aplicaciones DWDM es muy importante tener una baja diafonía entre canales adyacentes. Para estas aplicaciones se desea tener una alta reflectividad, regularmente mayor al 95%. Dependiendo de la variación del índice de refracción de la rejilla se puede presentar más o menos diafonía, a causa de los lóbulos laterales producidos por la reflexión. En la figura 2.8 se puede apreciar el espectro de dos técnicas de variación de índice de refracción, en la línea discontinua se tiene el espectro de una variación uniforme de índice de refracción, el cual es un espectro de reflexión típico en rejillas para aplicaciones WDM. Se observa que además del pico de reflexión, se presentan varios

lóbulos laterales en las longitudes de onda adyacentes, debido a las múltiples reflexiones de los extremos opuestos de la región de rejilla de Bragg [20, p. 54].

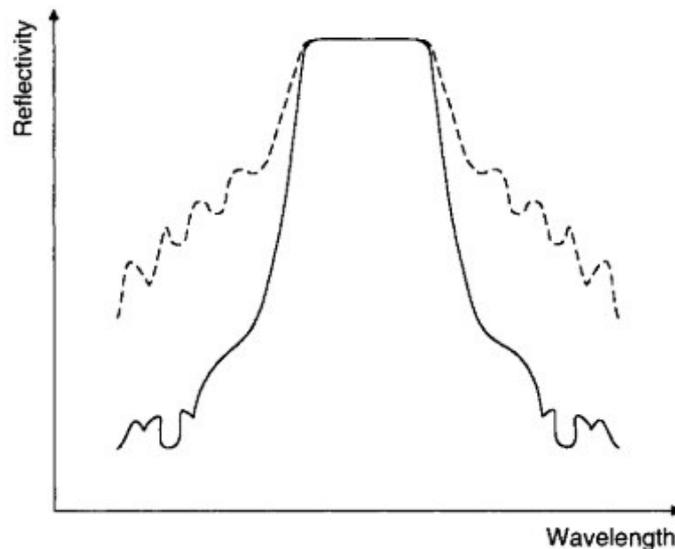


FIGURA 2.8. Espectro de reflexión típico de una rejilla de Bragg de fibra para aplicaciones WDM, donde las curvas discontinuas y sólidas corresponden al espectro de una rejilla uniforme y al de una rejilla apodizada, respectivamente [20, p. 55].

Para reducir los lóbulos laterales, se ha desarrollado una técnica denominada de apodización. Esta técnica se aprecia en la curva de línea continua de la figura 2.8, consiste en que la variación del índice de refracción ya no es uniforme en toda la rejilla, sino que varía gradualmente hacia el final de la rejilla, reduciendo las reflexiones múltiples en los extremos de la rejilla. Los lóbulos laterales se reducen significativamente hasta 20 dB al implementar la técnica de apodización [20, p. 55].

Otro parámetro para tomar en cuenta en las FBG es el ancho de banda medio máximo que está dado por la siguiente expresión:

$$BW = \lambda_B \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{m}\right)^2} \quad (2.51)$$

Donde Δn es la variación del índice de refracción, n_0 el índice de refracción del medio y m el número de planos de la rejilla. En la ecuación (2.51) se aprecia que el ancho de banda aumenta con la variación del índice de refracción.

Otro aspecto importante para tomar en cuenta en una FBG es que la longitud de onda de la rejilla de Bragg varía con la tensión y la temperatura de la fibra, debido a que ambos parámetros afectan directamente al periodo de la rejilla y al índice de refracción efectivo.

La ecuación que relaciona el desplazamiento de la longitud de onda y la deformación ε viene dado por:

$$\Delta\lambda_s = \lambda_B(1 - p)\varepsilon \quad (2.52)$$

Donde p es una constante óptica de deformación efectiva y una función del índice de refracción efectivo. La variación de la longitud de onda producida por la temperatura está relacionada con la expansión de la fibra y el coeficiente térmico de índice de refracción del núcleo de la fibra. Por ende el cambio de índice de refracción a causa de la temperatura es la principal causa del cambio de longitud de onda [20, p. 56]. La expresión que describe el desplazamiento de la longitud de onda inducido por la temperatura puedes expresarse como:

$$\Delta\lambda_T = \lambda_B \frac{1}{n_{eff}} \Delta T \frac{dn}{dT} \quad (2.53)$$

La desviación provocada por temperatura de la longitud de onda central es aproximadamente de $13 \frac{pm}{C^\circ}$. Para aplicaciones MUX/DEMUX la desviación de longitud de onda por temperatura es compensada con la desviación de longitud de onda producida por tensión. De modo que el embalaje térmico se diseña para que la FBG se comprima con el aumento de temperatura y se estire con la disminución de la temperatura, de forma que las desviaciones de longitud de onda inducidas por tensión se compensen con las inducidas por la temperatura.

La rejilla de Bragg de fibra tiene una dispersión cromática negativa relativamente grande, por lo que no es adecuada para los sistemas de transmisión de larga distancia de alta tasa de bits. Sin embargo, la propiedad de dispersión cromática de la rejilla de fibra de Bragg se ha utilizado activamente para compensar la dispersión cromática de las fibras ópticas estándar [20, p. 57].

2.2.1.3. FBG con distribución uniforme de índice de refracción

Este tipo de FBG se caracteriza por tener una variación uniforme del índice de refracción del núcleo de la fibra. La forma en la que varía el índice de refracción se puede observar en la figura 2.9 y está dada por la siguiente ecuación.

$$n_{(z)} = \bar{n} + n_g \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (2.54)$$

Donde, \bar{n} representa el índice de modo medio, n_g denota la profundidad de modulación (normalmente 10^{-4}), z la longitud de la fibra y Λ el periodo de la rejilla [6, p. 299].

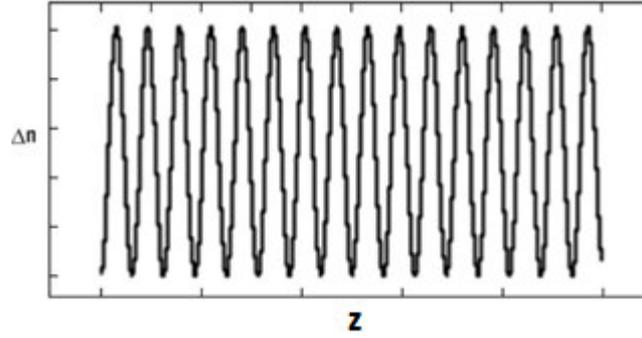


FIGURA 2.9. Periodo uniforme de una FBG [6, p. 300].

La reflectividad de la rejilla llega a ser casi del 100% dentro de la banda de parada (banda de frecuencia en la que longitudes de onda específicas son reflejadas). Fuera de la banda de parada, existe una posible dispersión inducida por la rejilla, ya que la fase es casi lineal allí.

Para el análisis de la rejilla de Bragg se utiliza la ecuación de modos de acoplamiento. Esta ecuación describe el acoplamiento entre las ondas que se propagan hacia adelante y hacia atrás a una frecuencia dada ω . Dichas ecuaciones se expresan como:

$$\frac{dA_f}{dz} = i\delta A_f + iKA_b \quad (2.55)$$

$$\frac{dA_b}{dz} = -i\delta A_b - iKA_f \quad (2.56)$$

De las expresiones anteriores A_f representa la amplitud espectral de la onda que se propaga hacia adelante y A_b la amplitud de la onda que se propaga hacia atrás.

Además δ representa la desintonía con respecto a la longitud de onda de Bragg λ_B y K denota el coeficiente de acoplamiento. Estos parámetros vienen dados por las siguientes expresiones:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} - \frac{2\pi}{\lambda_B}, K = \frac{\pi n_g \Gamma}{\lambda_B} \quad (2.57)$$

Donde Γ es el coeficiente de confinamiento y viene dado por, $\Gamma = \frac{P_{core}}{P_{total}} = 1 - e^{-\frac{2a^2}{\omega^2}}$, siendo a el radio del núcleo y ω el radio del campo también conocido como tamaño del punto.

Las ecuaciones de los modos de acoplamiento se pueden resolver analíticamente debido a su naturaleza lineal. La función de transferencia de las rejillas que actúan como filtro óptico reflectivo es:

$$H(\omega) = r(\omega) = \frac{A_b(0)}{A_f(0)} = \frac{iK \sin(qL_g)}{q \cos(qL_g) - i\delta \sin(qL_g)} \quad (2.58)$$

Donde, $q^2 = \delta_2 - K_2$ y L_g representa la longitud de la rejilla. La condición ($KL_g = 3$) significa que la banda de parada y la reflectividad de la rejilla son casi del 100% [6, p. 299].

2.2.1.4 FBG apodizada con distribución uniforme de índice de refracción

La FBG con variación de índice de refracción uniforme presenta una interferencia en el pico principal del espectro de reflexión debido a la presencia de una serie de lóbulos laterales en longitudes de onda adyacentes. En un MUX/DEMUX WDM los espectros de reflectancia con lóbulos laterales pueden causar interferencia entre canales, para solucionar este problema, las FBG deben tener una línea de reflectancia nítida correspondiente a la longitud de onda de reflexión, con el fin de reducir y si es posible de eliminar los lóbulos laterales en el espectro de reflexión [23, p. 1][24, p. 11].

Los lóbulos laterales indeseables de una FBG pueden reducirse significativamente apodizando la rejilla, tal como se lo aprecia en la figura 2.8. La apodización consiste en reducir la intensidad de la rejilla en sus extremos. En la figura 2.10 se aprecia esta variación de intensidad de la rejilla, de modo que el cambio del índice de refracción es gradual y no abrupto. Este proceso se lo hace mediante una función apodizada que varía lentamente con la longitud de la rejilla [23, p. 2].

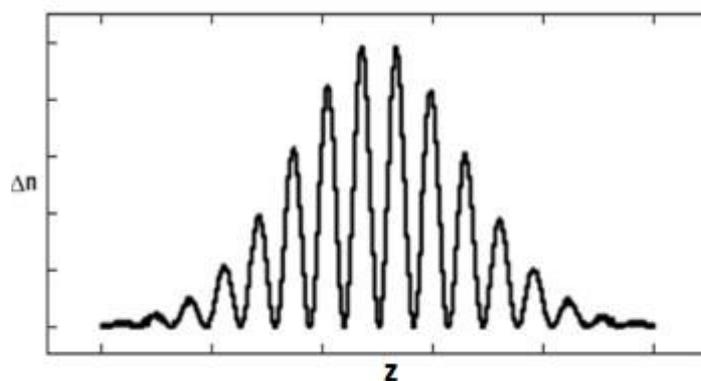


FIGURA 2.10. Apodización para una FBG de periodo uniforme [6, p. 300].

Existen varias formas de perfiles de apodización, las principales formas que son implementadas usualmente vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

Uniforme

$$A(z) = 1 \quad 0 \leq z \leq L \quad (2.59)$$

Gaussiano

$$A(z) = \exp \left\{ -\ln 2 \left[\frac{2(z - \frac{L}{2})}{sL} \right]^2 \right\} \quad \text{Donde } s = 0.5, \quad 0 \leq z \leq L \quad (2.60)$$

Tangente hiperbólica

$$A(z) = \tanh\left(\frac{sz}{L}\right) \tanh\left[s\left(1 - \frac{z}{L}\right)\right] + 1 - \tanh^2\left(\frac{s}{2}\right) \quad \text{Donde } s = 0.5, 0 \leq z \leq L \quad (2.61)$$

Donde z es la distancia a lo largo de la rejilla de Bragg, L es la longitud de la rejilla de Bragg y s es el parámetro de anchura de Gauss, similar a lo que sucede con la función *Tanh* [25, p. 4][26].

2.2.2. CIRCULADORES ÓPTICOS

Un circulador óptico es básicamente un componente no recíproco de tres puertos de entrada y tres puertos de salida. Tienen una amplia gama de aplicaciones en sistemas de comunicación óptica. En la figura 2.11 (a) se aprecia un ejemplo del uso de circuladores con FBG, en esta aplicación el circulador óptico tomará la señal reflejada de la FBG y la redirigirá a la salida. Por otro lado, también se puede usar acopladores direccionales de fibra de 3 dB para realizar la misma tarea como se muestra en la figura 2.11 (b). Sin embargo, el uso de acopladores presenta una limitación, ya que la pérdida de inserción en este caso será de 6 dB debido a que la señal viaja de ida y vuelta en el acoplador.

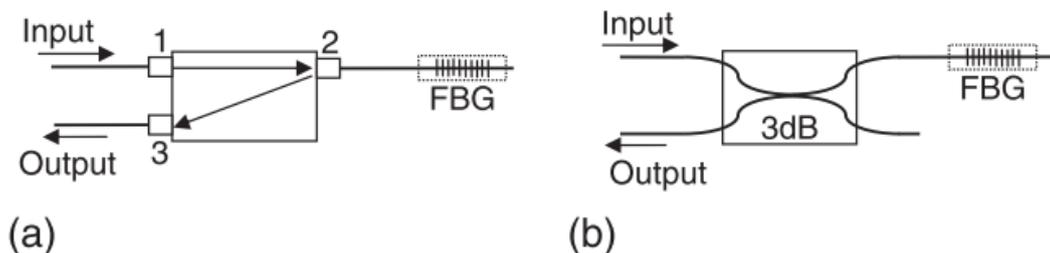


FIGURA 2.11. Reflexión FBG redirigida usando (a) circuladores (b) acopladores de 3 dB [19, p. 357].

2.2.2.1. Principio de funcionamiento

Los circuladores se clasifican en dos categorías: dependientes de la polarización, que solo funcionan para una luz con una determinada polarización, y circuladores independientes de la polarización que funcionan independiente de la polarización de la luz [20, p. 85].

Un circulador óptico independiente de la polarización está formado de material de birrefringencia YVO4 como desplazadores de luz del Haz y BI-YING para rotadores de Faraday, tal como se lo aprecia en la figura 2.12. Estos elementos deben estar configurados de modo que permitan que la luz que circula hacia atrás sea recogida por el puerto 3 [19, p. 357].

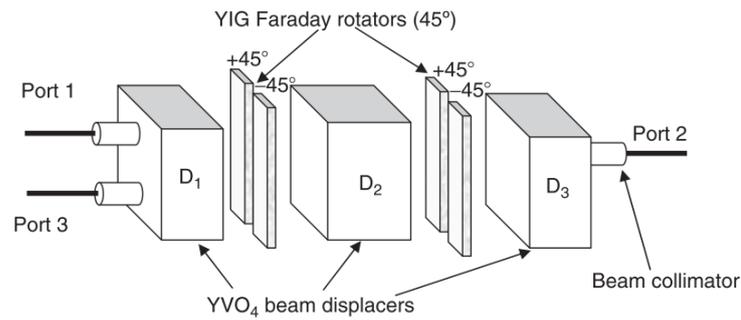


FIGURA 2.12. Configuración de un circulator independiente de la polarización [19, p. 357].

En la figura 2.13 se puede apreciar el principio de funcionamiento de un circulator. En la propagación hacia adelante, un haz de luz entra al puerto 1 y es dividido en dos haces horizontal y vertical debido al primer desplazador (D1). Estos dos haces luego pasan por dos rotadores de Faraday separados. El rotador izquierdo (a1) rota el haz en $+45^\circ$ y el rotador (b1) rota el haz en -45° , esta acción la realizan sin desplazar sus posiciones espaciales. Luego de pasar por los rotadores de Faraday los dos haces se copolarizan, como se aprecia en la figura los dos haces tiene la misma polarización en el desplazador D2. En los segundos rotadores de Faraday, (a2) rota el haz en $+45^\circ$ y (b2) rota el haz en -45° haciendo que los dos haces de luz sean ortogonales entre sí. Finalmente, el desplazador (D3) combina los dos haces en uno a la salida, obteniendo la señal óptica de entrada, pero con una rotación de polarización de 90° .

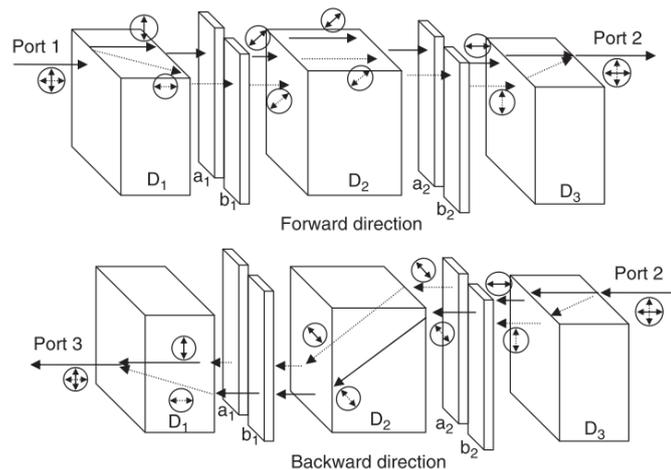


FIGURA 2.13. Principio de funcionamiento de un circulator óptico [19, p. 358].

Por otro lado, en la figura 2.13 también se aprecia la propagación hacia atrás, así se observa que el haz de luz entra por el puerto 2 y es dividido en dos haces por el desplazador (D3). Debido a la propiedad no recíproca, el rotador (a2) rota el haz en $+45^\circ$ y (b2) rota el

haz en -45° , todo esto en la misma dirección que la rotación de los haces de luz propagados hacia adelante, Por otro lado, en el desplazador D2, los haces están nuevamente copolarizados pero con orientación contraria a los haces de luz en propagación hacia adelante. Debido a esa rotación de orientación, los haces con propagación hacia atrás no seguirán la misma ruta que los haces de luz propagados hacia adelante en el desplazador (D2). Luego los dos haces pasan por los primeros rotadores de Faraday, (a1) rota el haz en $+45^\circ$ y (b2) rotal el haz en -45° . Finalmente, en el desplazador (D1) los haces se encuentran ortogonales entre sí, estos se combinan en el puerto 3 del lado de entrada, que se halla en una ubicación espacial diferente a la del puerto 1.

2.2.2.2. Propiedades de un circulador óptico

En un circulador se tiene varios parámetros de los cuales los más importantes son: la pérdida de inserción, pérdidas de retorno, el aislamiento, pérdida dependiente de la polarización (PDL, *Polarization-Dependent Loss*), dispersión de modo de polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*) y la direccionalidad [20, p. 89]. En la figura 2.14 se aprecia que la pérdida de inserción para un circulador de tres terminales incluye las pérdidas del puerto 1 al puerto 2 y del puerto 2 al puerto 3. Del mismo modo, el aislamiento incluye el aislamiento del puerto 2 al puerto 1 y del puerto 3 al puerto 2. La direccionalidad se define por la pérdida del puerto 1 al puerto 3 cuando el puerto 2 está bloqueado y no presenta reflexión [19, p. 360].

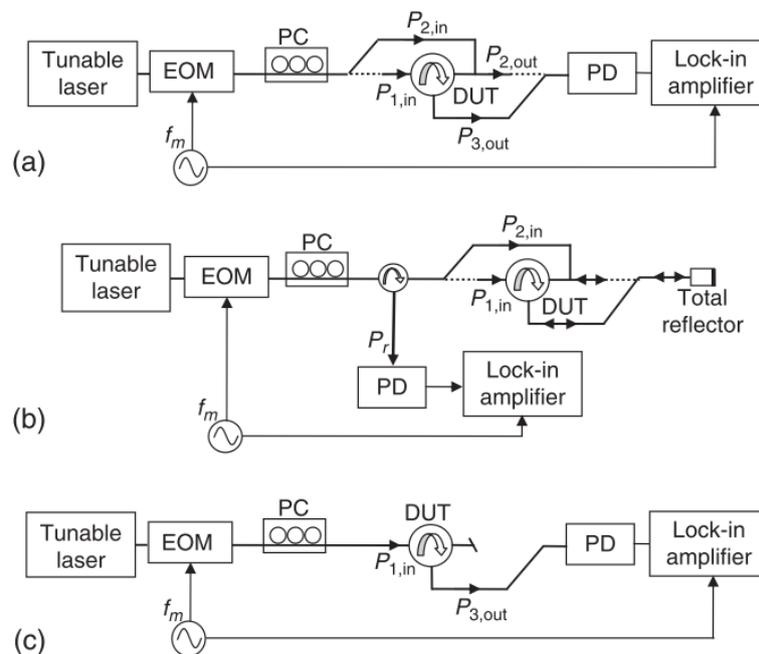


FIGURA 2.14. Medición (a) de la pérdida de inserción del circulador óptico, (b) del aislamiento y (c) de la direccionalidad [19, p. 361].

Sin embargo, las pérdidas mencionadas anteriormente dependen del diseño y los materiales con los que se construyen los circuladores ópticos. Las principales diferencias entre los distintos diseños son la estabilidad del rendimiento, el tamaño y el coste. Un circulador óptico típico que no depende del diseño que funciona a una longitud de onda de 1550 nm presenta pérdidas de inserción de unos 0.8 a 1 dB, un aislamiento de 40 dB, una PDL de menos de 0.1 dB, una PMD de menos de 0.1 dB y pérdidas de retorno de 50 dB [20, p. 92] [19, p. 361].

2.2.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MUX/DEMUX BASADOS EN FBG Y CIRCULADORES

El principio de funcionamiento y configuración de los componentes de un MUX/DEMUX WDM construido a partir de varios FBG y circuladores, varía dependiendo de la tarea que se realizará (Multiplexar o Demultiplexar).

2.2.3.1 Configuración de un multiplexor

En la figura 2.15 se aprecia la configuración de FBG y circuladores para la construcción de un multiplexor WDM para 4 longitudes de onda. El funcionamiento consiste en que el primer circulador toma una longitud de onda por el puerto 1 y la transmite al puerto 2. Luego la primer FBG refleja la señal que llega por el puerto 2 del circulador y además transmite otra longitud de onda por uno de sus puertos. Las longitudes de onda transmitidas por la FBG entran por el puerto 2 del circulador, posteriormente son combinadas y obtenidas por el puerto 3 del mismo. El procedimiento es básicamente el mismo para las siguientes etapas de multiplexación, con la diferencia de que las FBG posteriores reflejaran una longitud de onda por el puerto 1 del circulador ya que las siguientes longitudes de onda a multiplexar ingresan por el puerto 3 del circulador, además de que las longitudes de onda combinadas se obtendrán en el puerto 2 del circulador.

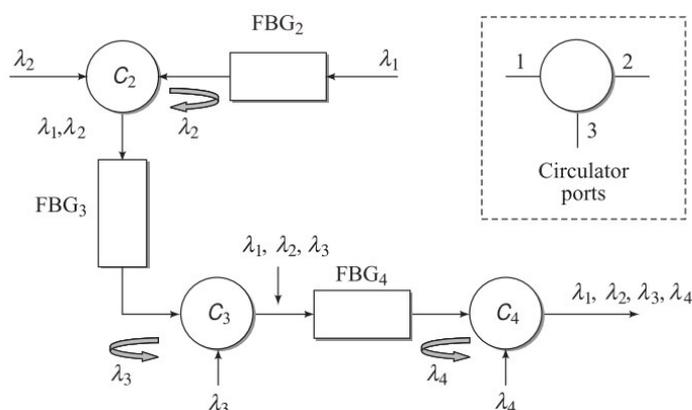


FIGURA 2.15. Configuración de un multiplexor para 4λ basado en FBG y circuladores [13, p. 403].

2.2.3.2. Configuración de un demultiplexor

La configuración de un demultiplexor monocanal basado en FBG y circuladores se puede apreciar en la figura 2.16. Básicamente un demultiplexor puede formarse conectando una FBG al puerto 2 de un circulator de 3 puertos. El funcionamiento del demultiplexor es más sencillo que el de un multiplexor, una señal óptica que contiene N longitudes de onda se lanza por el puerto 1 del circulator, una de las N longitudes de onda es reflejada por la rejilla y extraída a través del puerto 3 del circulator, y el resto de longitudes de onda pasan por la rejilla sin ser afectadas [20, p. 57]. Este principio de funcionamiento es repetido varias veces hasta demultiplexar las N longitudes de onda que ingresan por el puerto 1 del circulator.

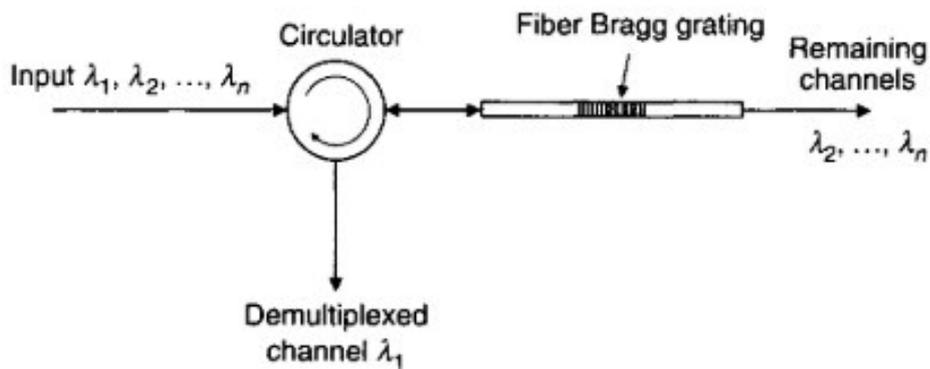


FIGURA 2.16. Configuración de un demultiplexor monocanal basado en FBG y circuladores [20, p. 57].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En ese capítulo se desarrollan e implementan diferentes escenarios de simulación posibles con los MUX/DEMUX WDM presentados en el capítulo anterior. El objetivo principal es realizar las pruebas necesarias que validen el marco teórico de los dispositivos implementados y configurados de tal manera que inserten o separen longitudes de onda de forma óptima. El software de simulación utilizado es OptiSystem de OptiWave, mismo que permite modelar escenarios de comunicaciones ópticas.

Se realizarán simulaciones en diferentes escenarios, donde se variará el espaciamiento de canal en base al estándar DWDM para 100 GHz, 50 GHz y 25 GHz. Cada escenario se simulará variando la velocidad de transmisión en un rango de 4 Gbps a 50 Gbps por canal. Debido a que se trabajará con espaciamientos de canal relativamente pequeños, las velocidades utilizadas dependerán del tipo de tecnología con la que están contruidos los MUX/DEMUX WDM. Estas simulaciones se realizarán para los distintos tipos de MUX/DEMUX WDM de 4 y 8 canales, cada canal tendrá una longitud de onda central dentro de la banda C del estándar DWDM y en cada escenario de simulación se trabajará con una longitud de onda inicial de 193.1 THz.

Se tomará de referencia la banda C para las simulaciones debido a que las soluciones comerciales utilizan principalmente esta banda. Todas las pruebas de simulación estarán basadas en el estándar DWDM, por lo que no se realizarán pruebas con el estándar CDWM ni en otra banda del espectro que sea parte del estándar DWDM como la banda S o L. Adicional se debe acotar que la variación de la frecuencia central depende exclusivamente del espaciamiento de canal, ya que en cada canal se tendrá una frecuencia o longitud de onda diferente para cada espaciamiento de canal.

Para determinar el comportamiento de cada tecnología MUX/DEMUX WDM se varía los parámetros ya mencionados, de manera que se pueda comparar y concluir el comportamiento de cada tecnología. Se analizará la respuesta en frecuencia, OSNR (*Optical Signal Noise Ratio*), BER (*Bit Error Rate*), factor Q y el diagrama de ojo para obtener resultados que permitan estimar el desempeño de cada tecnología MUX/DEMUX WDM.

3.1. SOFTWARE OPTISYSTEM

OptiSystem es un software de simulación de sistemas de comunicaciones ópticas y su selección se debe a que permite diseñar, probar y optimizar cualquier diseño de enlace óptico. Es un software independiente de otros marcos de simulación y se basa en el modelado realista de sistemas de comunicaciones de fibra óptica [27].

OptiSystem es un software licenciado que ofrece versiones de prueba de 30 días. Para la realización de este capítulo se han utilizado las versiones de prueba 16, 17 y 18. En el marco de presentación del software se muestra una pequeña introducción a los requerimientos y proceso de instalación, además de las herramientas más importantes que se necesitan para el desarrollo de este capítulo.

3.1.1. REQUERIMIENTOS Y PROCESO DE INSTALACIÓN

OptiSystem es un software de simulación que solo se ejecuta en sistemas operativos Windows, los cuales deben tener ciertas características mínimas para un óptimo rendimiento, estos requerimientos son:

- Procesador con una velocidad de reloj mayor a 2 GHz de 2 o 4 núcleos.
- 8 GB de RAM.
- Versiones recomendadas de 64 bits para Windows 7/8.1/10
- Espacio libre en el disco Duro de 400 MB.
- Resolución de gráficos mínimos de 1024x768.

Para el proceso de instalación es necesario cumplir con los requerimientos mínimos y tener una cuenta de registro en la página web de OptiWave. Los pasos por seguir son:

1. Dirigirse a la siguiente página web y descargar la versión más actual del software con el que se desea trabajar. Enlace: <https://optiwave.com/>
2. En el apartado de Downloads, escoger la opción de 30 días de evaluación para una versión de prueba obtenida después del registro y seleccionar la versión 18 de 64 bits de OptiSystem.

Evaluations	Description
 OptiSystem 18 64-bit	Optical Communication System Design Software
 OptiInstrument 3 64-bit	Communicate and control different kinds of instruments.
 OptiSPICE 6 64-bit	Opto-Electronic Circuit Design Software
 OptiGrating 4 64-bit	Optical Grating Design Software
 OptiFiber 2 64-bit	Optical Fiber Design Software
 OptiFDTD 16 64-bit	Finite-Difference Time-Domain Design Software
 OptiFDTD 15 64-bit	Finite-Difference Time-Domain Design Software
 OptiBPM 13 64-bit	Waveguide Optics Design Software

FIGURA 3.1. Software disponible en Optiwave.

3. Almacenar el archivo ejecutable .exe y ejecutar con permisos de administrador.
4. Escoger un sitio donde almacenar los archivos de configuración e instalación del programa, aceptar la opción de instalar ejemplos de simulaciones.
5. Finalmente reiniciar el computador.

3.1.2. DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX WDM CON SUS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

OptiSystem dispone de un gran número de librerías y una extensa lista de dispositivos ópticos y eléctricos que se pueden usar para el análisis de simulación, cuenta también con una interfaz gráfica de usuario la cual tiene 5 ventanas principales:

- Diseño del Proyecto (*Project layout*): Es el área de trabajo donde se insertan, editan y se hacen conexiones de los componentes.
- Contenedores (*Dockers*): Los Dockers es el área donde se encuentran: la biblioteca de contenidos (*Component Library*), en la que se accede a los componentes para crear el diseño del sistema; el navegador de proyectos (*Project Browser*) que es donde los proyectos se organizan de forma eficiente y la Descripción muestra información detallada sobre el proyecto actual.
- Barra de estado (*Estatus Bar*): Muestra información sobre el cálculo del proyecto, consejos útiles sobre el uso de OptiSystem y otras ayudas.

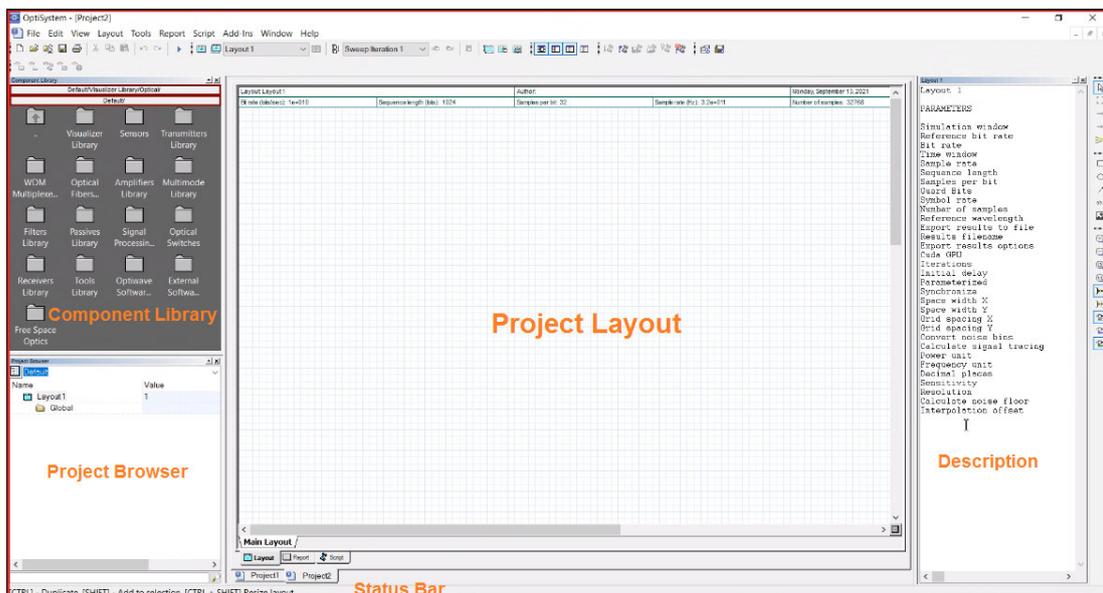


FIGURA 3.2. Ventanas principales de OptiSystem.

Los dispositivos utilizados para el desarrollo de las pruebas se encuentran en la ventana de la biblioteca de contenidos, los dispositivos interferómetro Mach-Zehnder y filtros de

difracción de Bragg se encuentran en la librería de filtros, mientras que los circuladores se encuentran en la librería de elementos pasivos. Las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 muestran las librerías y dispositivos a utilizar en las simulaciones.



FIGURA 3.3. a) Librería de Filtros dentro la biblioteca de Contenidos, b) Interferómetro Mach-Zenhder

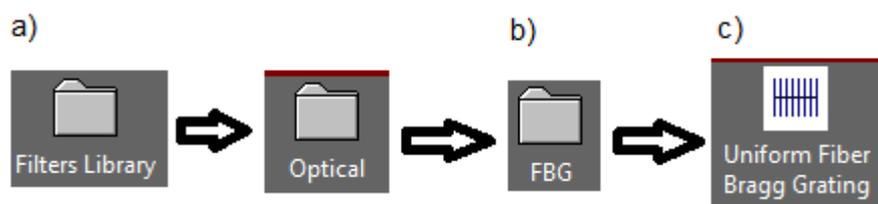


FIGURA 3.4. a) Librería de Filtros dentro la biblioteca de Contenidos, b) Carpeta FBG, c) Uniform Fiber Bragg Grating-FBG.

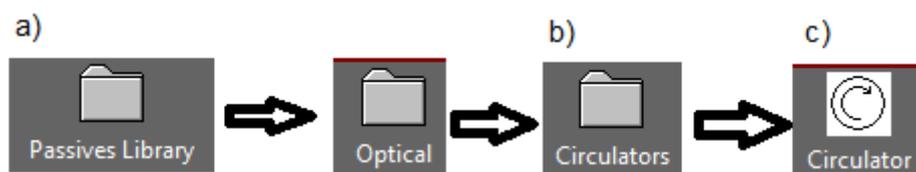


FIGURA 3.5. a) Librería de Elementos Pasivos dentro la biblioteca de Contenidos, b) Carpeta Circuladores, c) Circulador en OptiSystem.

Para las simulaciones se utilizó dos herramientas necesarias para transmitir y detectar las señales. El primer dispositivo es el transmisor WDM que genera las señales ópticas con espaciamientos de canal según el número de canales en un solo bloque. La Figura 3.6 muestra los parámetros característicos y el bloque transmisor ubicados en la librería de transmisores ópticos, en donde se puede cambiar con facilidad la longitud de onda central de inicio, el espaciamiento de canal, potencia óptica, número de canales y el tipo de modulación. Este bloque será utilizado para todas las simulaciones posteriores.

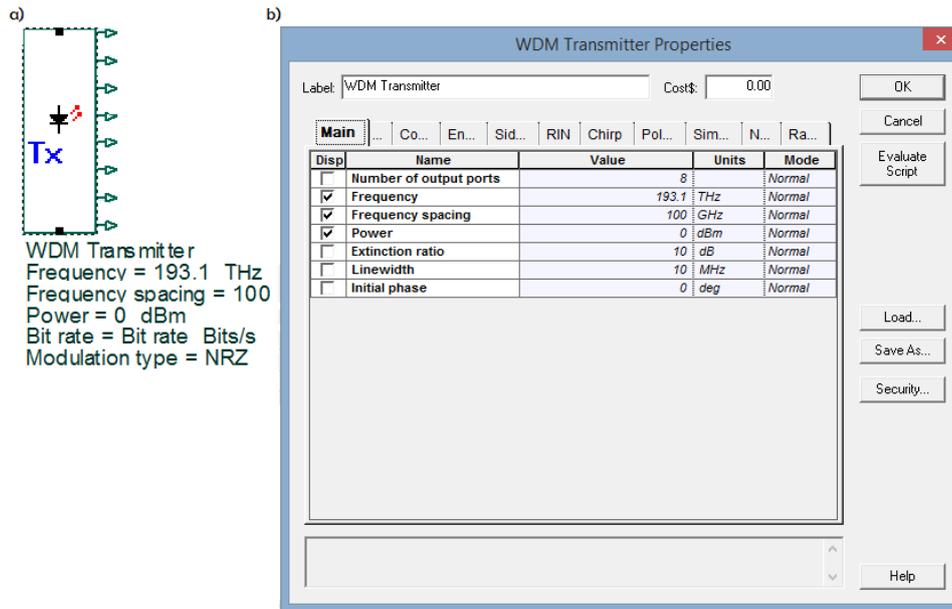


FIGURA 3.6. a) Componente Transmisor WDM, b) Parámetros a modificar en el bloque transmisor WDM.

En la figura 3.7 se muestra el receptor óptico, el cual se encarga de detectar, demodular y de realizar el proceso 3R de regeneración, reshaping y retiming de la señal eléctrica con la cual se puede obtener parámetros de medición del comportamiento de las señales. Este se encuentra en la librería de receptores ópticos. El receptor óptico se ubica en cada salida del demultiplexor.

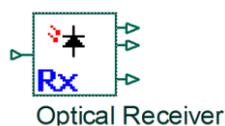


FIGURA 3.7. Receptor.

Para la construcción de los diferentes tipos de MUX/DEMUX WDM se hará uso de los componentes que se muestran en la figura 3.8. En el literal a de la figura 3.8 se observa el elemento *Mach Zehnder Interferometer*, que será utilizado en este capítulo para la construcción de un MUX/DEMUX WDM basado en MZI. Por otro lado en los apartados d, e y f de la figura 3.8 se aprecian los elementos *Reflective Filter Bidirectional*, *Uniform Fiber Bragg Grating* y *Circulator* respectivamente, estos elementos serán utilizados para implementar una configuración de un multiplexor y demultiplexor basado en FBG y circuladores. Finalmente en los apartados b y c de la figura 3.8 se presentan los elementos *WDM Mux* y *WDM Demux* respectivamente que serán utilizados en este capítulo para

comparar su comportamiento con los MUX/DEMUX WDM implementados a partir de MZI y FBG con circuladores.

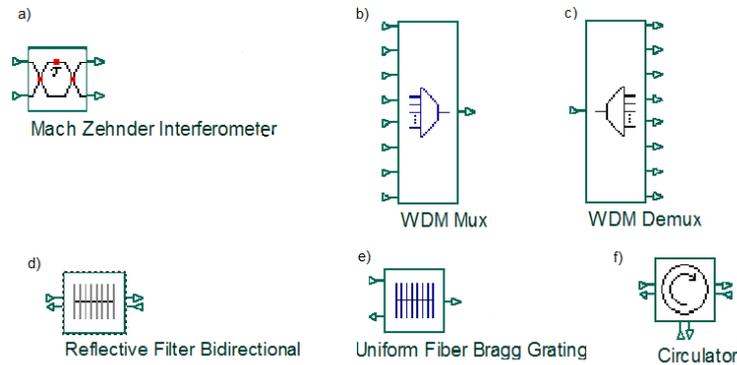


Figura 3.8. Elementos usados para la construcción de MUX/DEMUX WDM

OptiSystem también contiene varios elementos para visualizar los resultados de simulación. En la figura 3.9 se presenta los elementos de visualización que se usarán en este capítulo para obtener y analizar los resultados de la simulación de los MUX/DEMUX WDM. Estos elementos se pueden encontrar en la librería de visualización.

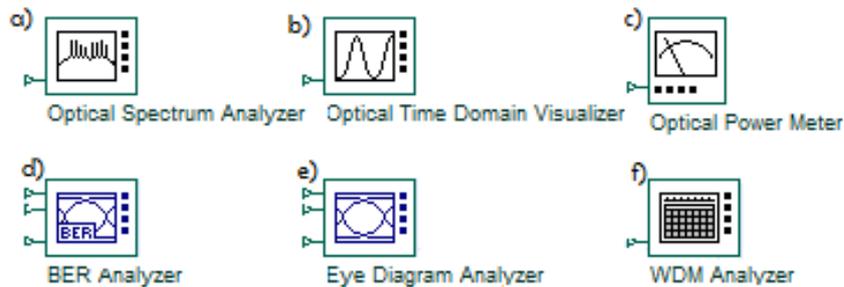


Figura 3.9. Elementos de visualización y análisis.

El elemento de la figura 3.9.a muestra el *Optical Spectrum Analyser* que permite visualizar las señales ópticas en el dominio de la frecuencia. En la figura 3.9.b se aprecia una *Optical Time Domain Visualizer*, que como su nombre lo indica permite visualizar señales ópticas en el dominio del tiempo. El elemento de la figura 3.9.c es un *Optical Power Meter* cuya función es medir la potencia de salida en cualquier punto de terminación de un sistema o enlace óptico. El elemento *WDM Analyzer* se puede apreciar en la figura 3.9.f, es un elemento importante en el análisis de este capítulo, ya que detecta, calcula y permite visualizar automáticamente la potencia óptica, ruido, OSNR, frecuencia de ruido, frecuencia y longitud de onda para cada canal en la entrada del visualizador. Todos los elementos mencionados anteriormente son elementos de visualización ópticos, sin embargo, OptiSystem también cuenta con elementos de visualización eléctricos, mismos que se

muestran en las figuras 3.9.d y 3.9.e estos son *BER Analyzer* y *Eye Diagram Analyzer*. El elemento *BER Analyzer* calcula el rendimiento del sistema, puede predecir la BER, el factor Q, el umbral y la apertura de ojo en un sistema, mientras que el elemento *Eye Diagram Analyzer* permite calcular y mostrar automáticamente el diagrama de ojo de la señal eléctrica, a partir del diagrama de ojo se puede calcular diferentes métricas como el factor Q, la apertura de ojo, el cierre de ojo, relación de extinción, la altura de ojo, la relación de máscara, etc. También puede mostrar histogramas y máscaras de ojo estándar [28].

3.2. SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX CON INTERFERÓMETROS MACH-ZEHNDER

Para el desarrollo de esta sección, se hará uso de los elementos mostrados en el apartado 3.8.a para la realización de un sistema de comunicaciones ópticas con MUX/DEMUX WDM contruidos a partir de interferómetros Mach-Zehnder. Se presenta a continuación los parámetros característicos y el cálculo de estos con el cual se justifica la teoría.

En primer lugar, se presenta en la tabla 3.1 las longitudes de onda y frecuencias centrales que se utilizarán en todas las pruebas posteriores.

Tabla 3.1. Longitudes de onda y frecuencias centrales para las pruebas de simulación.

Longitudes de onda y frecuencias centrales para las pruebas de simulación					
Espaciamiento de canal = 100 GHz		Espaciamiento de canal = 50 GHz		Espaciamiento de canal = 25 GHz	
Frecuencia Central para Δf 0.1 THz	Longitud de onda central para $\Delta\lambda = 0.8 \text{ nm}$	Frecuencia Central para Δf 0.05 THz	Longitud de onda central para $\Delta\lambda = 0.4 \text{ nm}$	Frecuencia Central para Δf 0.025 THz	Longitud de onda central para $\Delta\lambda = 0.2 \text{ nm}$
193,1	1552,52	193,1	1552,52	193,1	1552,52
193,2	1551,72	193,15	1552,12	193,125	1552,32
193,3	1550,92	193,2	1551,72	193,15	1552,12
193,4	1550,12	193,25	1551,32	193,175	1551,92
193,5	1549,32	193,3	1550,92	193,2	1551,72
193,6	1548,51	193,35	1550,52	193,225	1551,52
193,7	1547,72	193,4	1550,12	193,25	1551,32
193,8	1546,92	193,45	1549,72	193,275	1551,12

3.2.1. MULTIPLEXOR Y DEMULTIPLEXOR CON INTERFERÓMETRO MACH-ZEHNDER MZI EN OPTISYSTEM

Esta sección se enfocará en la simulación y configuración de los parámetros para el MUX/DEMUX WDM con MZI. Las pruebas se realizarán variando distintos parámetros para

4 y 8 canales con una longitud de onda central inicial de 193.1 THz correspondiente a banda C.

El MZI que se utilizará para diseñar el MUX/DEMUX, no depende de los parámetros de ΔL ya que teóricamente se puede calcular el retardo τ . La ecuación 3.1 muestra cómo se encuentra el desfase en OptiSystem y la ecuación 3.2 muestra la relación entre el retardo y la diferencia de ruta ΔL .

$$\Delta\phi = 2\pi f\tau \quad (3.1)$$

$$\tau = \frac{n_{eff}\Delta L}{c} \quad (3.2)$$

La ecuación 2.32 muestra la fórmula para calcular ΔL , la cual se reemplaza en la ecuación 3.2 de la que se obtiene la fórmula de retardo, que se expresa de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{1}{2\Delta f} \quad (3.3)$$

Se deduce que al aumentar de etapas en el MUX WDM el ΔL es el doble de la etapa anterior provocando que el retardo de la siguiente etapa incremente de la misma manera. La figura 3.8 muestra el bloque MZI de OptiSystem con los parámetros a configurar en cada etapa.

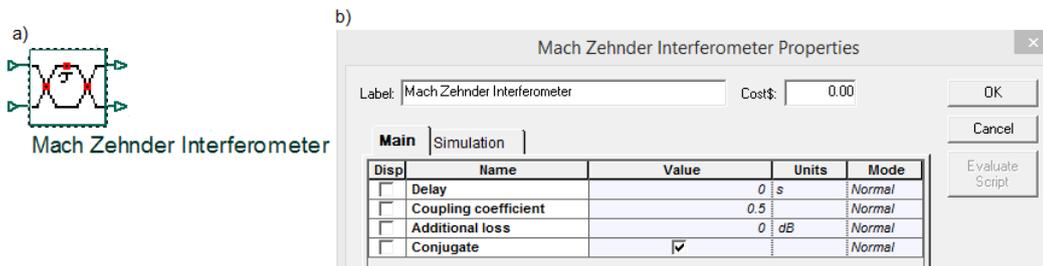


FIGURA 3.10. a) Interferómetro Mach-Zehnder disponible en OptiSystem, b) Propiedades del MZI disponible en OptiSystem.

Los parámetros que se configurarán en las simulaciones son el retardo (*Delay*) y coeficiente de acoplamiento (*Coupling coefficient*). El coeficiente de acoplamiento en la etapa inicial será de 0.5 con lo que se obtiene pérdidas teóricas de 3 dB debido al acoplador, a partir de las siguientes etapas el coeficiente de acoplamiento es de 0.15. Se justifica esta variante con el fin de adaptar mejor las señales en una de las salidas y lograr transferir la máxima potencia en uno de los brazos; mientras que el retardo es una medida en tiempo necesario para multiplexar señales en cascada, donde se requiere que el retardo sea el doble del retardo de la etapa anterior como se mencionó anteriormente; por lo tanto, la tabla 3.2 muestra el retardo hasta 8 canales con diferentes espaciamientos de canal.

Basado en las ecuaciones 2.33 y 2.34 se tiene 3 etapas con 7 MZI para multiplexar 8 señales WDM. Se debe considerar que el número de MZI de cada etapa es independiente del retardo de esta; es decir que, el retardo de la primera etapa es el mismo para 8, 4 o 2 canales para un mismo espaciamiento de canal dado y lo que cambia es el número de MZI en cada etapa.

Tabla 3.2. Ejemplo del retardo en cada etapa de la construcción del MUX WDM con MZI para la configuración del bloque MZI de OptiSystem hasta 8 canales.

Δf [GHz]	Retardo ETAPA 1 con 4 MZI [ns]	Retardo ETAPA 2 con 2 MZI [ns]	Retardo ETAPA 3 con 1 MZI [ns]
25	0,02	0,04	0,08
50	0,01	0,02	0,04
100	0,005	0,01	0,02
200	0,0025	0,005	0,01

Para el caso del demultiplexor se basará en la teoría calculada. La ecuación 3.3 muestra cómo calcular el retardo inicial, a partir de allí, los retardos son la mitad del retardo de la etapa superior, la tabla 3.3 muestra los retardos para un DEMUX WDM que separa hasta 8 canales.

Tabla 3.3. Ejemplo del retardo en cada etapa de la construcción del DEMUX WDM con MZI para la configuración del bloque MZI disponible en OptiSystem hasta 8 canales.

Δf [GHz]	Retardo ETAPA 3 con 1 MZI [ns]	Retardo ETAPA 2 con 2 MZI [ns]	Retardo ETAPA 1 con 4 MZI [ns]
25	0,02	0,01	0,005
50	0,01	0,005	0,0025
100	0,005	0,0025	0,00125
200	0,0025	0,00125	0,000625

En todos los casos del DEMUX WDM con MZI, el retardo de la etapa superior es el que se calculará primero, de allí dependiendo del número de etapas y canales a demultiplexar, el retardo es la mitad de la etapa superior, por ejemplo, el retardo de la etapa 2 es la mitad del retardo de la etapa 3. La salida de las señales demultiplexadas, salen en orden de longitud de onda pares e impares como se visualiza en la figura 3.11.

Debido a que ciertos parámetros en el software limitan la configuración correcta de los valores de retardo calculados, se han buscado valores óptimos para la eficiente multiplexación y demultiplexación, por lo tanto, en el proceso de demultiplexación los

brazos inferiores tienen valores menores a los calculados anteriormente. Esto se debe a que el bloque MZI de OptiSystem presenta una función de transferencia con una pequeña variación a la analizada en el capítulo anterior.

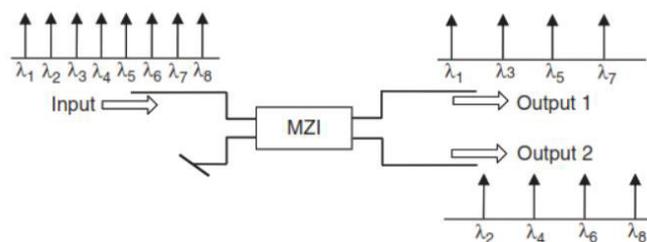


FIGURA 3.11. Ejemplo de multiplexación y demultiplexación con MZI.

En la figura 3.12, se presenta la configuración de un MUX/DEMUX de 4 canales construido en OptiSystem como un esquema general.

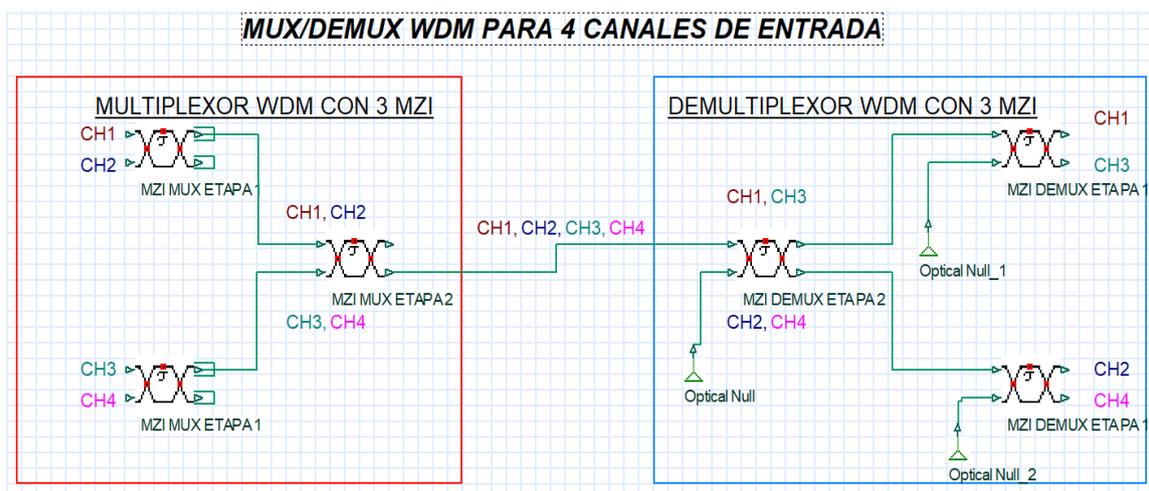


FIGURA 3.12. MUX/DEMUX WDM con MZI de 4 canales de entrada modelado en OptiSystem.

3.2.2. SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX CON MZI PARA 4 CANALES, VARIANDO EL ESPACIAMIENTO DE CANAL Y VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN

Para las siguientes simulaciones se trabajará con el escenario de transmisión y recepción de la figura 3.13, en la cual se realizarán pruebas para multiplexar y demultiplexar longitudes de onda con el dispositivo interferómetro Mach-Zehnder. Las pruebas consistirán en analizar la potencia de salida en el multiplexor, y demultiplexor con el fin de analizar el factor Q para cada escenario diseñado. Se ejecutan las pruebas para un espaciamiento de canal de 25, 50 y 100 GHz en las cuales se variarán la velocidad de transmisión para cada prueba.

SISTEMA WDM PARA 4 CANALES CON MZI

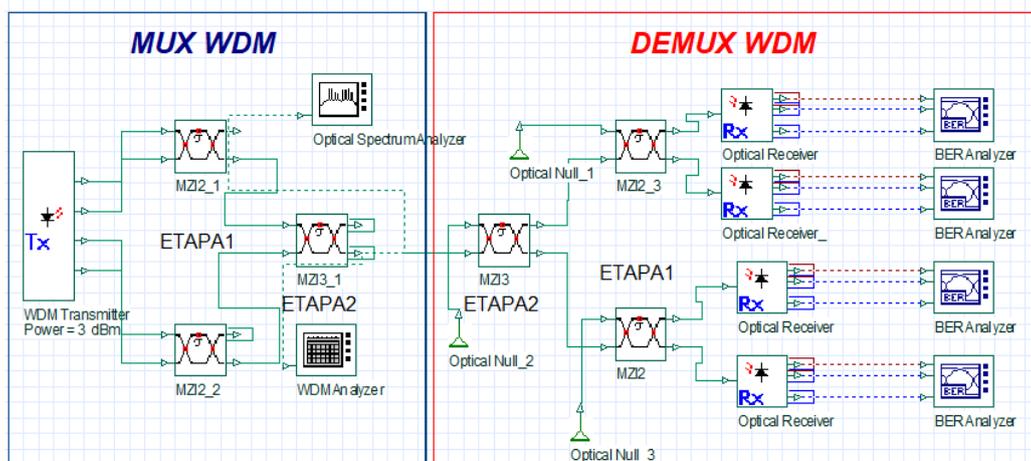


FIGURA 3.13. Sistema de comunicaciones Óptico WDM con MZI de 4 canales de modelado en OptiSystem.

Las mediciones respectivas de potencia y OSNR se hacen a la salida del multiplexor y demultiplexor utilizando el WDM Analyzer y para observar la respuesta en frecuencia de cada etapa se usa el *Optical Spectrum Analyzer*.

Además, se hace la conversión del dominio óptico a eléctrico para las mediciones estimadas del Factor Q y BER. La respuesta en frecuencia, diagrama de ojo y datos obtenidos de la simulación se presentan en los Anexos D, E y F en donde se muestra las señales multiplexadas y demultiplexadas de cada etapa para los diferentes espaciamientos de canal.

3.2.2.1. Respuesta de MUX/DEMUX WDM con MZI para 4 canales con espaciamiento de 100 GHz

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 3.14 y 3.15 mediante gráficos de Factor Q vs velocidad de transmisión y BER vs Velocidad de Transmisión respectivamente. En las figuras D.1 a la D.4 del Anexo D se muestra la respuesta en frecuencia en la que se presenta todas las salidas en cada etapa del multiplexor y demultiplexor con las diferentes frecuencias en cada etapa, se hace uso del instrumento *Spectrum Analyzer* para observar cómo se multiplexan y demultiplexan las señales. Las tablas D.1 a la D.5 del anexo D muestran los datos de potencia a las salidas del MUX/DEMUX WDM, así como el OSNR, BER y factor Q que se encuentran resumidas en las figuras 3.14 y 3.15. Estos datos fueron obtenidos mediante los componentes *BER Analyzer* y *WDM Analyzer*.

Como primer análisis, las señales WDM sufren una atenuación en términos de potencia similares en todas las velocidades. Las potencias de salida del MUX y DEMUX WDM se

muestran en la tabla 3.4 a la velocidad de 20 Gbps, en donde se observa sus pérdidas. La potencia de transmisión para cada señal óptica es de 3 dBm, valor que se configura en el *WDM Transmitter* en el apartado de potencia, mismo que se mantiene para todas las pruebas posteriores. En la salida del DEMUX WDM se presentan buenas características con relación a las pérdidas de inserción. Con respecto al OSNR se puede observar en las tablas D.1 a la D.5 que presenta valores aceptables que se encuentran en un rango entre 47 y 97 dB.

En la tabla 3.4 se puede evidenciar que sin importar la velocidad las potencias de salida de cada canal en el multiplexor y demultiplexor presentan datos idénticos y cada dispositivo introduce una pérdida estimada de 3 dB debido a los acopladores direccionales. Todos los datos de potencia en cada salida se pueden verificar en el anexo D en tablas D.1 a la D.5.

Tabla 3.4. Valores de potencia a la salida del MUX y a la salida del DEMUX a 20 Gbps.

Frecuencia (THz)	Potencia de salida del MUX (dBm)	Potencia de salida del DEMUX (dBm)
193,1	-2,887	-2,894
193,2	-2,885	-2,891
193,3	-2,745	-2,753
193,4	-2,751	-2,755

Los datos de potencia a la salida del MUX WDM fueron obtenidos con la herramienta *WDM Analyzer*, misma que brindó información detallada de los niveles de potencia y el OSNR de cada canal WDM independiente a la salida del MUX WDM y no de manera compuesta, de tal forma que se pueda comparar estas señales con la salida de cada canal en el DEMUX WDM.

Para determinar el rendimiento de cada canal y que estos cumplan con una calidad adecuada, se considera que el factor de calidad (Q) debe ser $Q > 6$ y $BER < 10^{-12}$ de tal manera que, se garantice un BER y un Q aceptables, los cuales se encuentran en las recomendaciones UIT-T 0.201 [29], [30].

Para comprender de mejor manera los resultados obtenidos, es necesario explicar cómo longitudes de onda se separan. Primero el demultiplexor debe separar los canales WDM en cada brazo, para después, en cada salida y en cada brazo de los diferentes MZI obtener una señal distinta con la mayor potencia de entrada. El demultiplexor separa longitudes de onda en un periodo de $2\Delta f$, por lo que las longitudes de onda impares (1 y 3) salen por el

brazo superior del DEMUX WDM, mientras que las señales pares (2 y 4) se demultiplexan del brazo inferior, por lo tanto, las señales 3 y 4 son aquellas señales que sufren retardos de fase por la forma de construcción del interferómetro, dicho retardo influye en el pulso ya que con el aumento de velocidad comienza a ensancharse lo cual limita la capacidad transmisión.

En la figura 3.14 se muestran 4 curvas, correspondientes a los 4 canales ópticos, del factor Q vs velocidad de transmisión con una tendencia predecible, esto como consecuencia del aumento de velocidad que provoca que la calidad del sistema se degrade; analizando la forma de la curva se visualiza que las longitudes de onda presentan un grado de correlación cuando disminuye el factor Q lo que se vuelve más evidente a ciertas velocidades. A 8 Gbps las longitudes de onda 1 y 2, 3 y 4 presentan una tendencia idéntica. A partir de 14 Gbps se observa fácilmente cómo comienza a decaer la calidad de todos los canales, por lo que es fácil determinar que alrededor de los 18 Gbps el factor Q sobrepasa los límites aceptables.

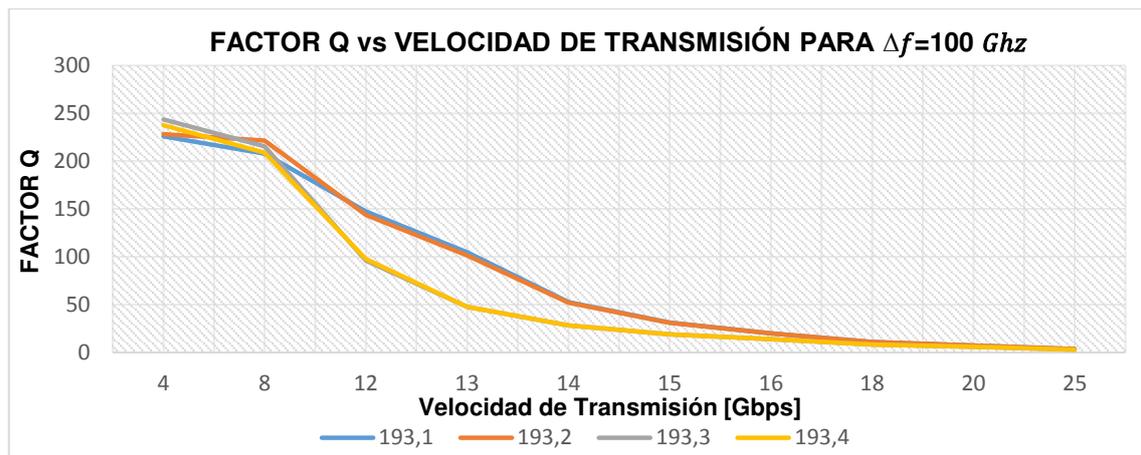


FIGURA 3.14. Factor Q vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamiento de 100 GHz.

En la figura 3.15 se observan las curvas de BER vs velocidad de transmisión, en donde es muy significativa la similitud de las curvas para canales adyacentes, en los canales 1 y 2 para 14 Gbps las curvas muestran una tasa de bits errados en las cuales la calidad del enlace tiene muy buenas condiciones, pero se deteriora drásticamente a 16 Gbps; mientras tanto los canales 3 y 4 a 14 Gbps presentan una tasa de errores mucho mayor que los canales 1 y 2 y comienzan a aumentar dichos errores hasta llegar a los 16 Gbps en donde empieza a tener valores críticos. En la tabla D.5 del anexo D se observa el BER mínimo para el canal 3, el cual sufre la máxima degradación a una velocidad de 20 Gbps y una tasa de bits errados de 1.81×10^{-9} , que supera los valores aceptables para un sistema de

alta velocidad, por lo tanto, a velocidades menores a 20 Gbps la información podrá ser recuperada correctamente.

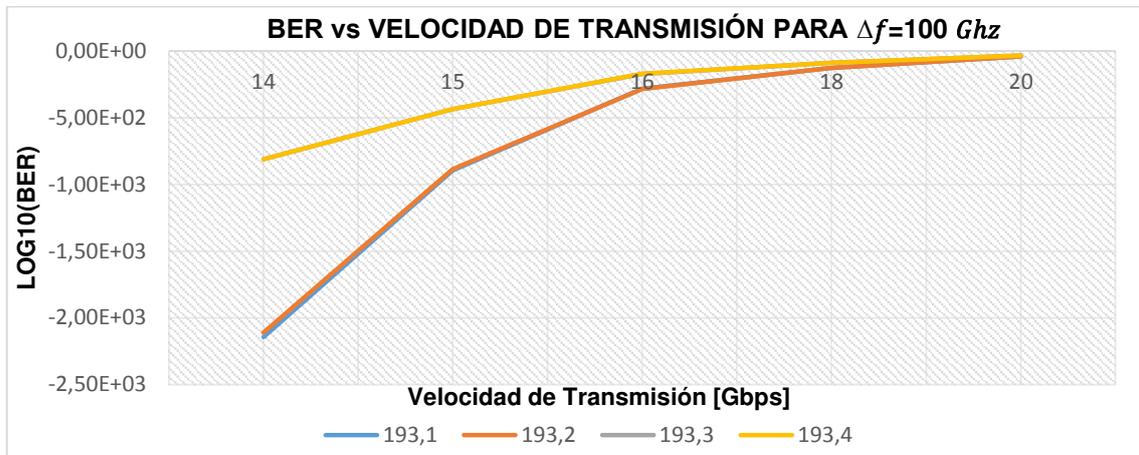


FIGURA 3.15. BER vs Velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamento de 100 GHz.

La figura 3.16 muestra los diagramas de ojo para 15 Gbps (izquierda) con un BER de valores aceptables, mientras que a 20 Gbps (derecha) los valores de BER ya no son tolerables. En el anexo D de la figura D.5 a la D.9 se muestran los diagramas de ojo para las distintas velocidades y todos los canales. En la figura 3.16 se observa cómo el diagrama de ojo empieza a cerrarse a 20 Gbps y empieza a tener distorsión debido a la reducción de la altura del ojo en el eje vertical, lo que implica que existan errores considerables en la señal, lo que no sucede a 15 Gbps donde aún se observa un diagrama de ojo despejado.

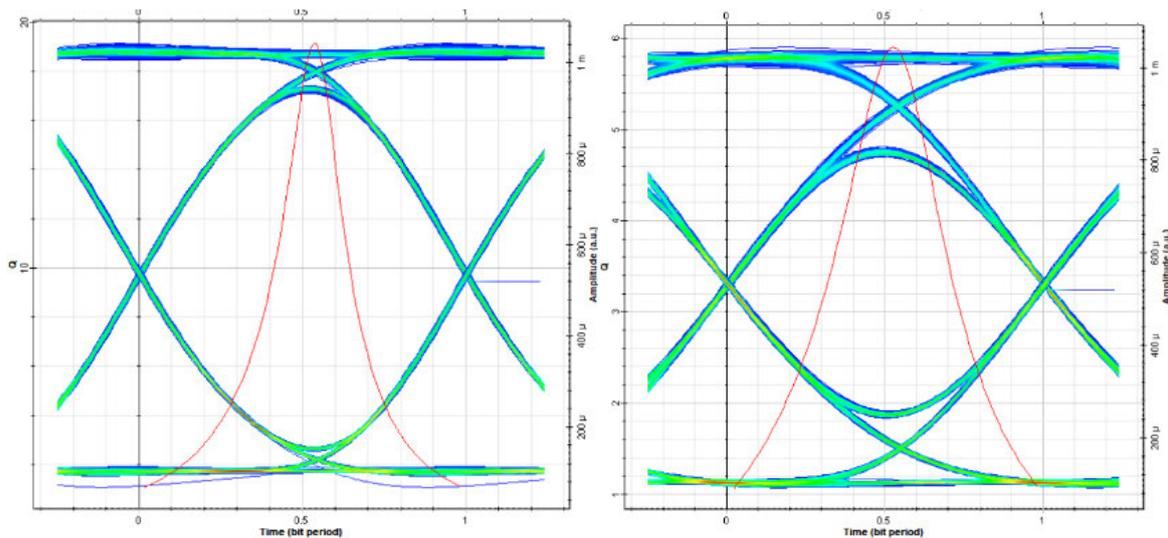


FIGURA 3.16. Diagramas de ojo para el canal 193.4 THz a 15 Gbps (izq) y 20 Gbps (der).

En la tabla 3.5 se presenta el Q mínimo y BER máximo para cada velocidad de transmisión considerada en las simulaciones, tomando en cuenta la degradación máxima de uno de los canales. Se determina que, a velocidades hasta 18 Gbps para un espaciamiento de canal de 100 GHz, los 4 canales WDM de banda C tienen un desempeño aceptable, lo que implica una capacidad total de 72 Gbps de buenas características y con pocos errores.

Tabla 3.5. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM con MZI para 4 canales con espaciamiento de 100 GHz a 8, 12, 15, 18 y 20 Gbps.

VTx [Gbps]	8	12	15	18	20
Q min	208,775	96,1397	19,116	8,484	5,899
BER máx	0	0	$7.1 \cdot 10^{-82}$	$1.07 \cdot 10^{-18}$	$1.79 \cdot 10^{-9}$

3.2.2.2. Respuesta de MUX/DEMUX WDM con MZI para 4 canales con espaciamiento de 50 GHz

En este apartado se realizarán las pruebas para un espaciamiento de canal de 50 GHz variando la velocidad de transmisión, simulando el escenario de la figura 3.13. Los resultados completos se encuentran en el anexo E en donde se mostrará los datos detallados para distintas velocidades con sus respectivos diagramas de ojo y factor Q.

La Figura 3.17 muestra el Factor Q vs Velocidad de transmisión, la Figura 3.18 presenta BER vs Velocidad de Transmisión, que resumen los datos obtenidos en el anexo E.

Los valores de factor Q y BER se muestran en las tablas E.1 a la E.5, también se presentan valores de potencia de entrada y salida en dBm, además del OSNR para cada canal WDM. En las figuras E.1 a la E.4 del anexo E se observa la respuesta en frecuencia a la salida de cada etapa del MUX WDM y DEMUX WDM con las señales multiplexadas y demultiplexadas para cada espaciamiento de canal respectivo.

Para las distintas velocidades de transmisión 4, 8, 12, 15 y 20 Gbps, la potencia de salida del MUX WDM es muy similar en todos los 4 canales, -2.7 dBm, y un OSNR dentro de un rango entre 51 a 97 dB, con lo que se estima que los canales adyacentes presentan interferencias entre canales muy bajas. Así también, se observa que debido a que el valor estimado del ruido está en un umbral muy bajo, esto provoca un OSNR con valores teóricos altos y que se mantiene constante en todos los canales a distintas velocidades.

En la tabla 3.6 se presenta la potencia de salida del MUX WDM y del DEMUX WDM a 15 Gbps, en la que se observan pérdidas cercanas a -3 dB, lo que es provocado por la incidencia de los acopladores y las pérdidas de inserción.

Tabla 3.6. Potencia a la salida del MUX y a la salida del DEMUX WDM con MZI a 15 Gbps.

Frecuencia (THz)	Potencia de salida del MUX (dBm)	Potencia de salida del DEMUX (dBm)
193,1	-2,663	-2,740
193,15	-2,666	-2,779
193,2	-2,785	-2,820
193,25	-2,810	-2,881

La figura 3.17 se puede observar cómo el factor Q disminuye a medida que aumenta la velocidad de transmisión, algo muy similar al caso anterior de espaciamiento a 100 GHz. La pendiente cae de forma precipitada al aumentar la velocidad de 4 a 12 Gbps pasando de tener un valor de Q para todos los canales de alrededor de 220 a 4 Gbps, a tener un valor de Q alrededor de los 30 para 12 Gbps.

Los canales 1 y 2 de 193.1 y 193.15 THz presentan mejores características hasta alrededor de los 15 Gbps presentando un Q aceptable alrededor de 23, mientras los canales 3 y 4 a 193.2 y 193.25 THz tienen caídas más notorias en su calidad llegando a tener un Q alrededor de 9 para una velocidad de 15 Gbps. Se aprecia de mejor manera en la figura 3.17 que para los canales adyacentes 3 y 4 cae mucho más rápido su valor de factor Q que en los canales 1 y 2.

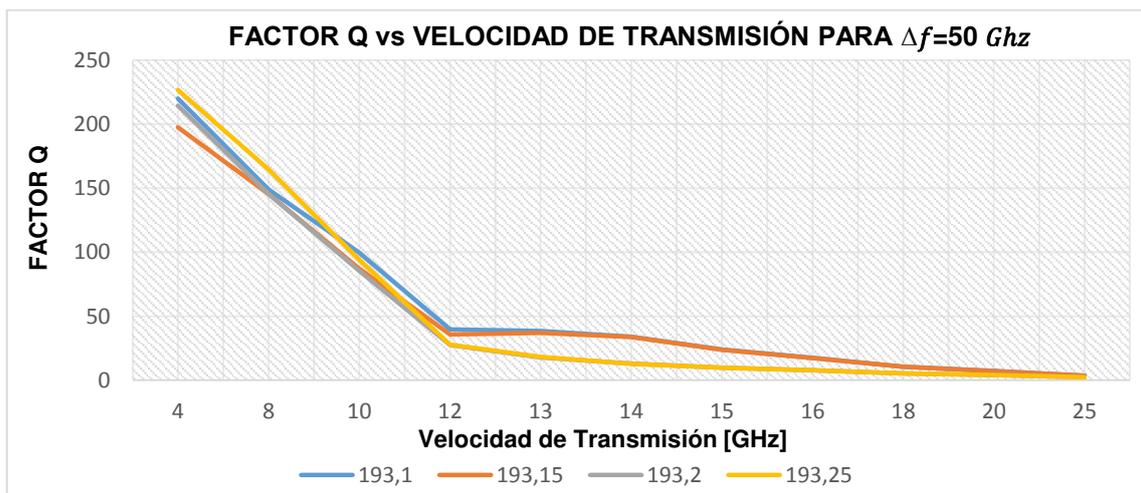


FIGURA 3.17. Factor Q vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamiento de 50 GHz.

La gráfica de BER vs velocidad de transmisión de la figura 3.18, muestra que los canales adyacentes 1 y 2 tienen un comportamiento muy similar, así como los canales 3 y 4 entre sí. Los canales 1 y 2 presentan errores imperceptibles hasta los 13 Gbps y sus curvas son muy similares en su tendencia, los canales finales 3 y 4 presentan mayor número de errores, y se visualiza que a un máximo de 15 Gbps los errores son aún aceptables, pero a 20 Gbps el BER es de $3,5 \cdot 10^{-5}$ que sobrepasa los límites de un comportamiento adecuado. Esto se complementa con lo explicado anteriormente, ya que los canales adyacentes se degradan de manera similar debido a la forma de separación que experimentan en los MZI.

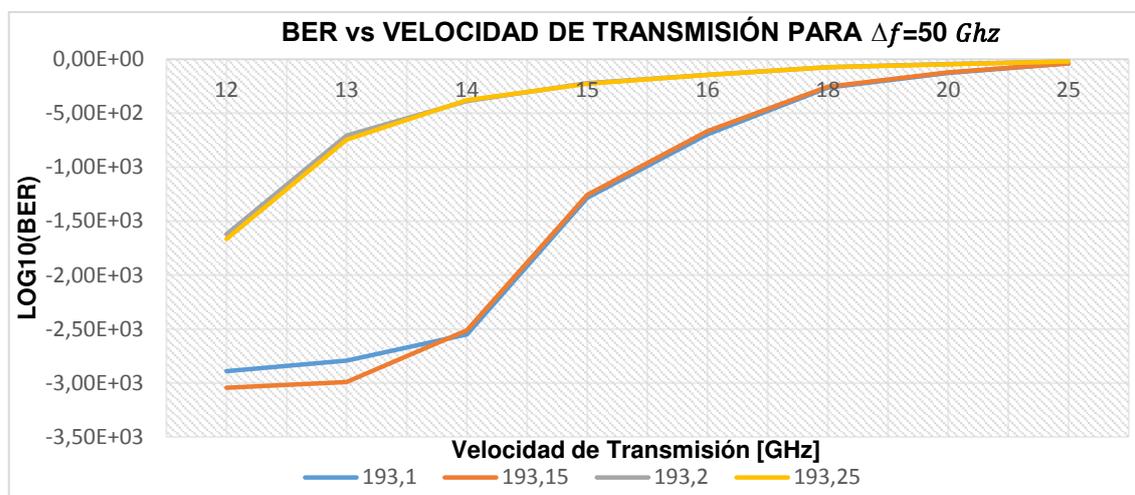


FIGURA 3.18. BER vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamiento de 50 GHz.

El diagrama de ojo para 4 Gbps (izquierda) y 15 Gbps (derecha), se visualiza en la figura 3.19. Se toma el BER a estas velocidades ya que se puede analizar de mejor manera los cambios en la señal, sobre todo a 15 Gbps, pues supera valores aceptables y es más fácil apreciar cómo las señales se degradan. El diagrama de ojo mostrado en la figura 3.19 para 4 Gbps está totalmente despejado mientras que para 15 Gbps empieza a cerrarse verticalmente y su distorsión se hace más notoria pero la información aún se puede recuperar pues a esta velocidad se llega a valores recomendables límites. En el anexo E desde la figura E.5 a la E.8 se muestran los diagramas de ojo para todas las velocidades.

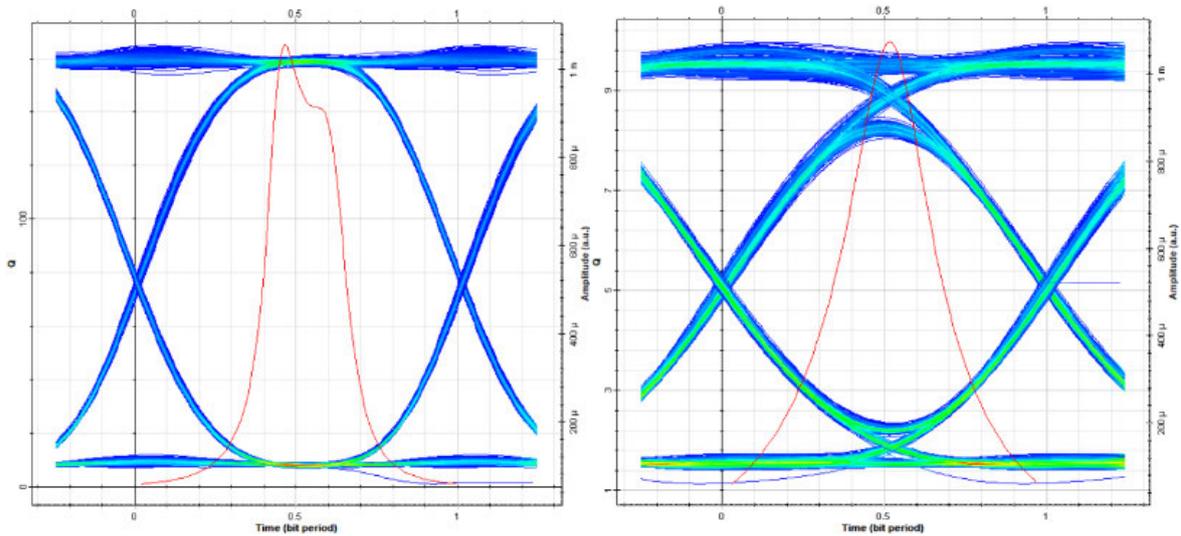


FIGURA 3.19. Diagramas de ojo para el canal 193.25 THz a 4 Gbps (izq) y 15 Gbps (der).

Comparando los diagramas de ojo entre un espaciamiento de 50 y 100 GHz, se observa que las señales tienen un peor comportamiento a menor espaciamiento de canal, ya que los diagramas de ojo están más cerrados en el eje vertical, lo que provocará mayor distorsión, de esta forma se puede verificar que se alcanza velocidades menores con espaciamientos de 50 GHz con respecto a espaciamientos de 100 GHz.

En la tabla 3.7 se presenta el Q mínimo y BER máximo para cada velocidad, tomando en cuenta la degradación máxima de uno de los canales. Se determina que, a velocidades hasta 15 Gbps para un espaciamiento de canal de 50 GHz, los 4 canales WDM de banda C tienen un desempeño aceptable, lo que posibilita alcanzar una capacidad total del sistema de 60 Gbps

Los canales 3 y 4 tienen una menor calidad ya que son los que más errores provocan de acuerdo con los resultados obtenidos, debido a estos canales no se puede seguir aumentando la velocidad ya que se incumple con las recomendaciones establecidas para el factor de calidad (*Q*) y tasa de bits de errores (*BER*).

Tabla 3.7. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM con MZI para 4 canales con espaciamiento de 50 GHz a 8, 10, 15, 18 y 20 Gbps.

VTx [Gbps]	8	10	15	18	20
Q min	145,408	85,497	9,765	5,293	3,995
BER máx.	0	0	$1.75 \cdot 10^{-23}$	$5.78 \cdot 10^{-08}$	$3.78 \cdot 10^{-5}$

3.2.2.3. Respuesta MUX/DEMUX WDM con MZI para 4 canales con espaciamiento de 25 GHz

En el siguiente apartado se muestran los resultados de las pruebas de simulación para un espaciamiento de canal de 25 GHz, siendo este el más crítico, y para diferentes velocidades de transmisión, con el objetivo de encontrar una relación entre la velocidad y el factor Q. Todas las pruebas se basan en el esquema de la gráfica 3.13. En el anexo F se muestra de forma más detallada los resultados obtenidos para las velocidades de: 4, 8, 12 y 15 Gbps con sus respectivos diagramas de ojo y factor Q.

El esquema de pruebas se basa en medir el factor Q y BER de los 4 canales multiplexados para determinar qué canales tienen el mejor comportamiento y el menor número de errores. Desde la figura F.1 a la F.4 del anexo F se puede observar la respuesta en frecuencia a la salida del MUX WDM con las señales multiplexadas y demultiplexadas. En las tablas F.1 a la F.4 se encuentran los datos de potencia, OSNR, Q y BER mínimo a la salida de cada canal.

Para 4 Gbps se observa en la tabla F.1 del anexo F que la potencia de salida del MUX a 193.125 THz es -2.69 dBm y presenta un OSNR de 97.31 dB siendo este el caso con mayores pérdidas, y a la salida del brazo del demultiplexor para la misma longitud de onda la potencia de salida es de -2.748 dBm lo cual indica pérdidas de inserción mínimas debido al proceso de demultiplexación. Para los demás canales adyacentes y contiguos la potencia de salida en el MUX/DEMUX WDM se mantiene en valores similares.

Para los casos de 4, 8, 12 y 15 Gbps la potencia de salida del DEMUX WDM es muy similar en todos ellos, cercana a los -2.87 dBm y un OSNR en un rango entre 57.51 y 97.38 dB con lo que se estima que los canales adyacentes presentan buenas características frente al ruido e interferencia entre canales. La tabla 3.8 muestra los valores de potencia a la salida del MUX WDM y del DEMUX WDM para una velocidad de 12 Gbps

Tabla 3.8. Potencia a la salida del MUX y a la salida del DEMUX WDM con MZI a 12 Gbps.

Frecuencia (THz)	Potencia de salida del MUX (dBm)	Potencia de salida del DEMUX (dBm)
193,1	-2,663	-2,740
193,125	-2,666	-2,779
193,15	-2,785	-2,820
193,175	-2,810	-2,881

Comparando la potencia con los otros espaciamentos de canal mayores a 25 GHz, se puede concluir que para este dispositivo la potencia no es un factor determinante para analizar su comportamiento, pero entrega datos de cómo la potencia llega a recepción de forma similar en todos los espaciamentos.

En la figura 3.20 se muestran 4 curvas del factor Q vs velocidad de transmisión, en la cual se observa una tendencia predecible, pues a mayor velocidad todos los canales WDM disminuyen el factor Q; a partir de 10 Gbps el factor Q se mantiene en valores similares para canales adyacentes.

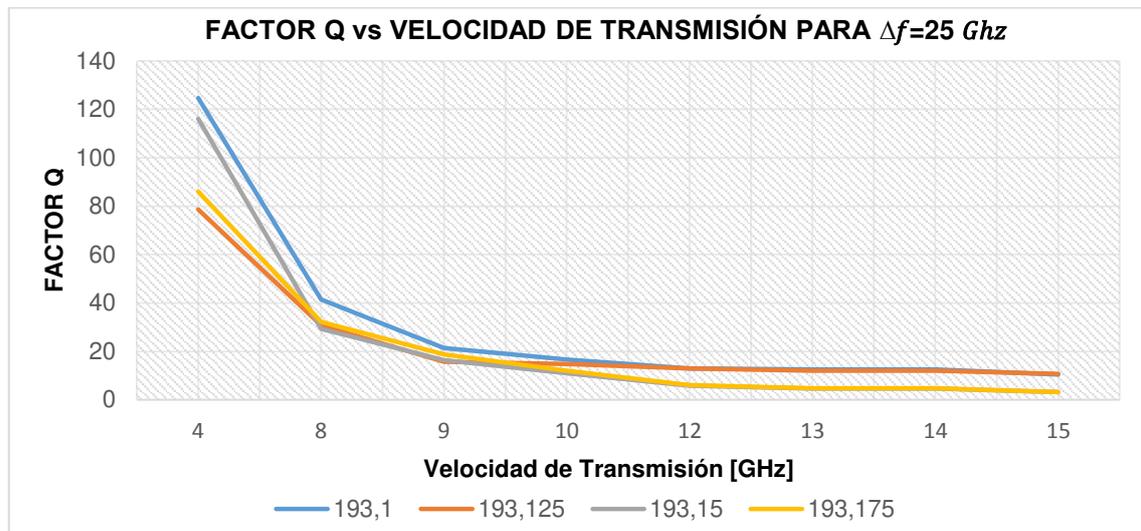


FIGURA 3.20. Factor Q vs velocidad de transmisión vs para 4 canales con espaciamiento de 25 GHz.

Los canales a 193.1 y 193.125 THz presentan valores similares de factor Q, mientras que los canales finales de 193.15 y 193.175 THz son los que más se degradan, esto se debe a que las longitudes de onda adyacentes salen en brazos diferentes del MZI como se explicó anteriormente. Cuando las longitudes de onda atraviesan la guía de onda que tiene un desplazamiento de ruta, crea un retardo provocando un aumento en el ancho del pulso y que este se vuelva cada vez más crítico, concluyendo que al salir por brazos diferentes y al tener el mismo retardo guardan cierto grado de similitud en el factor Q.

En las curvas de la figura 3.20, se observa que existe una pendiente negativa pronunciada que hace que el factor Q caiga de valores de 120 para 4 Gbps a valores cercanos de 30 para 8 Gbps por lo que se considera como un deterioro drástico en la calidad del sistema.

A 12 Gbps el canal número 3 a 193.15 THz tiene un factor Q de 5.819, lo que sobrepasa los mínimos recomendados, concluyendo que a velocidades menores a 12 Gbps el MUX/DEMUX WDM presenta un buen comportamiento.

En la figura 3.21 se presenta el BER vs velocidad de transmisión, notándose que el BER guarda una estrecha relación con el factor de calidad Q para todos los espaciamientos de canal. En la tabla F.3 del anexo F se observa el BER mínimo para el canal número 3 y cómo este es el que sufre la máxima degradación a una velocidad de 12 Gbps llegando a $2.73 \cdot 10^{-9}$, inaceptable para un sistema de alta velocidad.

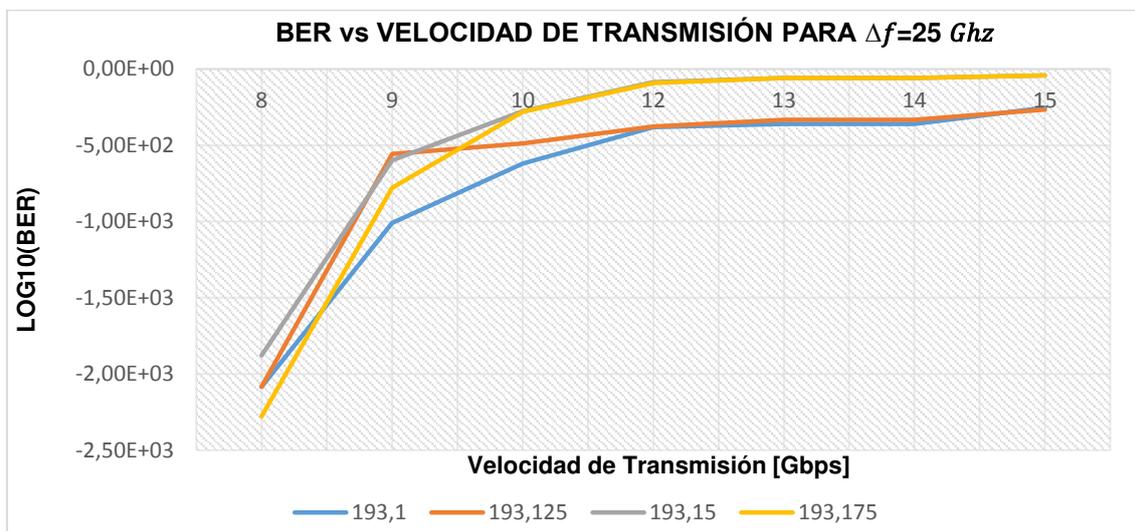


FIGURA 3.21. BER vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamiento de 25 GHz.

La figura 3.22 presenta los diagramas de ojo para 4 Gbps (izquierda) con valores de BER muy buenos en todos los canales, y para 12 Gbps (derecha) cuyos valores de BER superan los límites tolerables. En las figuras F.5 a F.8 del anexo F, se podrá observar todos los diagramas de ojo a distintas velocidades, mientras que la figura 3.22 solo es un ejemplo de cómo el diagrama de ojo empieza a cerrarse conforme se aumenta la velocidad. Principalmente a 12 Gbps el canal 3 comienza a tener distorsión debido a la reducción de la altura del ojo en el eje vertical, además de que el grado de distorsión es más notorio ya que la distancia vertical entre la parte superior de la apertura del ojo y el nivel máximo de la señal es significativa. A estas velocidades (y sobre todo a 15 Gbps) se empezará a tener interferencia Inter símbolo (*ISI*) y se imposibilitará la detección de la información. Se puede notar una diferencia significativa entre ambas figuras en donde a 4 Gbps muestra un diagrama despejado mientras que a 12 Gbps la altura del ojo se ha reducido considerablemente.

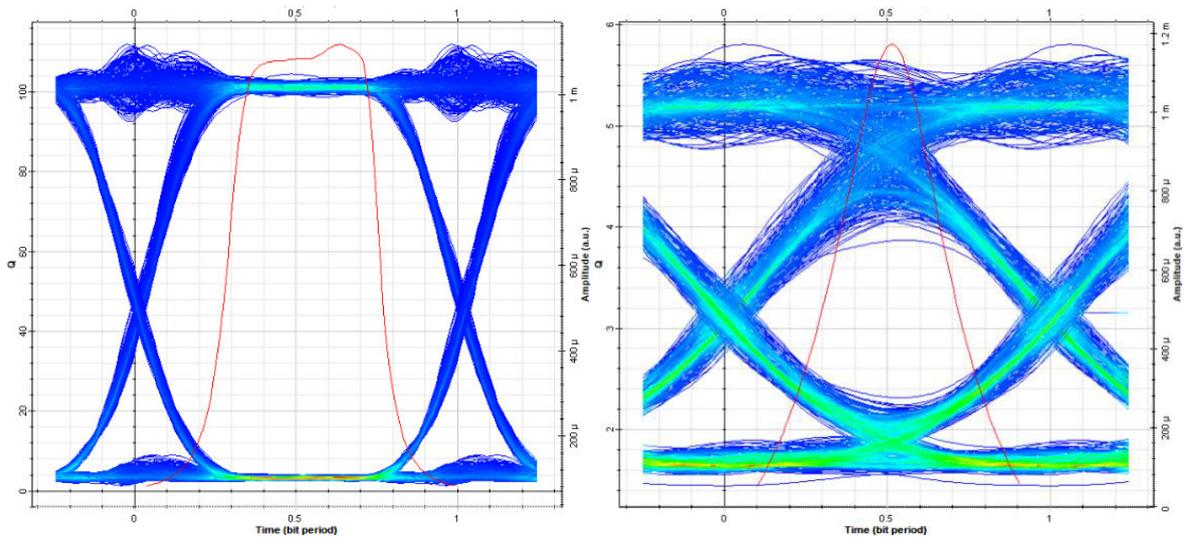


FIGURA 3.22. Diagramas de ojo para el canal 193.15 THz a 4 Gbps (izq) y 12 Gbps (der).

La tabla 3.9 muestra el Q mínimo y BER máximo para cada velocidad considerada; tomando en cuenta la degradación máxima de uno de los canales, con lo cual se determina que a velocidades de 10 Gbps para un espaciamiento de canal de 25 GHz los 4 canales WDM de banda C tienen un desempeño aceptable, lo que posibilitará una capacidad total del sistema de alrededor de 40 Gbps. Los canales 3 y 4 provocarán mayor número de errores con respecto a los canales 1 y 2, y debido a estos canales no se puede seguir aumentando la velocidad por arriba de 10 Gbps ya que se incumplen con las recomendaciones establecidas para el factor de calidad y tasa de bits errados.

Tabla 3.9. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM con MZI para 4 canales con espaciamiento de 25 GHz a 4,10 y 12 Gbps.

VTx [Gbps]	4	10	12
Q min	78,604	19,721	5,819
BER Max	0	$6,59 \cdot 10^{-87}$	$2,73 \cdot 10^{-09}$

Realizando una breve comparación entre los tres diferentes espaciamientos de canal analizados (100, 50 y 25 GHz), se puede observar en los resultados obtenidos que a mayor espaciamiento de canal mejor calidad del sistema, es decir, a una velocidad dada el factor Q es mayor cuando se trabaja con espaciamiento de canal más amplios, además de que ciertos canales se degradan de la misma manera ocasionando resultados idénticos.

3.2.3. SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX DE 8 CANALES CON MZI, VARIANDO EL ESPACIAMIENTO DE CANAL Y VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN

Se presentará un sistema WDM de 8 canales construido a partir de MZI en cascada, en donde se estudiará su comportamiento y posteriormente se comparará con las demás tecnologías estudiadas. Para la configuración correspondiente en el software de simulación se toma en cuenta los cálculos de retardo que se encuentran en la tabla 3.1 y 3.2.

En la figura 3.23 se presenta el esquema MUX/DEMUX WDM simulado para 8 canales con MZI y en la figura 3.24 el esquema general de simulación en OptiSystem. Las pruebas serán las mismas que para 4 canales. Estas pruebas medirán la respuesta en frecuencia, potencia en la salida del MUX/DEMUX WDM mientras que en las salidas del demultiplexor se obtendrá la tasa de bits errados y factor Q, para las diferentes velocidades y espaciamentos de canales, tal como se realizó para un esquema de 4 canales.

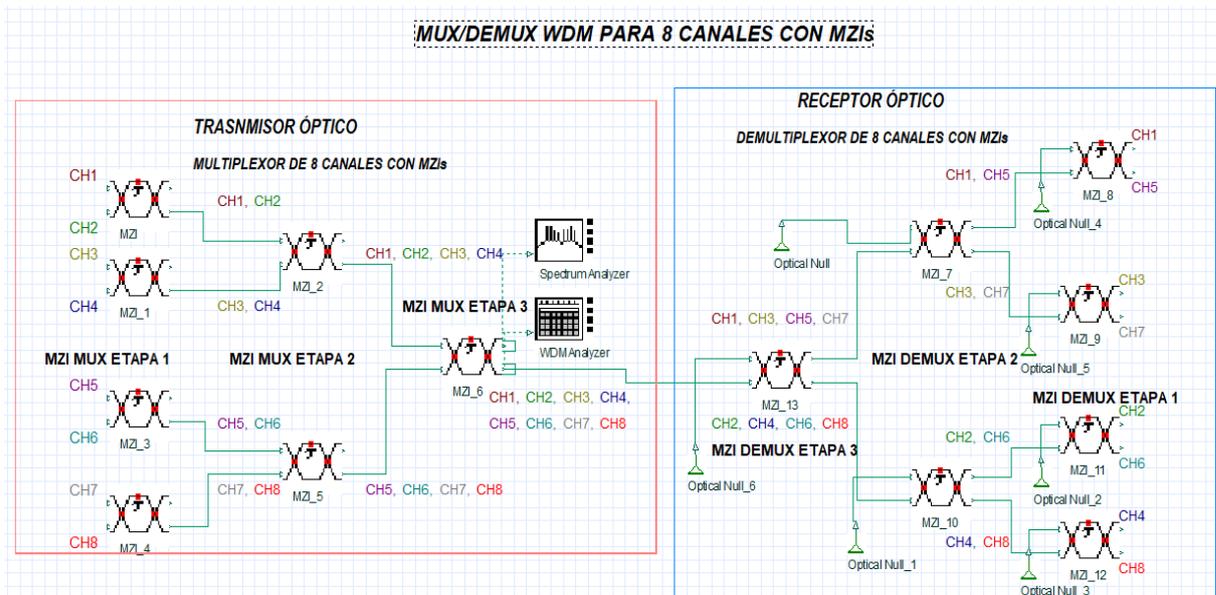


FIGURA 3.23. Multiplexor y Demultiplexor WDM implementado con interferómetros Mach Zehnder para 8 canales.

En la figura 3.23 para 8 canales se presentan 7 MZI tanto en el MUX como en el DEMUX. En el demultiplexor la etapa 3 se encuentra en el lado izquierdo con 1 MZI, la etapa 2 con 2 MZI y al final la etapa 1 con 4 MZI. La etapa 3 del demultiplexor separa longitudes de onda o frecuencias pares e impares, por lo tanto, una de las salidas del MZI presenta 4 frecuencias impares que son: F1, F3, F5 y F7; y en la otra salida, 4 frecuencias pares: F2, F4, F6 y F8. Para la etapa 2 se tiene 2 MZI y cada uno con dos salidas, de tal manera que, el MZI superior demultiplexará las señales impares obteniendo F1 con F5 y F3 con F7, y el MZI inferior demultiplexará las señales pares de lo que se obtendrá F2 con F6 y F4 con F8.

Para finalizar la demultiplexación de todos los canales, en la etapa 1 se tienen 4 MZI cada uno con dos salidas, en la cual se obtendrán las 8 señales. Del MZI superior 1 se tiene como resultado las señales F1 y F5 y del MZI superior 2 las señales F3 y F7. Del MZI inferior 1 se consigue las señales F2 y F6 y del brazo inferior 2 las señales F4 y F8. Es así como se obtiene las señales pares e impares. La respuesta en frecuencia para todos los espaciamentos se presenta en anexos para una mejor visualización y análisis.

La forma en la que funciona el interferómetro influye en ciertos canales más que en otros, esto debido a que unos canales deben pasar por un número mayor de retardos que otros para poder demultiplexarse, por lo que, es importante señalar que los canales sufren distintos comportamientos, todo esto se evidenciará en el análisis de cada espaciamento en las gráficas de factor Q y BER.

SISTEMA WDM PARA 8 CANALES CON MZI

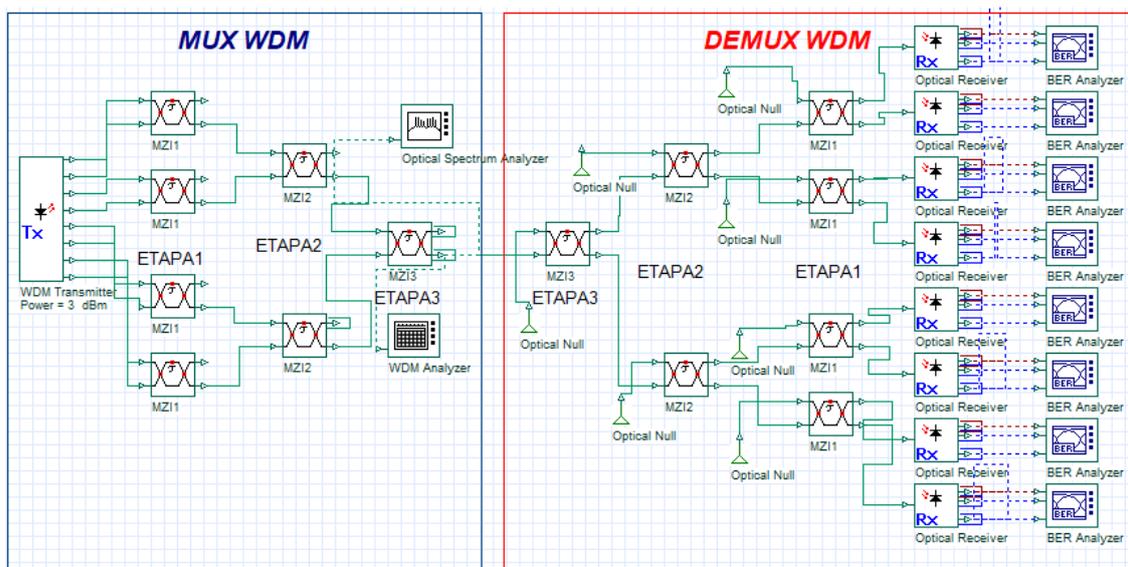


FIGURA 3.24. Sistema WDM con MZI 8 canales.

Todas las simulaciones posteriores se basan en el escenario de la figura 3.24, en donde se realizan las pruebas correspondientes a multiplexar y demultiplexar longitudes de onda con la finalidad de evaluar su comportamiento. Las pruebas miden la potencia y OSNR con el fin de analizar el factor Q y BER. De la misma forma las tablas, diagramas de ojo y factor Q se muestran en los anexos G, H e I. Las mediciones respectivas de potencia y OSNR se hacen a la salida del multiplexor y demultiplexor utilizando los instrumentos mencionados anteriormente. Las pruebas se realizan en banda C con una frecuencia inicial de 193.1 THz tal como se muestra en tabla 3.1 al principio de la sección 3.2.

3.2.3.1. Simulación de MUX/DEMUX WDM MZI para 8 canales con espaciamiento de 100 GHz

En el siguiente apartado se realizará un análisis de los datos obtenidos en el anexo G y sintetizados en las figuras 3.25 y 3.26. Para una mejor comprensión en las gráficas G.1 a la G.6 del anexo G, se muestran la respuesta en frecuencia de las señales obtenida con el instrumento *Spectrum Analyzer*, que evidencian la forma en que cada señal se une y se separa ya sea en el MUX o DEMUX WDM. A partir de la tabla G.1 a la tabla G.4 se muestran los resultados para OSNR, potencia, BER y Factor Q de cada señal WDM para las velocidades de 10, 15, 20 y 25 Gbps tomados con los instrumentos *BER Analyzer* y *WDM Analyzer* y que se encuentran resumidos en las gráficas posteriores

El MUX/DEMUX WDM muestra pérdidas considerables al aumentar el número de etapas, debido a los acopladores presentes en las etapas del multiplexor. Como se explicó anteriormente, se desea tener una máxima potencia en uno de los brazos del multiplexor. El MZI pierde teóricamente 9 dB a la salida del multiplexor y a partir de allí el demultiplexor obtiene la potencia máxima de cada señal solo teniendo pérdidas mínimas debido a la inserción.

En las tablas G.1 a la G.4 del anexo G se observa más detalladamente los resultados, pero para todas las velocidades el resultado es muy similar, la tabla 3.10 de potencias medidas para 20 Gbps se presenta como un ejemplo. Los resultados para OSNR son valores aceptables para todos los canales a la salida del demultiplexor, en donde, para 10 Gbps, el OSNR tiene un valor entre 42 y 90 dB, mientras que, para 20 Gbps alcanza valores en un rango de 42 a 56 dB como media en todos los canales.

Tabla 3.10. Potencia a la salida del MUX y a la salida del DEMUX WDM con MZI a 20 Gbps.

Frecuencia (THz)	Potencia de salida del MUX (dBm)	Potencia de salida del DEMUX (dBm)
193,1	-5,862	-5,899
193,2	-5,885	-5,893
193,3	-5,779	-5,822
193,4	-5,808	-5,838
193,5	-5,856	-5,870
193,6	-5,900	-5,905
193,7	-5,768	-5,812
193,8	-5,824	-5,826

En la figura 3.25 se presenta la gráfica de factor Q vs velocidad de transmisión para las velocidades de 10, 15, 20 y 25 Gbps, en cual se muestran 8 curvas correspondientes a cada canal WDM simulado, observándose que canales adyacentes presentan características similares, mientras que canales no adyacentes presentan características diferentes. La tendencia es la esperada, ya que al aumentar la velocidad los canales presentan menor calidad. Se visualiza que los canales 1 y 2 a 193.1 y 193.2 THz presentan mejores características a 10 Gbps con un factor Q cercano a 130, el cual cae abruptamente a 20 para una velocidad de 15 Gbps. Los canales 3 y 4 a 193.3 y 193.4 THz respectivamente son los canales que mantienen una pendiente lineal negativa menos crítica, ya que caen de un Q de 90 a un Q aproximado de 8 al aumentar la velocidad de 10 a 20 Gbps. Los canales 5 y 6 tienen características similares, a 10 Gbps tienen un Q alrededor de 110 pero a 20 Gbps cae a un Q crítico de alrededor de 5. Los canales 7 y 8 son los canales que presentan peor comportamiento, pues pasan de un Q de 90 a 10 Gbps a un Q de 4 a 20 Gbps. A 20 Gbps Todos los canales caen pronunciadamente hasta un factor Q que se encuentra por debajo del valor recomendado, a esta velocidad todos los canales se han degradado y superan los límites, lo que provocan que la información sea difícil de recuperar.

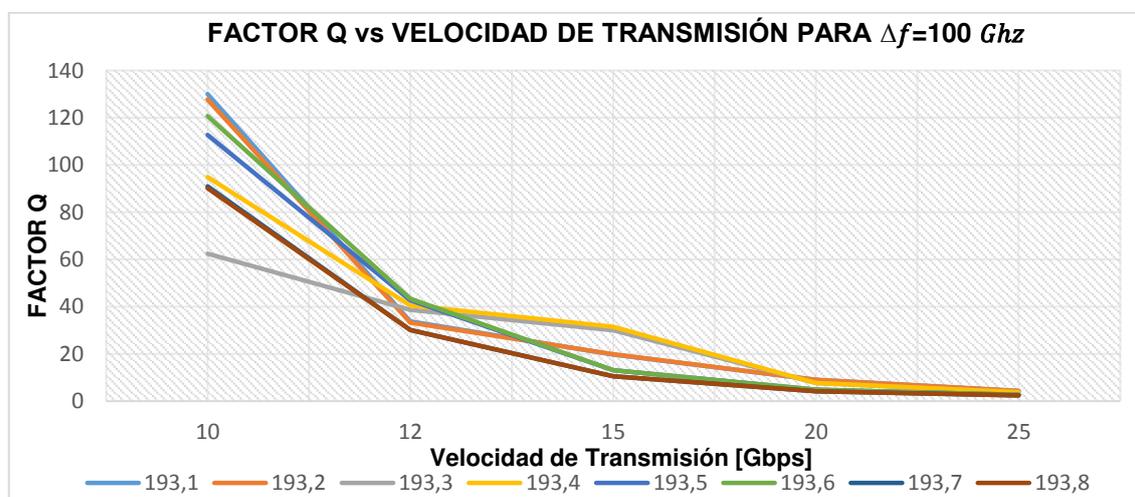


FIGURA 3.25. Factor Q velocidad de transmisión para 8 canales WDM con espaciamiento de 100 GHz.

En la figura 3.26 se observan las curvas de BER vs velocidad de transmisión para los 8 canales WDM. En donde a 12 Gbps todos los canales presentan características muy buenas con respecto al BER y a partir de ahí se observa que los canales adyacentes presentan características similares entre sí, pero diferentes de los no adyacentes. Los canales 3 y 4 muestran mejores características y los canales 7 y 8 son los que peor comportamiento presentan. Se puede comprobar que todos los canales hasta una

velocidad máxima de 20 Gbps presentan características aceptables, pero a partir de ahí, la información es difícil de detectar debido al gran número de errores que muestran todos los canales y que supera los límites recomendados.

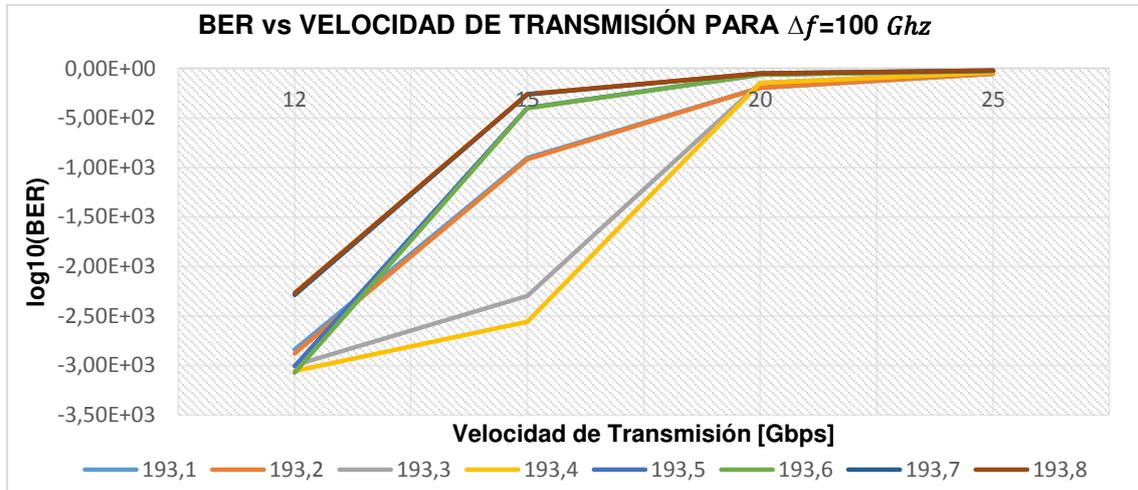


FIGURA 3.26. BER vs Velocidad de transmisión para 8 canales WDM con espaciamiento de 100 GHz.

Para el espaciamiento de canal a 100 GHz se analiza el diagrama de ojo a 20 Gbps que es el límite que se ha establecido debido a las conclusiones que se han obtenido de las figuras anteriores. Se considera el análisis solamente para el peor canal, debido a que este limita la capacidad del sistema, todos los diagramas de ojo y factor Q para todas las velocidades, se encuentran en las figuras G.7 a la G.10 del anexo G.

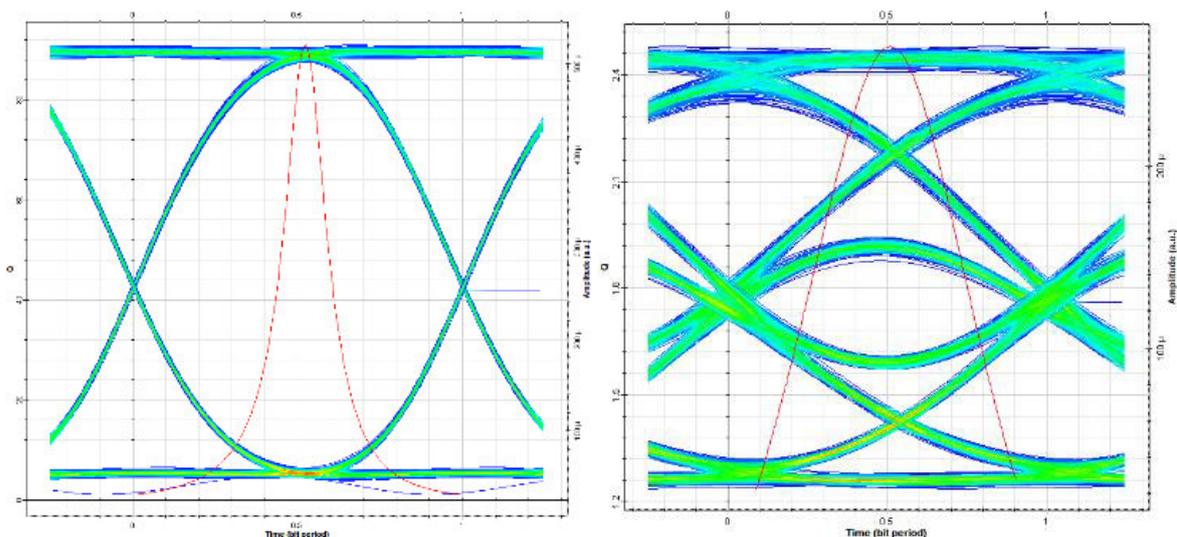


FIGURA 3.27. Diagrama de ojo y factor Q para el canal 193.7 THz a 10 Gbps (izq) y 20 Gbps (der).

Como se aprecia en la figura 3.27, las características del diagrama de ojo cambian con la velocidad tanto en el eje vertical como horizontal. A 20 Gbps (izquierda) el ojo empieza a cerrarse verticalmente, la señal se encuentra con muchas dificultades para ser muestreada sin errores y empieza a tener distorsión debido a la reducción de la altura del ojo, además, en el eje vertical los 0 y 1 lógicos empiezan a provocar un desfase en tiempo generando Jitter. La información será difícil de recuperar porque supera los niveles adecuados para un buen comportamiento.

En la tabla 3.11 se presenta el Q mínimo y BER máximo para 12, 15, 18 y 20 Gbps, tomando en cuenta la degradación máxima de uno de los canales. A partir de los resultados se determina que, hasta 15 Gbps, para un espaciado de canal de 100 GHz, los 8 canales WDM de banda C tienen un desempeño aceptable, posibilitando una capacidad total de hasta 120 Gbps.

Tabla 3.11. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM con MZI para 8 canales con espaciado de 100 GHz a 12, 15, 18 y 20 Gbps.

VTx [Gbps]	12	15	18	20
Q min	32,196	10,601	5.89	4,18419
BER máx.	1,26E-227	5,17E-27	1.012E-12	0,0000138

3.2.3.2. Simulación de MUX/DEMUX WDM MZI para 8 canales con espaciado de canal 50 GHz

En esta sección se explicará el comportamiento de un MUX/DEMUX WDM de 8 canales con un espaciado de canal de 50 GHz. Se han obtenido resultados para el análisis que serán simplificados en las gráficas de las figuras 3.28 y 3.29, en el anexo H se presentan de manera más detallada estos resultados, desde la figura H.1 a la H.6 se muestra la respuesta en frecuencia para un espaciado de canal a 50 GHz en todas las etapas de multiplexación y demultiplexación. Todas las gráficas han sido obtenidas con el instrumento de medición *Spectrum Analyzer*. En las tablas H.1 a la H.4 del anexo H se mostrarán los resultados de las mediciones de potencia, OSNR, BER y factor Q para 8, 12, 15 y 18 Gbps realizadas con los instrumentos *WDM Analyzer* y *BER Analyzer*.

En la tabla 3.12 se presenta la potencia de salida del MUX/DEMUX WDM a 15 Gbps, velocidad a la cual se tienen las mayores pérdidas. Para el caso del OSNR en la salida del demultiplexor, presenta características similares; para 8 Gbps el primer canal muestra un OSNR menor, de 58 dB, mientras que los canales 5 y 6 presentan el mejor OSNR alrededor

de 94 dB, en ambos casos. A 15 Gbps el canal 5 y 6 presentan valores de OSNR 70 dB mientras que el canal 1 tiene un OSNR alrededor de los 40 dB.

Tabla 3.12. Valores potencia a la salida del MUX y de salida del DEMUX a 15 Gbps.

Frecuencia (THz)	Potencia de salida del MUX (dBm)	Potencia de salida del DEMUX (dBm)
193.1	-5,820	-5,829
193.15	-5,821	-5,836
193.2	-5,922	-5,934
193.25	-5,928	-5,959
193.3	-5,621	-5,649
193.35	-5,619	-5,658
193.4	-5,613	-5,649
193.45	-5,609	-5,701

En la figura 3.28 se muestran las curvas de factor Q vs velocidad de transmisión con características similares en canales adyacentes, por ejemplo, los canales 1 y 2, si bien salen por diferentes MZI, tienen un grado de correlación en la forma de sus curvas, y así con todos los demás canales. Las curvas muestran que el factor Q disminuye con el aumento de la velocidad, algo totalmente esperado, ya que con el aumento de la velocidad el comportamiento empieza a empeorar. De 4 a 9 Gbps las 8 curvas presentan buenos valores de factor Q; a partir de ahí, canales adyacentes muestran características distintas a los demás canales, en donde se puede apreciar que los canales 5 y 6 a 193.3 y 193.35 THz respectivamente tienen un mejor comportamiento que los otros canales, ya que, a partir de 9 Gbps la curva de caída de ambos canales es menos drástica que los otros 6 canales restantes.

Todos los canales, exceptuando el 5 y 6, a una velocidad de 12 Gbps, caen drásticamente en su calidad mostrando valores de Q entre 10 y 12. A una velocidad de 15 Gbps los canales, 1 y 2 a 193.1 y 193.15 THz y los canales 3 y 4 a 193.2 y 193.25 THz, muestran comportamientos similares llegando a límites mínimos con valores de Q alrededor de 4. Como se puede observar, a 15 Gbps se está superando los valores que rigen una buena calidad, pero a velocidades menores a 15 Gbps se tiene un buen comportamiento para todos los canales.

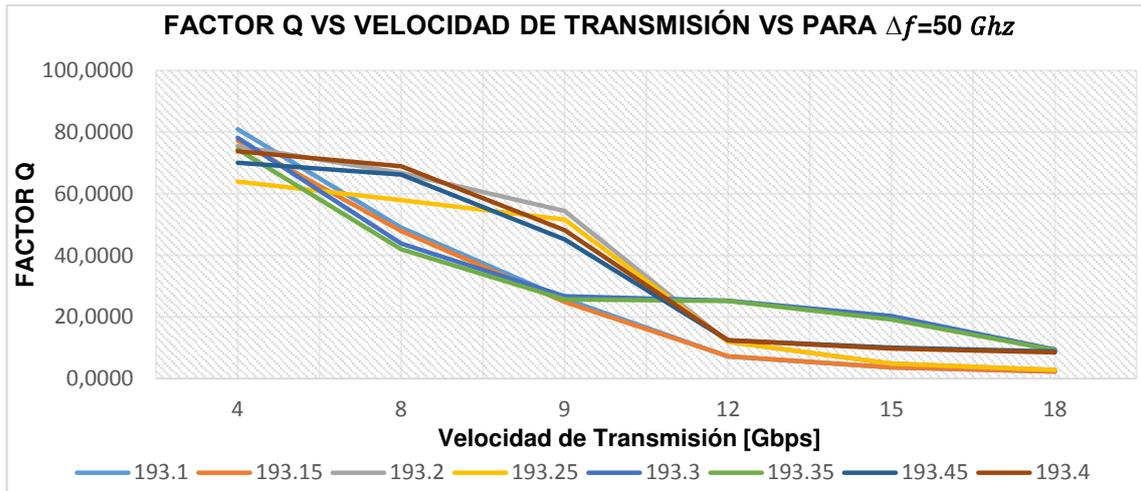


FIGURA 3.28. Factor Q vs velocidad de transmisión para 8 canales WDM con espaciamiento de 50 GHz.

La figura 3.29 presenta 8 curvas donde se evalúan la tendencia con respecto al BER vs velocidad de transmisión, se puede apreciar lo corroborado en figura de Factor Q vs velocidad de transmisión. Se observa que existe una gran similitud entre canales adyacentes y cómo en estos aumenta el número de errores con la velocidad, con la única diferencia de que en los canales 5 y 6 se presentan mejores características con respecto a los demás. Se evidencia que para 18 Gbps todos los canales han incrementado su BER a límites inaceptables, pero a velocidades menores a 15 Gbps la información de los canales presenta menos errores.

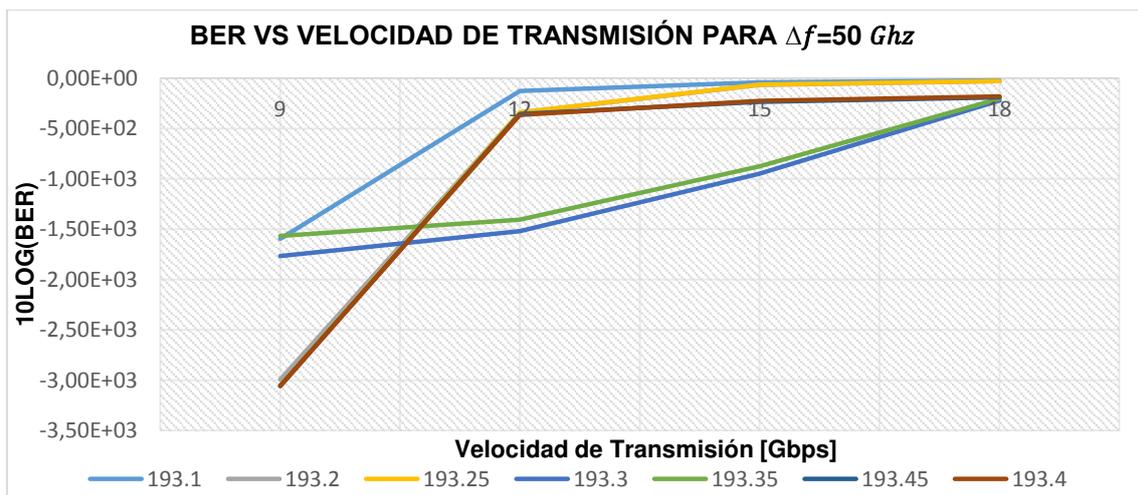


FIGURA 3.29. BER vs Velocidad de transmisión para 8 canales WDM con espaciamiento de 50 GHz.

En la figura 3.30 se presenta, los diagramas de ojo a 8 Gbps (izquierda) y 15 Gbps (derecha) para los canales de peor rendimiento. En el anexo H desde la figura H.7 a la

H.10 se encuentran todos los diagramas de ojo para todos los canales WDM y a distintas velocidades para un mejor entendimiento.

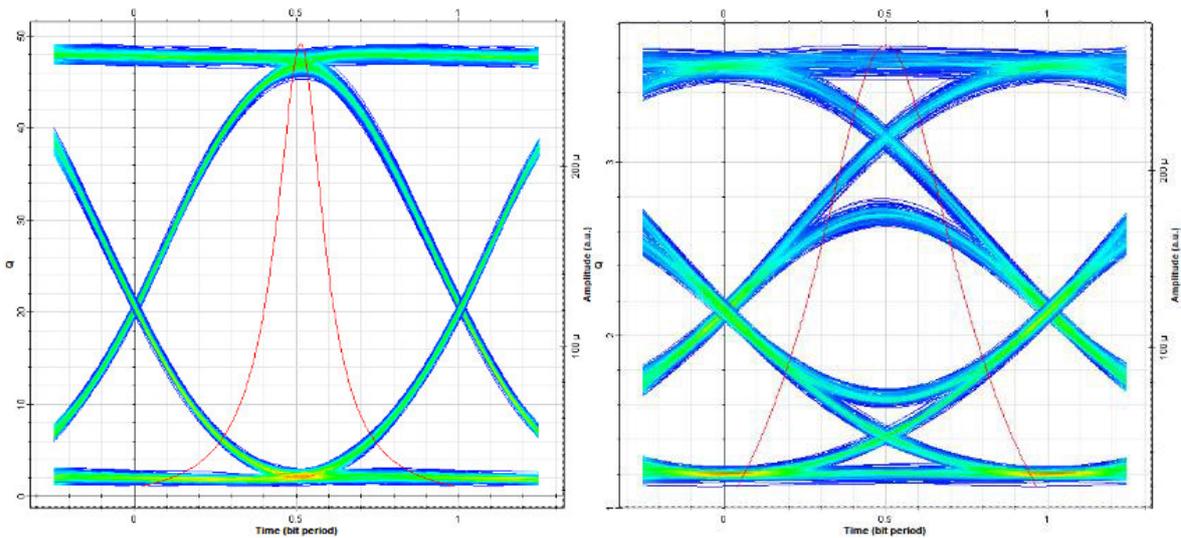


FIGURA 3.30. Diagrama de ojo y factor Q para el canal 193.1 THz a 8 (izq) y 15 Gbps (der).

Como se puede observar en las figuras de factor Q y BER, el canal que más rápido se degrada es el canal 1, lo que se puede comprobar en el diagrama de ojo de la figura 3.30, en el mismo, se presentan dos gráficas: una para 8 Gbps que muestra un diagrama de ojo totalmente despejado y con buenas características respecto a los cruces por cero y muestreo; por otro lado, la gráfica a 15 Gbps cambia drásticamente, ya que el canal desmejora su comportamiento y su diagrama de ojo se visualiza parcialmente cerrado en el eje horizontal, en donde la señal presenta muchas dificultades para ser muestreada sin errores, de igual manera, esta empieza a tener distorsión debido a la reducción de la altura del ojo en el eje vertical, provocando interferencia inter símbolo (*ISI*). Se concluye que a esta velocidad la información se vuelve difícil de detectar y recuperar.

En la tabla 3.13 se presenta el Q mínimo y BER máximo para cada velocidad, tomando en cuenta la degradación máxima de uno de los canales, con lo cual se determina que a velocidades de hasta 12 Gbps para un espaciamiento de canal de 50 GHz los 8 canales WDM de banda C tienen un desempeño aceptable, lo que permite una capacidad total de hasta 96 Gbps.

Tabla 3.13. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM con MZI para 8 canales con espaciamiento de 50 GHz a 8, 12, 13 y 15 Gbps.

VTx [GHz]	8	12	13	15
Q min	58,985	35,679	5.98	3,670
BER máx.	0	1,084E-13	1,174E-8	0,0001118

3.2.3.3. Simulación de MUX/DEMUX WDM MZI para 8 canales con espaciamiento de 25 GHz

El escenario más crítico para la multiplexación y demultiplexación es a 25 GHz ya que es el de menor espaciamiento entre canales. En el anexo I se muestra la respuesta en frecuencia a partir de la figura I.1 a la I.6, en donde se puede observar cómo cada señal es multiplexada y demultiplexada. En las tablas I.1 a la I.4 del anexo I se muestran los resultados obtenidos de potencia, OSNR, Factor Q y BER a la salida del multiplexor y demultiplexor, a las velocidades de 4, 6, 7 y 8 Gbps, estos resultados están explicados y resumidos en las figuras 3.31 y 3.32.

En la tabla 3.14 se muestran las potencias a la salida del multiplexor y demultiplexor. En cuanto al OSNR existe un comportamiento similar al de los anteriores espaciamientos. A una velocidad de 6 Gbps a la salida del demultiplexor, el canal 1 tiene un OSNR de 65 dB mientras que el canal 6 presenta un valor de 94 dB, en tanto que a una velocidad de 8 Gbps el primer canal muestra un OSNR de 30 dB mientras que el canal 6 tiene un valor de 69 dB que son valores aceptables.

Tabla 3.14. Potencia a la salida del MUX y a la salida del DEMUX WDM con MZI a 8 Gbps.

Frecuencia (THz)	Potencia de salida del MUX (dBm)	Potencia de salida del DEMUX (dBm)
193.1	-5,842	-5,852
193,125	-5,843	-6,707
193.15	-5,942	-6,757
194,175	-5,949	-6,848
193.2	-5,585	-5,621
195,225	-5,584	-5,844
193.25	-5,477	-6,298
196,275	-5,481	-6,073

La figura 3.31 muestra 8 curvas de Factor Q vs velocidad de transmisión en la que se sintetizan los resultados recopilados del anexo I. La principal observación es que la máxima velocidad alcanzada, en comparación con los otros espaciamentos, se ve reducida notablemente, debido a que al aumentar el número de canales estos empiezan a tener interferencias entre ellos, además de problemas de escalabilidad que presenta el MZI por los varios retardos que sufren ciertos canales.

Como se puede ver en la figura 3.31, cada canal presenta características diferentes. La curva para los canales 1 y 5, a 193.1 y 193.2 THz respectivamente, tiene una caída más pronunciada al pasar de un valor de Q de alrededor de 100 a 20 de 4 a 6 Gbps. Los canales 7 y 8 a, 193.25 y 193.275 THz, logran tener un buen comportamiento hasta los 7 Gbps que es donde cae su valor de Q a 20. A partir de 7 Gbps todos los canales empiezan a tener un comportamiento similar y caen de forma notoria, con la única diferencia que los canales 5 y 6 son los que logran llegar a un valor de 20 a 9 Gbps, mientras que todos los demás canales están por niveles muy bajos, lo que no cumple con las recomendaciones.

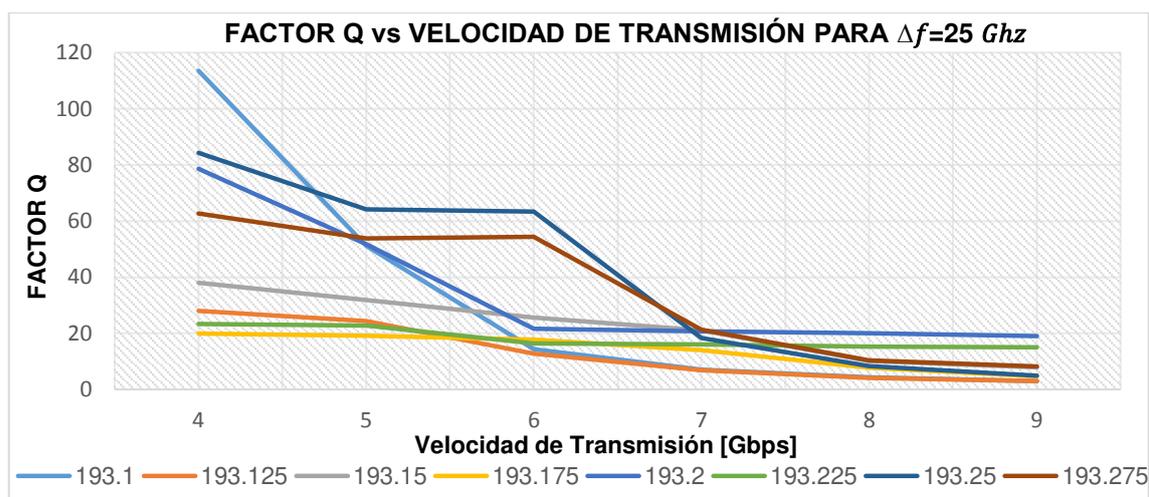


FIGURA 3.31. Factor Q vs Velocidad de transmisión para 8 canales WDM con espaciamento de 25 GHz.

La figura 3.32 muestra las curvas de BER vs velocidad de transmisión, en donde se puede observar cómo se mantiene la tendencia a tener un mayor número de errores con el aumento de la velocidad. Un punto importante es que los canales 5 y 6 tienen una tendencia distinta a los demás canales, esto debido a que pasan por menos retardos en cada etapa, por lo tanto, los errores causados son menores. A 8 Gbps todos los canales, exceptuando los canales 5 y 6, superan los límites establecidos para valores de BER, lo que limita los demás canales y la capacidad total del sistema.

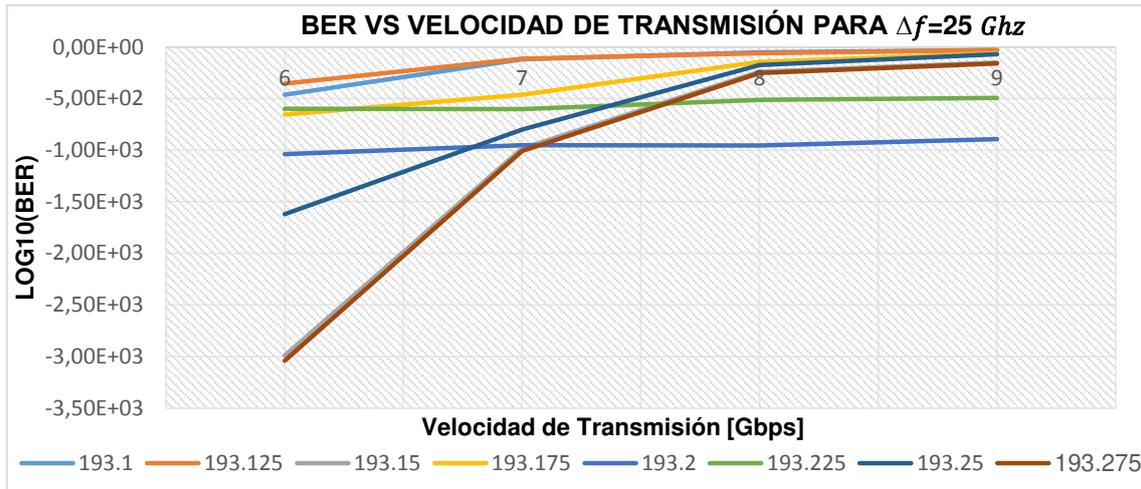


FIGURA 3.32. BER vs Velocidad de transmisión para 8 canales WDM con espaciamento de 25 GHz.

La figura 3.33 muestra el diagrama de ojo para el canal número 2 a 193.125 THz, a velocidades de 6 Gbps (izquierda) y 8 Gbps (derecha), esto debido a que a estas velocidades presentan el peor comportamiento.

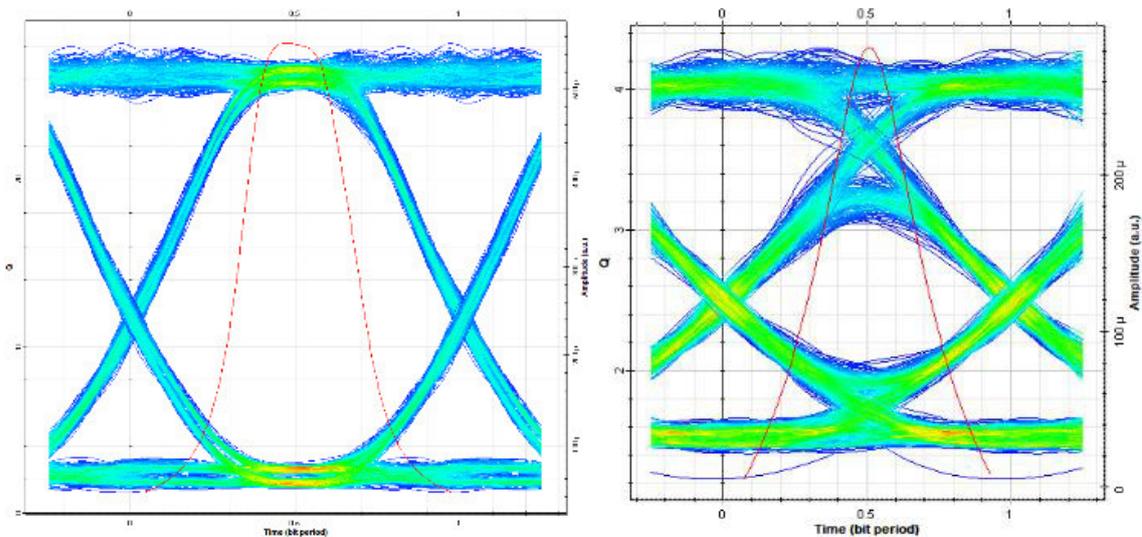


FIGURA 3.33. Diagrama de ojo y factor Q para el canal 193.125 THz a 6 Gbps (izq) y 8 Gbps (der).

Como se puede observar en la figura 3.33, el diagrama de ojo para el canal 2 a 6 Gbps es muy diferente al obtenido a 8 Gbps. A 6 Gbps, se muestra un diagrama de ojo despejado y con buenas características; pero a 8 Gbps el canal decae en su comportamiento porque el diagrama de ojo se encuentra cerrado en el eje horizontal, provocando que la señal presente muchas dificultades para ser muestreada, además empieza a tener distorsión por

la reducción de la altura del ojo en el eje vertical lo que provocará ISI. Por lo tanto, la información se volverá difícil de detectar y recuperar.

Finalmente, en la tabla 3.14 se presenta el Q mínimo y BER máximo para 6, 7,8 y 9 Gbps, tomando en cuenta la degradación máxima de uno de los canales, con lo cual se determina que, hasta 7 Gbps para un espaciamento de canal de 25 GHz, los 8 canales WDM de banda C tienen un desempeño aceptable, permitiendo alcanzar una capacidad total de hasta 56 Gbps.

Tabla 3.15. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM con MZI para 8 canales con espaciamento de 25 GHz a 6, 7, 8 y 9 Gbps

VTx [Gbps]	6	7	8	9
Q min	12,733	6,799	4,163	2,977
BER máx.	4,55E-36	4,89E-12	0,000001482	0,001379

3.2.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MUX/DEMUX WDM CON MZI

Tras realizar todas las simulaciones del MUX/DEMUX WDM con MZI, se puede concluir que su comportamiento, al aumentar el espaciamento de canal, es muy similar en todos los casos analizados, es decir, el factor de calidad Q disminuye y el BER incrementa con el aumento de la velocidad. En el caso de 4 canales, con un espaciamento de canal a 100 GHz, el MUX/DEMUX WDM logró operar a velocidades más altas de hasta 18 Gbps por cada canal, superando la velocidad que se alcanzó al trabajar con espaciamentos de canal de 50 GHz y 25 GHz. En el caso de 8 canales se llegó a velocidades máximas de 15 Gbps por canal con 100 GHz de espaciamento, siendo esta mayor con respecto a los otros espaciamentos de canal, pero inferior con relación a la máxima velocidad alcanzada con 4 canales.

Adicionalmente, para los tres diferentes espaciamentos de canal, se puede observar en los resultados obtenidos que, a mayor espaciamento de canal, mejor calidad tiene la señal de este, ya que su factor de calidad es mayor a las mismas velocidades. Otra similitud, es que canales adyacentes se degradan de la misma manera ocasionando resultados idénticos, esta característica se presenta ya sea para 4 u 8 canales.

En relación con la potencia y comparándola entre todos los espaciamentos de canal, se puede determinar que para el dispositivo MZI, la potencia no es un factor determinante para analizar su comportamiento, principalmente se da porque las pérdidas debido al acoplador de 3 dB son muy predecibles en todos los casos, y los datos muy similares.

Además, se evidencia que presenta un buen OSNR lo que indica que no existe interferencia entre canales adyacentes.

Al observar la respuesta en frecuencia a la salida del demultiplexor, se puede evidenciar que en la gran mayoría de los casos no se muestra componentes de frecuencia o picos indeseados alrededor de la frecuencia central, como es el caso del MUX/DEMUX de 4 canales, en donde el umbral del ruido se encuentra por debajo de -60 dB, por otro lado, en los pocos casos en los que, en una salida del DEMUX WDM se encuentra un pico distinto a la frecuencia deseada, esta se encuentra por debajo de -25 dB, por lo que su influencia es imperceptible. Para el caso de los MUX/DEMUX WDM de 8 canales, el umbral del ruido se encuentra por debajo de los -50 dB y en picos indeseables esta se encuentra por debajo de los -30 dB en raros casos, además de ser señales de canales no adyacentes por lo que no influyen de manera que cause impacto.

3.3. SIMULACIÓN DEL MUX/DEMUX WDM CON FILTROS FBG Y CIRCULADORES

En el desarrollo de esta sección, se hará uso de los elementos mostrados en la figura 3.8.d, 3.8.e y 3.8.f para la implementación de un MUX/DEMUX WDM a partir de componentes FBG y circuladores. Se presenta a continuación los parámetros característicos y las configuraciones de los componentes que justifican la teoría descrita en capítulos anteriores. Todas las simulaciones se realizarán con los espaciamientos de canal, frecuencias y longitudes de onda centrales presentados en la tabla 3.16.

Tabla 3.16. Longitudes de onda y frecuencias centrales para las pruebas de simulación.

Longitudes de onda y frecuencias centrales para las pruebas de simulación					
Espaciamiento de canal = 100 GHz		Espaciamiento de canal = 50 GHz		Espaciamiento de canal = 25 GHz	
Frecuencia Central para Δf 0.1 THz	Longitud de onda central para $\Delta\lambda = 0.8 \text{ nm}$	Frecuencia Central para Δf 0.05 THz	Longitud de onda central para $\Delta\lambda = 0.4 \text{ nm}$	Frecuencia Central para Δf 0.025 THz	Longitud de onda central para $\Delta\lambda = 0.2 \text{ nm}$
193,1	1552,52	193,1	1552,52	193,1	1552,52
193,2	1551,72	193,15	1552,12	193,125	1552,32
193,3	1550,92	193,2	1551,72	193,15	1552,12
193,4	1550,12	193,25	1551,32	193,175	1551,92
193,5	1549,32	193,3	1550,92	193,2	1551,72
193,6	1548,51	193,35	1550,52	193,225	1551,52
193,7	1547,72	193,4	1550,12	193,25	1551,32
193,8	1546,92	193,45	1549,72	193,275	1551,12

3.3.1. MULTIPLEXOR Y DEMULTIPLEXOR CON FILTROS FBG Y CIRCULADORES

En el apartado de este capítulo se presentará la configuración e implementación de un multiplexor y demultiplexor en el software de simulación OptiSystem, haciendo uso de filtros FBG y circuladores. Se trabajará igualmente en la banda C con una longitud de onda inicial de 193.1 THz.

En la figura 3.34 se presenta una FBG con variación uniforme de índice de refracción, como se aprecia en la figura 3.34.b. los configurables en la FBG serán: la frecuencia de la señal que será reflejada por la FBG (*Frequency*), el ancho de banda (*Bandwidth*) y la reflectividad (*Reflectivity*). Para la simulación se usará un valor de reflectividad de 0.99 que está configurada por defecto en OptiSystem, ya que como se mencionó en el capítulo anterior su valor debe ser mayor a 0.95 para aplicaciones DWDM. Para la asignación del parámetro ancho de banda se hará uso de una hoja técnica de una FBG que se encuentra en el anexo J. En la tabla 3.17 se muestran los valores de ancho de banda y espaciamiento de canal correspondientes a la grilla DWDM que se usará para la implementación de un MUX/DEMUX WDM para varios canales.

Tabla 3.17. Ancho de banda medio máximo de una FBG para la construcción de un MUX/DEMUX WDM.

Espaciamiento de canal [Ghz]	Bandwidth [nm]
100	≤ 0.8 > 0.4
50	≤ 0.4 > 0.2
25	≤ 0.2 > 0.1

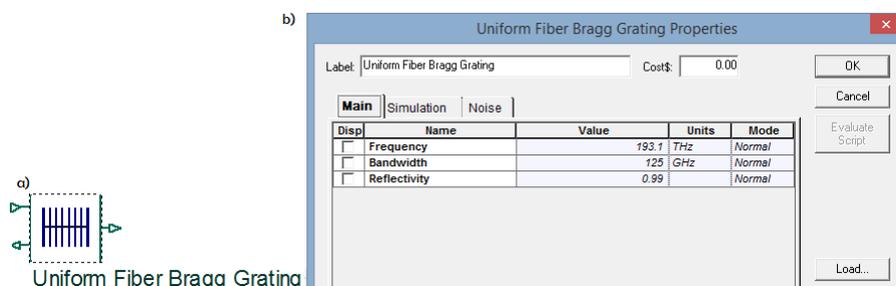


FIGURA 3.34. Uniform Fiber Bragg Grating en OptiSystem a) Elemento b) Parámetros de configuración.

A continuación, se presenta el elemento relacionado a una FBG bidireccional que se usará en la construcción del multiplexor WDM. Este elemento trabaja exactamente igual a una FBG con variación uniforme de índice de refracción, con la única diferencia de que posibilita ingresar dos señales en el componente FBG. En la figura 3.35.b se observa los parámetros que serán configurados para la implementación del multiplexor. El parámetro longitud de onda central (*Center Wavelength*) representa la longitud de onda que será reflejada por la FBG, el ancho de banda (*Bandwidth*) será configurado en base a los valores de la tabla 3.17 y la reflectividad (*Reflectivity*), como se mencionó anteriormente será del 99%. En el resto de parámetros se usarán los valores que vienen configurados por defecto en el componente.

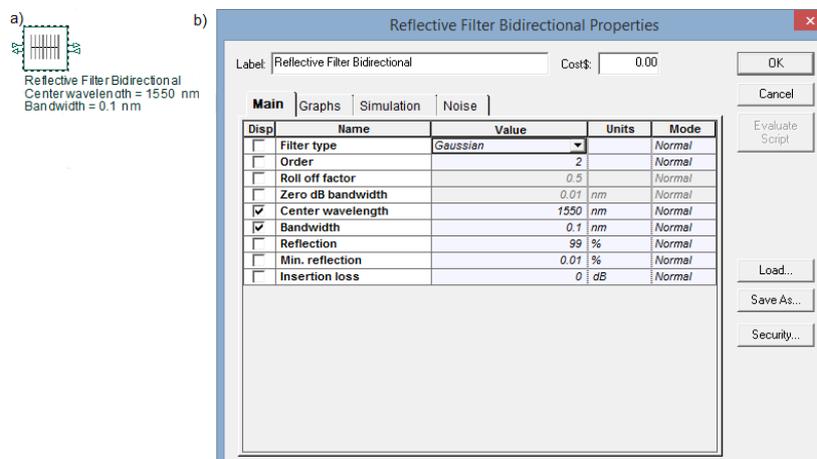


FIGURA 3.35. Reflective Fiber Bidirectional a) Elemento b) Parámetros de configuración.

El elemento *circulator* de la figura 3.36 se usará en la construcción del MUX/DEMUX WDM para recoger la señal reflejada de la FBG y redirigirla a otra salida. En la figura 3.36b, se aprecia que el único parámetro a configurar son las pérdidas de inserción (*Insertion loss*). Como se mencionó en el capítulo anterior, las pérdidas de inserción de un circulator óptico dependen del diseño y de los materiales usados; sin embargo, para todas las simulaciones se usará un valor estándar de pérdidas de inserción de 0.8 dB.

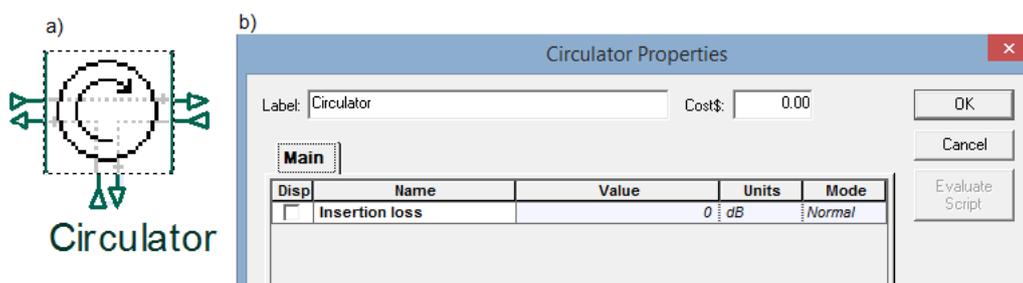


FIGURA 3.36. Circulador óptico a) Elemento b) Parámetros de configuración.

En la figura 3.37 se presenta la configuración de un MUX/DEMUX WDM de 4 canales construido con varias FBG de variación uniforme de índice de refracción y circuladores, además se detalla cómo cada canal se va multiplexando y demultiplexando.

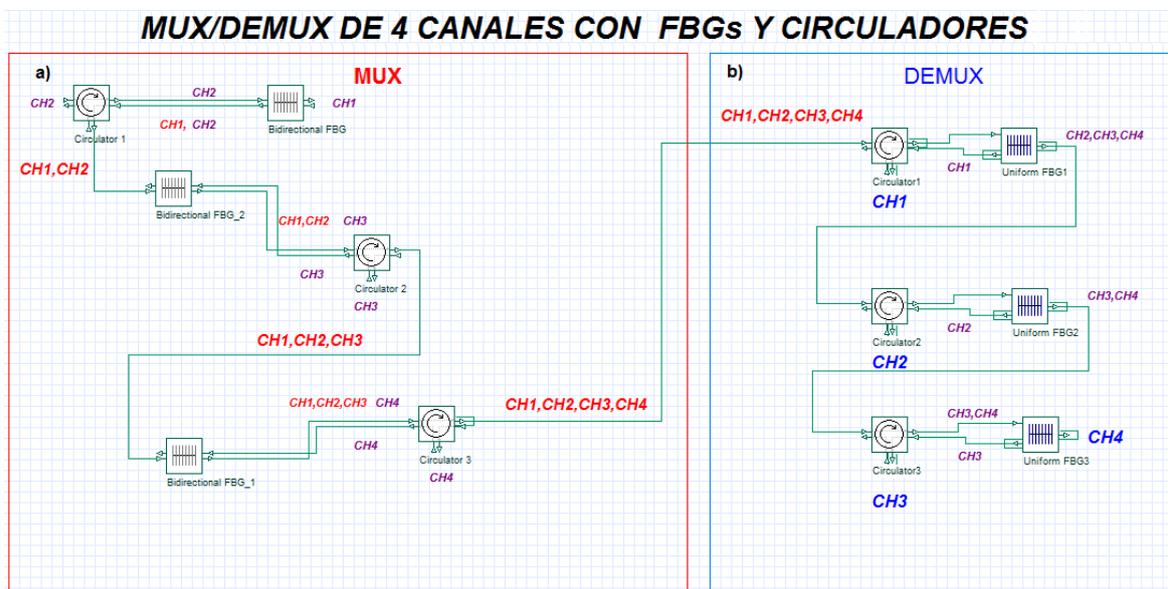


FIGURA 3.37. Implementación de un MUX/DEMUX WDM con FBG de variación de índice de refracción uniforme y circuladores en OptiSystem.

En la figura 3.37a se observa la construcción del multiplexor basado en la configuración teórica del capítulo anterior. Como se puede apreciar en la figura, en el multiplexor WDM se usará FBG bidireccionales debido a que se requiere que dos señales ingresen a través de las FBG. Por otro lado, para el demultiplexor de la figura 3.37b, su configuración es exactamente igual a la teórica. En este caso se usará FBG con distribución uniforme de índice de refracción ya que solo se requiere que una señal ingrese a través de las FBG.

3.3.2. SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX CON FBG Y CIRCULADORES PARA 4 CANALES, VARIANDO EL ESPACIAMIENTO DE CANAL Y VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN

Las siguientes simulaciones se basan en el escenario presentado en la figura 3.38. Se obtendrá la respuesta en frecuencia y se medirá la potencia a la salida del multiplexor y demultiplexor con el fin de analizar el factor Q y el diagrama de ojo para cada escenario. Se realizarán varias simulaciones con valores de espaciamento de canal de 100, 50 y 25 GHz, además se variará la velocidad de transmisión para cada valor de espaciamento de canal.

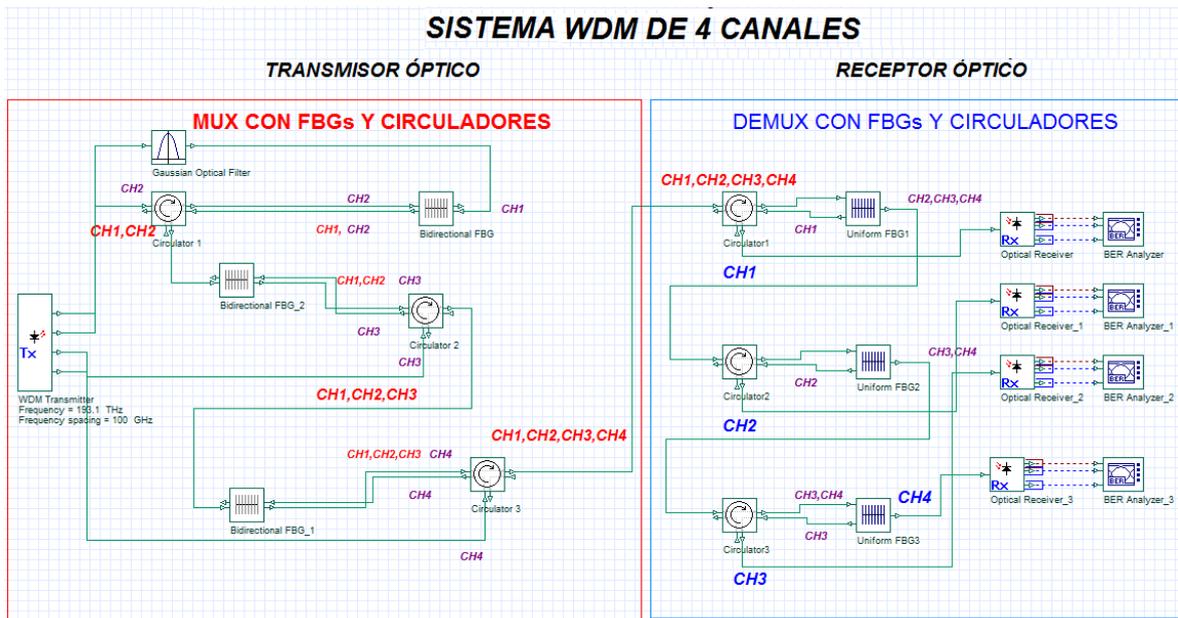


FIGURA 3.38. Sistema WDM con FBG y Circuladores para 4 canales de entrada modelado en OptiSystem.

Las mediciones respectivas de potencia y OSNR se hacen a la salida del multiplexor y demultiplexor, además de realizar la conversión del dominio óptico al eléctrico para medir el Factor Q y BER. La respuesta en frecuencia, diagrama de ojo y resultados obtenidos de la simulación se presentan en los Anexos K, L y M en donde se muestran las señales multiplexadas y demultiplexadas de cada etapa para los diferentes espaciamentos de canal.

3.3.2.1. Simulación de MUX/DEMUX WDM con FBG y circuladores para 4 canales con espaciamiento de 100 GHz

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de la simulación para un MUX/DEMUX WDM con espaciamiento de canal de 100 GHz y una longitud de onda inicial de 193.1 THz. La simulación consiste en variar la velocidad de transmisión en el escenario de la figura 3.38 con el fin de encontrar una relación entre la velocidad de transmisión y el factor Q.

En el anexo K se presenta de forma detallada los resultados obtenidos para cada uno de los canales simulados a distintas velocidades con sus respectivos diagramas de ojo, factor Q, BER y OSNR, obtenidos mediante los componentes *BER Analyzer* y *WDM Analyzer* respectivamente.

En la gráfica 3.39 se aprecia la respuesta en frecuencia para los canales intermedios, 2 y 3. De la respuesta en frecuencia se puede concluir que al ser canales intermedios y al

trabajar con un espaciamiento de canal de 100 GHz, estos están expuestos a sufrir interferencia debido a longitudes de onda adyacentes, motivo por el cual la calidad de estos canales se deteriora con mayor intensidad en comparación a los canales extremos 1 y 4, obteniendo valores de factor Q menores.

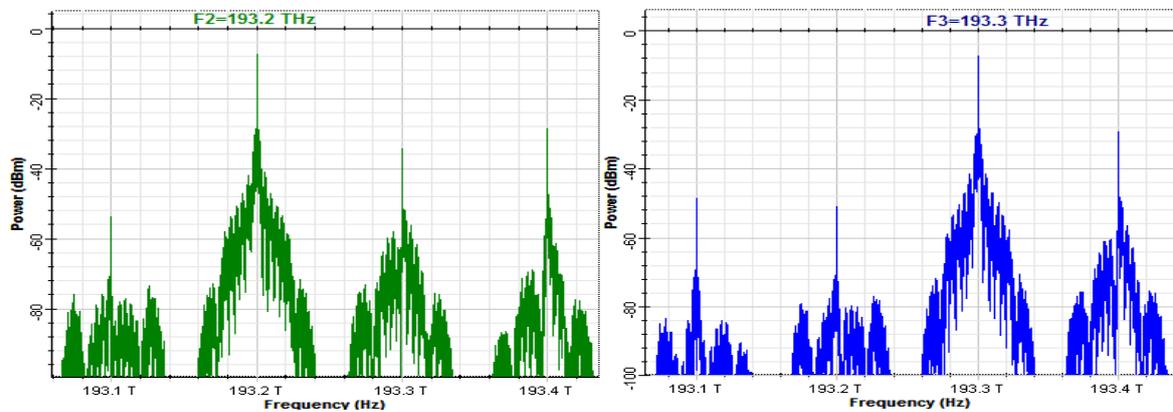


FIGURA 3.39. Respuesta en frecuencia de la demultiplexación de los canales 2 (izq) y 3 (der) respectivamente para un MUX/DEMUX de 4 canales WDM.

Junto con las longitudes de onda demultiplexadas se presentan tres componentes no deseadas que están entre 20 y 40 dB aproximadamente por debajo de la longitud de onda demultiplexada (193.2 THz y 193.3 THz). Las componentes no deseadas se producen por el efecto del trabajo de reflexión en las FBG. Como se mencionó anteriormente se usó FBG con variación uniforme de índice de refracción y una reflectividad del 99%, motivo por el cual, en la respuesta en frecuencia de las señales que se obtiene por reflexión en la FBG. Se observan lóbulos laterales que aumentan el nivel de diafonía en los canales demultiplexados, además de presentarse problemas de dispersión donde parte del canal reflejado también está presente en los canales transmitidos.

Debido a que el MUX/DEMUX WDM está compuesto por varias FBG y al no contar con una reflectividad del 100%, las señales se irán deteriorando a medida que sean reflejadas dentro del MUX/DEMUX WDM. Como se observa en la figura 3.38 los canales 2 y 3 son reflejados una vez en el multiplexor y una segunda vez en el demultiplexor, provocando una mayor dispersión neta a la salida. En los resultados obtenidos de la simulación, se puede evidenciar que esta dispersión y diafonía tiene una mayor presencia en los canales intermedios, disminuyendo el valor del factor Q.

Por otro lado, en la Figura 3.40 se observa la respuesta en frecuencia de los canales extremos 1 y 4. De esta gráfica se puede concluir que al ser canales ubicados en los extremos no sufren tanto deterioro en la calidad por interferencia de longitudes de onda adyacentes, debido a que únicamente se tienen longitudes de onda adyacentes a un

extremo de la señal demultiplexada. Motivo por el cual sus valores de factor Q son mayores en comparación al de los canales intermedios.

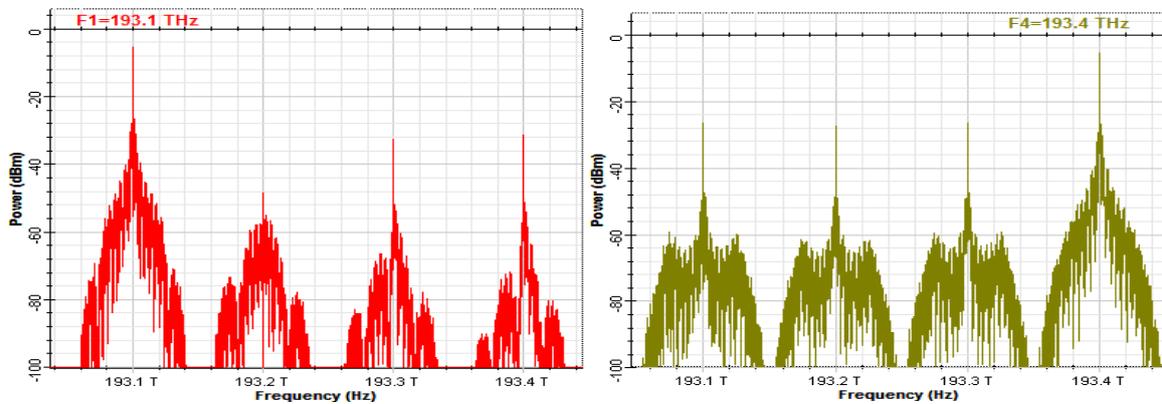


FIGURA 3.40. Respuesta en frecuencia de la demultiplexación de los canales 1 (izq) y 4 (der) respectivamente para un MUX/DEMUX de 4 canales WDM.

En la gráfica 3.38 también se puede observar que el canal 1 es recuperado en un puerto de reflexión de la FBG, mientras que el canal 4 es recuperado por un puerto de transmisión de la FBG. Al observar la Respuesta en frecuencia del canal 4 se aprecia que junto con la longitud de onda central de 193.4 THz, también están presentes tres picos correspondientes a los tres canales que fueron demultiplexados anteriormente, pero con una potencia muy por debajo de la del canal 4 (aproximadamente 24 dB). Esto se debe a que las FBG no cuentan con una reflectividad del 100%, dejando pasar picos pequeños de señales que fueron reflejadas anteriormente en el MUX/DEMUX WDM.

En las tablas K.1 a K.12 del anexo K se presentan todos los valores de OSNR que se obtuvieron durante la simulación. Se observa que los canales presentan valores de OSNR entre 36.661 y 96.136 dB, mismo que son aceptables con respecto al ruido que se aprecia en la respuesta en frecuencia.

En la figura 3.41 se muestran 4 curvas de los 4 canales que son multiplexados y demultiplexados, observándose que al aumentar la velocidad de transmisión el factor Q tiende a disminuir en los 4 canales. Un comportamiento importante observado es que el canal 4 tiene menor factor Q hasta una velocidad de transmisión de aproximadamente de 20 Gbps; sin embargo, al sobrepasar esta velocidad los canales intermedios tienen menor factor Q mientras que los canales externos tienden a tener un factor Q mayor.

Por otro lado, se observa que al aumentar la velocidad el factor Q del canal 1 disminuye con mayor intensidad que el del canal 4, debido a la dispersión y diafonía presentes por lóbulos indeseados producto de la reflexión en las FBG. Como se observa en la figura 3.38,

la longitud de onda del canal 1 es obtenida por un puerto reflejado de la FBG. Al trabajar con un espaciamiento de canal grande de 100 GHz y con bajas velocidades, la diafonía en el canal 1 no es tan notoria. Sin embargo, con el aumento de la velocidad la diafonía es más intensa debido a que se envía una gran cantidad de bits en un intervalo más pequeño de tiempo, afectando la calidad del sistema y su factor Q.

Al contrario del canal 1, el canal 4 no disminuye su factor Q drásticamente con el aumento de la velocidad, esto se debe a que el canal 4 es recuperado por un puerto de transmisión de la última FBG del demultiplexor y por ende no sufre los efectos de reflexión de los demás canales. En la respuesta en frecuencia de la figura 3.40, junto con la longitud de onda del canal 4 existen tres picos correspondientes a porciones de las longitudes de onda de los canales que fueron demultiplexados anteriormente mediante reflexión por las FBG que conforman el MUX/DEMUX WDM. Debido al espaciamiento de canal grande de 100 GHz, estos tres picos no afectan tanto a la longitud de onda central del canal 4, obteniendo un mejor factor Q que el del canal 1 a mayores velocidades.

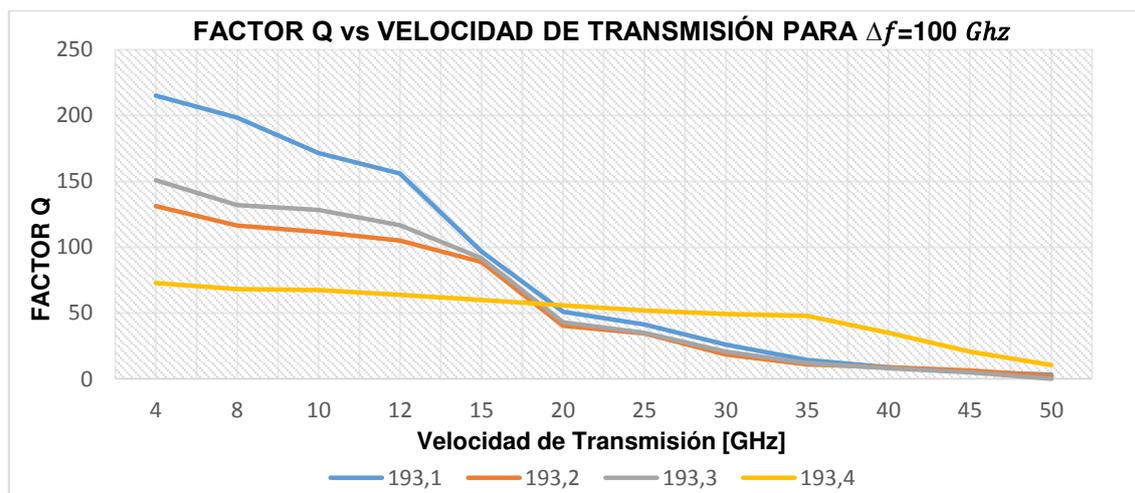


FIGURA 3.41. Factor Q vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamiento de 100 GHz.

Los valores de BER obtenidos de las tablas K.1 a K.12 del anexo K, se resumen en la figura 3.42. Se concluye que al aumentar la velocidad de transmisión el BER también aumenta en los 4 canales. Además, se observa que los canales intermedios tienen un BER más alto que los canales extremos. Sin embargo, se tiene una diferencia notoria en el canal 4, ya que sus valores de BER son muy bajos en comparación a los demás canales, debido a que el canal 4 es obtenido por un puerto de transmisión de la FBG donde los picos extras que se presentan al demultiplexar el canal 4 no tienen tanta incidencia puesto que el espaciamiento de canal es grande (100 GHz). Sin embargo, los canales que son obtenidos por los puertos de reflexión de las FBG son afectados por la dispersión, diafonía presente

en las FBG y además por interferencias de longitudes de onda adyacentes. Como se ve en la figura 3.42, la dispersión, diafonía por lóbulos indeseados debido a la reflexión de las FBG y la interferencia por canales adyacentes afectan directamente al BER y al tener una menor dispersión e interferencia en el canal 4, sus valores de BER lógicamente serán menores que aquellos de los demás canales.

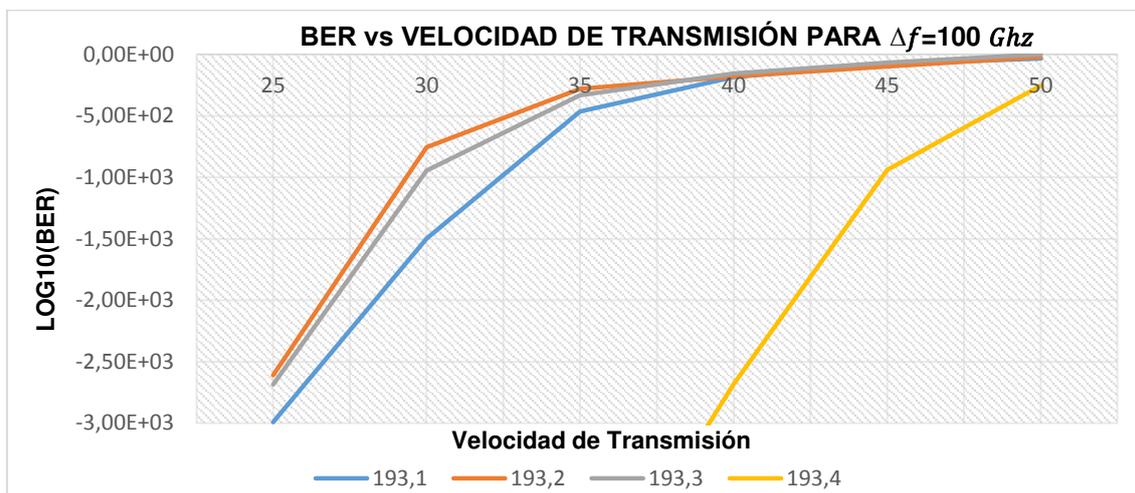


FIGURA 3.42. BER vs Velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamiento de 100 GHz.

De las gráficas 3.41 y 3.42 se puede establecer que a mayor factor Q el BER será menor y dependiendo de estos valores se determina si la calidad de cada canal es óptima o no funcional.

De la tabla 3.18 se puede concluir que el MUX/DEMUX WDM basando en FBG y circuladores con espaciamiento de canal de 100 GHz, funciona de manera óptima hasta una velocidad de transmisión de 40 Gbps por canal, es decir una capacidad máxima de 160 Gbps. Se aprecia que a una velocidad de 40 Gbps el valor de Q mínimo es de 8.071 y el valor de BER máximo es de $3,18 \cdot 10^{-16}$, estos valores cumplen con los valores recomendados, no así a velocidades mayores a 40 Gbps para las que el MUX/DEMUX WDM ya no será funcional.

Tabla 3.18. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM con FBG y circuladores para 4 canales con espaciamiento de canal de 100 GHz a 25, 40 y 45 Gbps.

VTx [Gbps]	25	40	45
Q min	34,541	8,071	5,082
BER máx.	$9,46 \cdot 10^{-262}$	$3,18 \cdot 10^{-16}$	$1,71 \cdot 10^{-7}$

En la figura 3.43 se observa el diagrama de ojo del canal 2 de 193.2 THz (peor caso) a 4 Gbps y 45 Gbps, el resto de los diagramas de ojo para todos los canales se pueden observar en el anexo K en las figuras K.5 a K.16. Se aprecia que el diagrama de ojo a 4 Gbps se encuentra despejado con lo que se puede concluir que la señal llega correctamente y con buena calidad al receptor. Sin embargo, al aumentar la velocidad a 45 Gbps el diagrama de ojo se deteriora y tiende a cerrarse presentándose interferencia entre símbolos y disminuyendo la calidad de la señal en la recepción. Por ende, al trabajar con una velocidad superior o igual a 45 Gbps la señal en la recepción no se podrá recuperar y el MUX/DEMUX será inoperable.

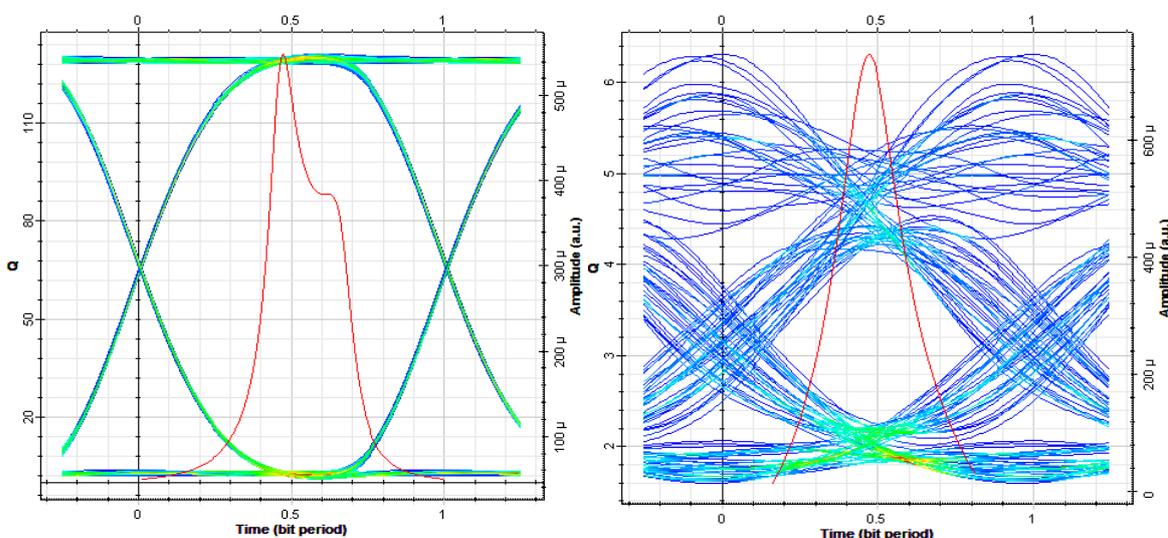


FIGURA 3.43. Diagramas de ojo para el canal 193.2 THz a 4 Gbps (izq) y 45 Gbps (der).

En la tabla 3.19 se muestran las pérdidas por inserción del canal con mayores pérdidas a 40 Gbps, que corresponde al canal a 193.2 THz, las cuales son de aproximadamente 4 dB (3.983 dB exactamente) en el MUX y aproximadamente 2.5 dB (2.448 dB exactamente) en el DEMUX. Estas pérdidas son el resultado de la suma de pérdidas entre los circuladores y FBG, las pérdidas en cada canal son diferentes debido a que cada longitud de onda viaja a través de un número distinto de circuladores y FBG en el MUX/DEMUX WDM.

Tabla 3.19. Potencia de entrada, salida del MUX y de salida del DEMUX con FBG y circuladores a 40 Gbps.

Frecuencia (THz)	Potencia de entrada al MUX (dBm)	Potencia de salida del MUX (dBm)	Potencia de salida del DEMUX (dBm)
193,2	0.404	-3,579	-6,027

También es evidente que las pérdidas por inserción son mayores en los canales intermedios que en los canales extremos. Debido a que las pérdidas de inserción en las FBG están dadas por las pérdidas en reflexión. Como las longitudes de onda de canales intermedios son reflejadas dos veces, una en el MUX y otra en el DEMUX, estas tendrán mayores pérdidas que las longitudes de onda de los extremos que únicamente se reflejan una vez, tal como se lo muestra en la figura 3.38.

3.3.2.2. Simulación de MUX/DEMUX WDM FBG y circuladores para 4 canales con espaciamento de 50 GHz.

Al simular el MUX/DEMUX WDM de la figura 3.38 con espaciamento de canal de 50 GHz se obtuvo los resultados detallados en el anexo L con sus respectivos valores de BER, factor Q y OSNR y gráficas. Durante todas las simulaciones se obtuvieron valores de OSNR entre 23.085 y 44.564 dB para los distintos canales WDM, los mismos que son bastante buenos. Esta información se puede apreciar en las tablas L.1 a L.7 del anexo L.

En las tablas L.1 a L.7 del anexo L se muestran los datos de factor Q obtenidos para distintas velocidades, que se resumen en la figura 3.44. Se puede concluir que, al reducir el espaciamento de canal a 50 GHz, las 4 curvas se comportan de igual manera que en el escenario anterior, es decir su valor de Factor Q decrece con el aumento de la velocidad. Además, los canales intermedios tienden a tener un factor Q menor que el de los canales extremos. Como se explicó anteriormente esto se debe a que los canales intermedios sufren mayor interferencia por longitudes de onda adyacentes, dispersión y diafonía ya que las FBG no tienen un 100% de reflectividad, lo que provoca que sufran una mayor dispersión neta debido a que son reflejadas 2 veces en el MUX/DEMUX WDM.

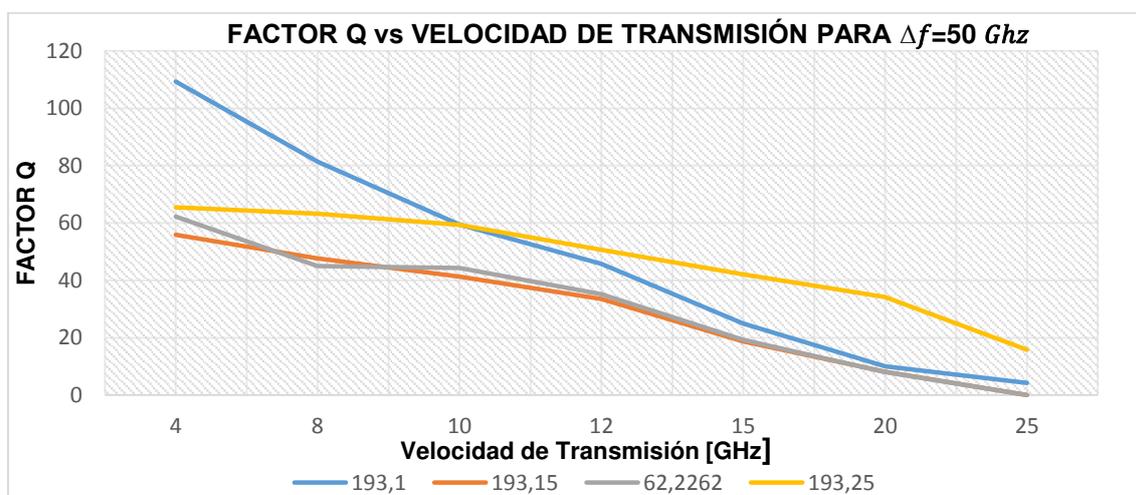


FIGURA 3.44. Factor Q vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamento de 50 GHz.

Al disminuir el espaciamento de canal de 100 GHz a 50 GHz, las curvas de los 4 canales tienen un comportamiento muy similar al descrito en los resultados obtenidos con un espaciamento de canal de 100 GHz. Una diferencia que se hace notar al reducir el espaciamento de canal a 50 GHz, es que los valores de factor Q de todos los canales a una velocidad determinada son inferiores a los que se lograron en la simulación a 100 GHz de espaciamento de canal, tal y como se lo observa en la figura 3.44.

Los valores de BER obtenidos de las tablas L.1 a L.7 del anexo L, se resumen en la figura 3.45. Se concluye que al aumentar la velocidad de transmisión el BER también aumenta en los 4 canales. Además, los canales intermedios tienen un peor BER que los canales extremos, con una diferencia en el canal 4 que es el que tiene mejor BER que el resto. Al disminuir el espaciamento de canal de 100 GHz a 50 GHz, los valores de BER para cada velocidad simulada respectivamente tienden a aumentar, es decir con la disminución del espaciamento de canal el BER tiende a deteriorarse en los 4 canales.

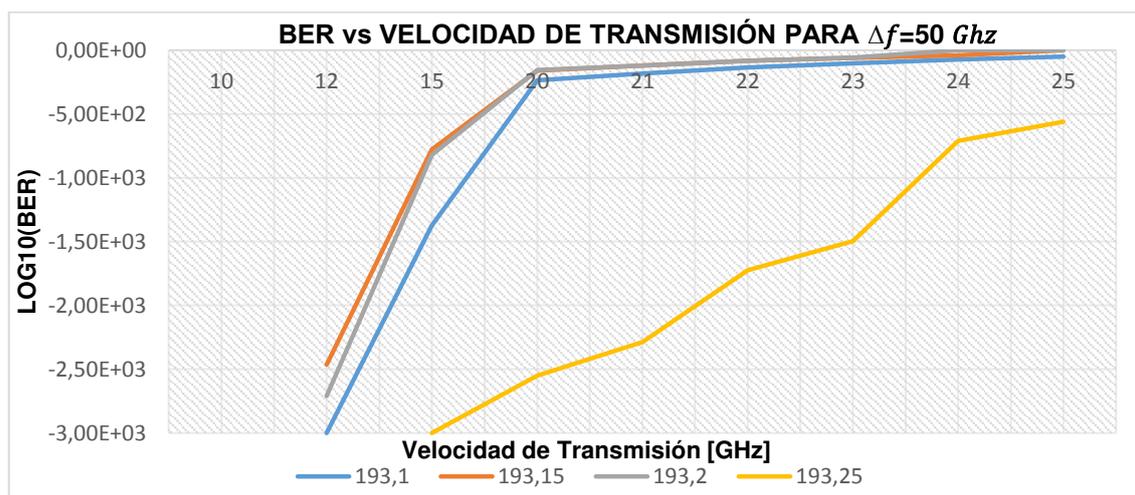


FIGURA 3.45. BER vs Velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamento de 50 GHz.

De la tabla 3.20 se puede concluir que al disminuir el espaciamento de canal en el MUX/DEMUX WDM de 100 GHz a 50 GHz, el factor Q y BER son afectados negativamente en todas las velocidades simuladas con respecto a un espaciamento de canal de 100 GHz. El MUX/DEMUX WDM con espaciamento de canal de 50 GHz puede operar hasta una velocidad de 20 Gbps, menor a la que se alcanzaba con un espaciamento de canal de 100 GHz (40Gbps), pues a 25 Gbps el valor de Q es 0 y el BER llega a 1.

Tabla 3.20. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM con FBG y circuladores para 4 canales con espaciamento de canal de 50 GHz a 4, 20 y 25 Gbps.

VTx [Gbps]	4	20	25
Q mínimo	55,930	8,066	0
BER máximo	0	$3,34 \cdot 10^{-16}$	1

En la figura 3.46 se visualiza el diagrama de ojo para el cuarto canal a 4 y a 20 Gbps. Se aprecia que con el aumento de la velocidad el diagrama de ojo se deteriora provocando que el ojo se cierre. Se puede predecir que al trabajar a velocidades superiores a 20 Gbps el diagrama de ojo estará cerrado, lo que no garantiza que la señal llegue correctamente a recepción. Al disminuir el espaciamento de canal los diagramas de ojo se deterioran en cada una de las velocidades que se simularon, este comportamiento sucede de manera similar en los demás canales y se puede observar en las figuras L.5 a L.11 del anexo L.

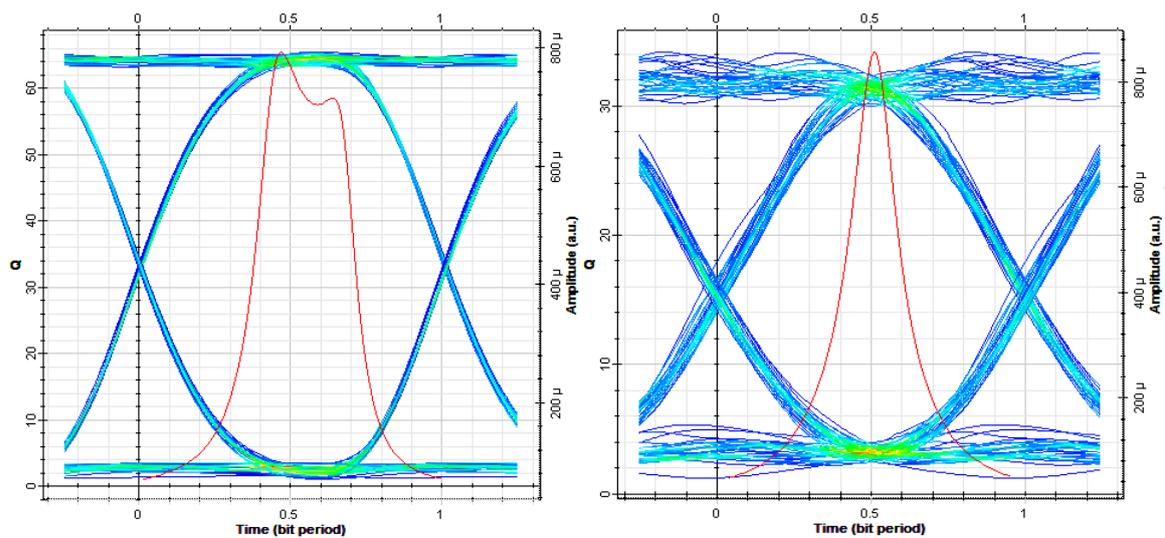


FIGURA 3.46. Diagramas de ojo para el cuarto canal 193.25 THz a velocidades de transmisión de 4 Gbps (izq) y 20 Gbps (der).

En la tabla 3.21 se muestra las potencias de entradas y salida del MUX/DEMUX WDM para el canal 2 (peor caso) a 192.15 THz. Las pérdidas de inserción para un espaciamento de canal de 50 GHz no son exactamente las mismas comparadas con un espaciamento de 100 GHz, aunque son muy parecidas. Los valores de pérdidas de inserción en el MUX son aproximadamente 3.8 dB (3.748 dB exactamente) y 2.5 dB (2.492 dB exactamente) aproximadamente en el DEMUX. Esto se debe a que las pérdidas de inserción en un FBG están dadas por las pérdidas en reflexión, estas no siempre son constantes y varían con el grado de dispersión en el puerto reflejado del componente FBG, la velocidad de transmisión

y el espaciamiento de canal. De igual manera que con un espaciamiento de 100 GHz, los canales con mayores pérdidas de inserción son los canales intermedios 2 y 3.

Tabla 3.21. Potencia de entrada, salida del MUX y de salida del DEMUX con FBG y circuladores a 20 Gbps.

Frecuencia (THz)	Potencia de entrada al MUX (dBm)	Potencia de salida del MUX (dBm)	Potencia de salida del DEMUX (dBm)
193,15	0.404	-3,344	-5,836

3.3.2.3. Simulación de MUX/DEMUX WDM FBG y circuladores para 4 canales con espaciamiento de 25 GHz

Finalmente se utiliza el mismo esquema de simulación de los apartados anteriores, pero con un espaciamiento de canal de 25 GHz y una longitud de onda central de 193.1 THz. Todos los datos de BER, Factor Q, OSNR y gráficos obtenidos de la simulación se presentan detalladamente en el anexo M.

Los valores de OSNR obtenidos en las simulaciones se presentan en la tabla M.1 A M.5 del anexo M. Se aprecia que los OSNR para todos los canales son buenos ya que se encuentra en un rango de 26.049 a 46.694 dB.

En las tablas M.1 a M.5 del anexo M se muestran los resultados de factor Q obtenidos para distintas velocidades, mismos que se encuentran resumidos en la figura 3.47. Se puede concluir que al aumentar la velocidad de transmisión el factor Q de los 4 canales disminuye, el comportamiento es similar al observado cuando se trabajó con un espaciamiento de canal mayor. Sin embargo, al disminuir el espaciamiento de canal se obtuvo valores de factor Q mucho más bajos que cuando se trabajó con un espaciamiento de canal mayor. Un cambio importante que se observa al reducir el espaciamiento de canal a 25 GHz es que ahora el canal 4 ya no se destaca con tanta notoriedad como en los escenarios anteriores, debido a que como se trabaja con un espaciamiento de canal pequeño de 25 GHz, los tres picos que se obtienen en la respuesta en frecuencia junto a la demultiplexación del canal 4 ya empiezan a interferir con mayor intensidad, ya que están más juntos a la longitud de onda central del canal 4. Esto se puede observar en la respuesta en frecuencia de la figura M.4 del anexo M.

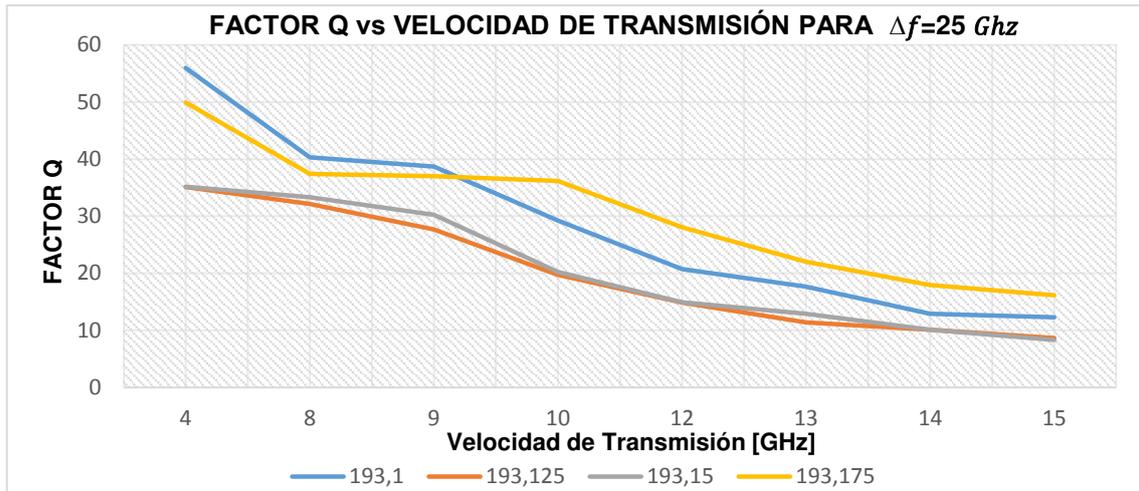


FIGURA 3.47. Factor Q vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamento de 25 GHz.

Los valores de BER obtenidos de las tablas M.1 a M.5 del anexo M, se resumen en la figura 3.48. Se puede observar que al aumentar la velocidad de transmisión el BER también aumenta en los 4 canales. Además, se observa que los canales intermedios tienen un BER más alto que los canales extremos. Al igual que en los escenarios anteriores el canal 4 es el que mejor BER presenta, sin embargo, este ya no tiene tanta diferencia con el de los otros canales, como en los casos de un espaciamento de canal de 50 y 100 GHz. Como se mencionó anteriormente esto es debido a la interferencia producida por los tres picos que se obtienen junto a la longitud de onda central del canal 4 y al trabajar con un espaciamento de canal pequeño de 25 GHz, esta interferencia llega a ser tan negativa como la que se produce en el proceso de reflexión de las FBG y afecta directamente al BER.

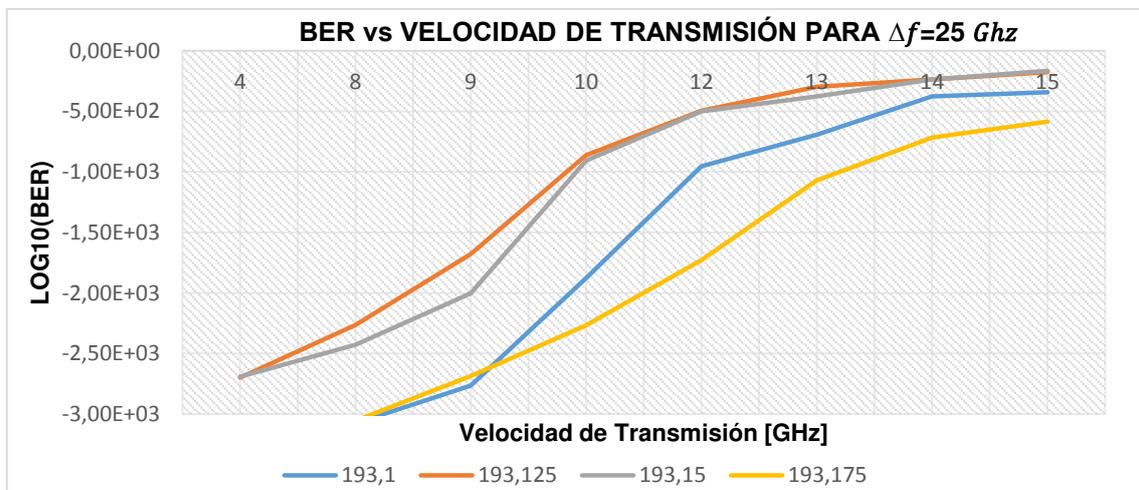


FIGURA 3.48. BER vs Velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamento de 25 GHz.

En la tabla 3.22 se observan los valores de factor Q y BER para las velocidades más relevantes de la simulación. Se puede concluir que el MUX/DEMUX con espaciamento de canal de 25 GHz puede operar a una velocidad de hasta 15 Gbps por canal, que es una velocidad menor en comparación a la que se alcanzó con espaciamento de canal de 50 GHz. A 15 Gbps los valores de factor Q y BER cumplen con los valores recomendados; sin embargo, a velocidades mayores a 15 Gbps el MUX/DEMUX ya no opera correctamente ya que el factor Q es menor al mínimo recomendado y el BER supera al valor máximo recomendado.

Tabla 3.22. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM con FBG y circuladores para 4 canales con espaciamento de canal de 25 GHz a 4, 8, 10,12 y 15 Gbps.

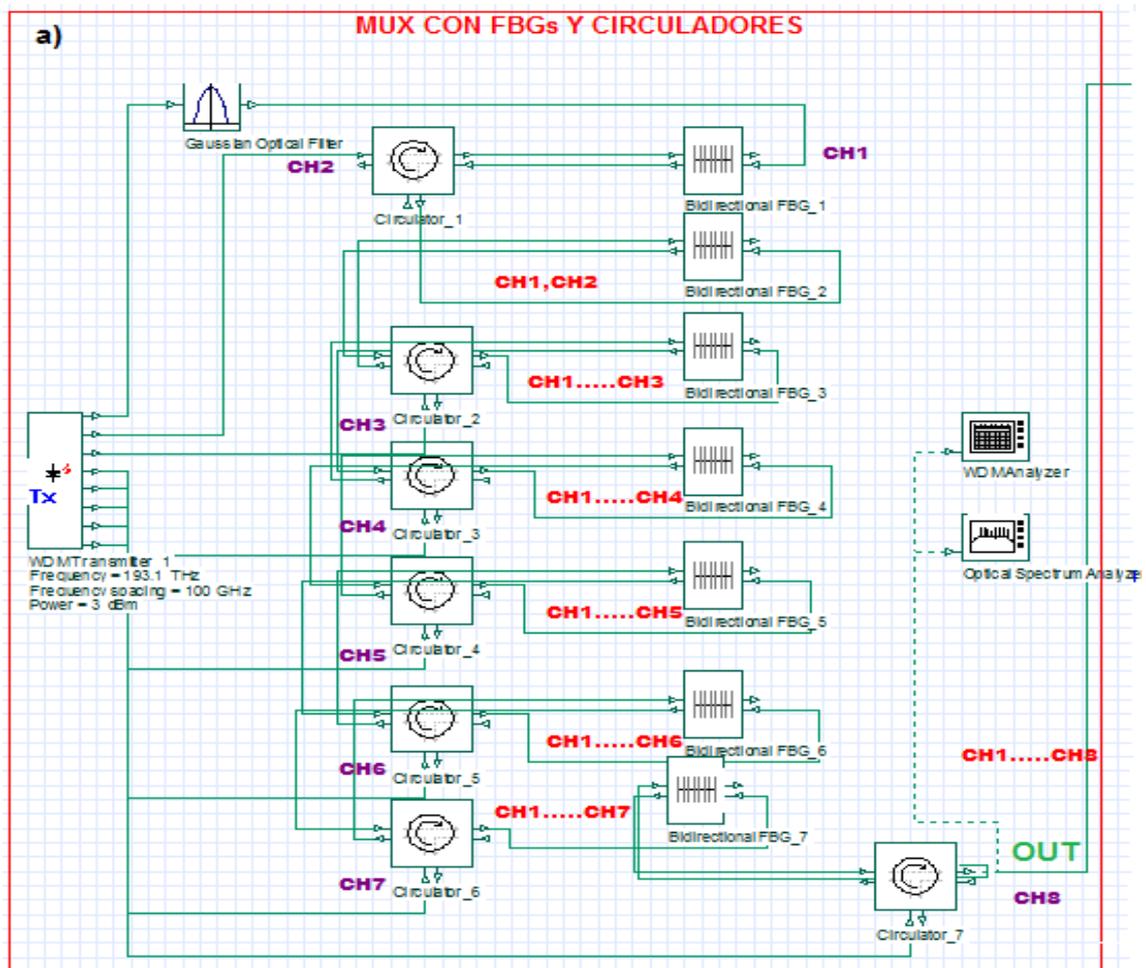
VTx [Gbps]	4	8	10	12	15
Q min	35,123	32,163	19,721	14,868	8,338
BER max	$6,12 \cdot 10^{-270}$	$2,93 \cdot 10^{-227}$	$6,59 \cdot 10^{-87}$	$2,43 \cdot 10^{-50}$	$1,99 \cdot 10^{-18}$

En las figuras M.5 a M.9 del anexo M se presentan los diagramas de ojo para cada uno de los 4 canales a distintas velocidades. De manera similar que para los casos de espaciamento de 100 y 50 GHz, los diagramas de ojo se van deteriorando con el aumento de la velocidad. Sin embargo, al trabajar con un espaciamento de canal de 25 GHz se puede obtener un diagrama de ojo relativamente bueno a 15 Gbps. A velocidades mayores a 15 Gbps el diagrama de ojo de los 4 canales ya no es bueno.

En cuanto a pérdidas de inserción, se obtuvo los resultados del canal con mayor pérdida de inserción del MUX/DEMUX WDM a 15 Gbps. En la tabla M.5 del anexo M se observa que el canal a 193.125 THz presenta mayores pérdidas de inserción. Estas pérdidas son de aproximadamente 3.7 dB (3.62 dB exactamente) en el MUX y aproximadamente 2.7 dB (2.64 dB exactamente) en el DEMUX. Como se concluyó anteriormente, las pérdidas no son las mismas cuando se varía el espaciamento de canal. Debido a que la velocidad y el espaciamento de canal afectan a las pérdidas de inserción pues en las FBG las pérdidas de inserción vienen dadas por las pérdidas en reflexión.

3.3.3 SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX CON FBG Y CIRCULADORES PARA 8 CANALES, VARIANDO EL ESPACIAMIENTO DE CANAL Y VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN

En este apartado se realizarán simulaciones para un MUX/DEMUX WDM de 8 canales basado en FBG y circuladores. Se utilizará el escenario de la figura 3.49 para recopilar información que posteriormente será analizada. Al igual que el apartado anterior, se realizarán varias simulaciones con espaciamentos de canal de 100, 50 y 25 GHz, variando la velocidad de transmisión para cada espaciamento de canal.



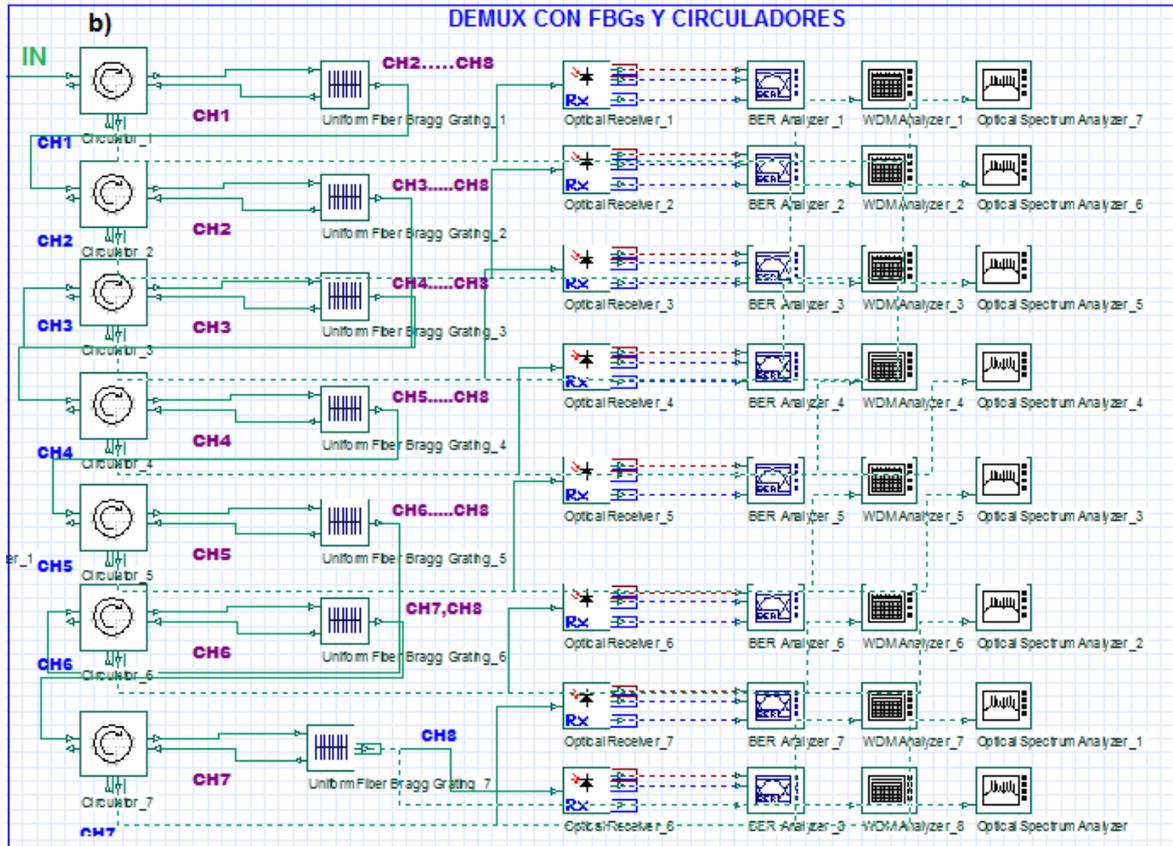


FIGURA 3.49. a) MUX b) DEMUX basado en FBG y Circuladores de 8 canales modelado en OptiSystem.

De igual manera que el MUX/DEMUX WDM para 4 canales, se medirán parámetros como potencia de salida, OSNR, factor Q y BER. Todos los resultados obtenidos se presentan en el Anexo Y junto con su respuesta en frecuencia.

3.3.3.1. Simulación de MUX/DEMUX WDM FBG y circuladores para 8 canales con espaciamiento de 100 GHz

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al variar la velocidad de transmisión en un MUX/DEMUX WDM de 8 canales con un espaciamiento de canal de 100 GHz y una longitud de onda inicial de 193.1 THz. Los resultados detallados de factor Q, BER, OSNR diagramas de ojo y respuesta en frecuencia obtenidos mediante los componentes *BER Analyzer* y *WDM Analyzer*, se presentan en el anexo N.

De las tablas N.1 a N.6 del anexo N, se puede observar que los valores de OSNR para todos los canales durante la simulación son tolerables, mismo que se encuentra en un rango de 37.691 a 56.945 dB.

En la figura 3.50 se presenta la respuesta en frecuencia de tres canales demultiplexados, correspondientes al canal 1 (izquierda), 4 (centro) y 8 (derecha) respectivamente, estos

tres canales se escogieron, debido a que están ubicados en los extremos y en el medio de todos los 8 canales demultiplexados, la respuesta en frecuencia de todos los canales se puede observar en las figuras N.1 y N.2 del anexo N.

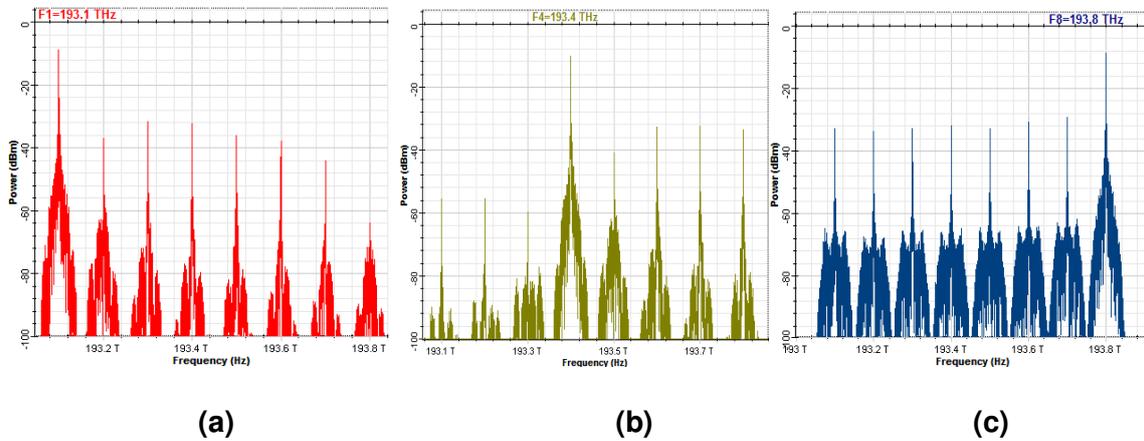


FIGURA 3.50. Respuesta en frecuencia de la demultiplexación de los canales a) 1, b) 4 y c) 8 respectivamente para un MUX/DEMUX de 8 canales WDM a 100 GHz.

Se observa que al aumentar el número de canales, los canales intermedios estarán más expuestos a una mayor interferencia por longitudes de onda adyacentes. Esto se puede apreciar en la figura 3.50b, donde junto con la demultiplexación del canal 4 se presentan varios picos con potencias menores a sus extremos. En todos los canales demultiplexados excepto en el último, también se presenta dispersión y diafonía debido a la reflexión en las FBG, ya que su reflectividad no es del 100%. Estos inconvenientes se verán reflejados directamente en la calidad de cada uno de los 8 canales a medida que circulen a través de cada uno de los componentes que conforman el MUX/DEMUX WDM.

Por otro lado, en las figuras 3.50a y 3.50b se observa la respuesta en frecuencia de los canales extremos 1 y 8. Se puede concluir que al ser canales ubicados en los extremos no sufren tanto deterioro en su calidad por interferencia de longitudes de onda adyacentes, debido a que únicamente se tienen longitudes de onda adyacentes a un extremo de la señal demultiplexada, además de que se trabajó con un espaciamiento de canal relativamente grande de 100 GHz. Debido a esto sus valores de factor Q y BER tendrán mejores características que el resto de los canales.

Adicionalmente, se observa que la respuesta en frecuencia del canal 8 de 193.8 THz es diferente a la del resto de canales. Al igual que en el MUX/DEMUX de 4 canales este canal no se demultiplexa por medio de la reflexión de la última FBG, sino que únicamente se transmite a través de todos los componentes del MUX/DEMUX WDM hasta que todos los canales sean demultiplexados. Los picos que se obtienen junto con la longitud de onda

central corresponden a pequeñas porciones de longitudes de onda que no fueron reflejadas en la demultiplexación del resto de canales.

En la figura 3.51, se observa que al aumentar el número de canales el comportamiento del factor Q con el aumento de velocidad de transmisión no cambia. Es decir, en cada canal el factor Q va decayendo con el aumento de la velocidad. Además, a velocidades superiores a 20 Gbps se presentan factores Q mayores en los canales extremos 1 y 8. La información de soporte de la figura se presenta en las tablas N.1 a N.6 del anexo N.

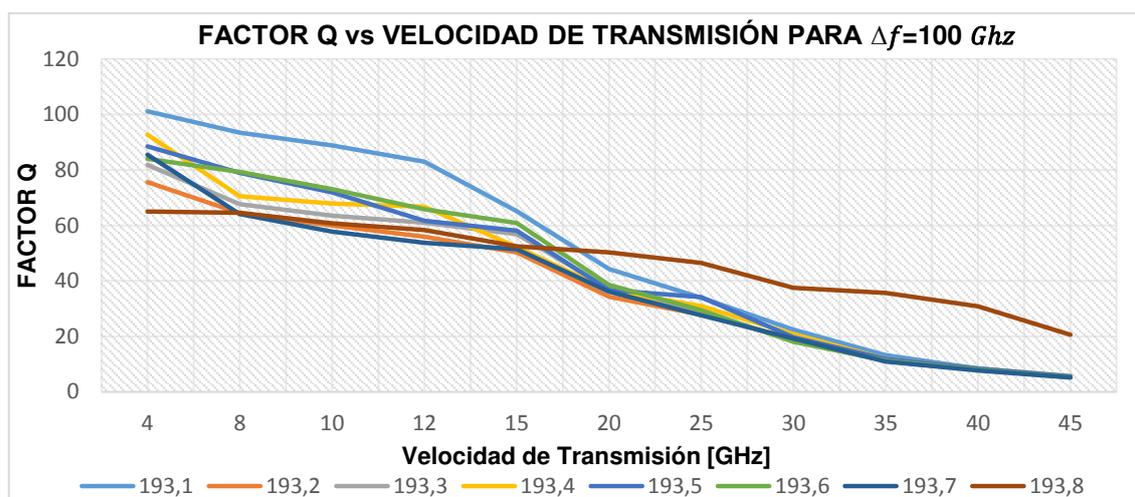


FIGURA 3.51. Factor Q vs velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamento de 100 GHz.

Por otro lado, en la figura 3.52, se presenta el comportamiento del BER con el aumento de la velocidad para cada canal. Se puede concluir que al incrementar el número de canales el BER se deteriora con el aumento de la velocidad. Además, se observa que el último canal demultiplexado (canal 8) presenta mejores características en su BER, esto se debe a que, este canal únicamente se transmite a través de las FBG y circuladores del MUX/DEMUX WDM y no se obtiene por medio de reflexión como el resto de canales, motivo por el cual no sufre dispersión ni diafonía con tanta intensidad como en el resto de canales. La información de soporte de la figura se presenta en las tablas N.1 a N.6 del anexo N.

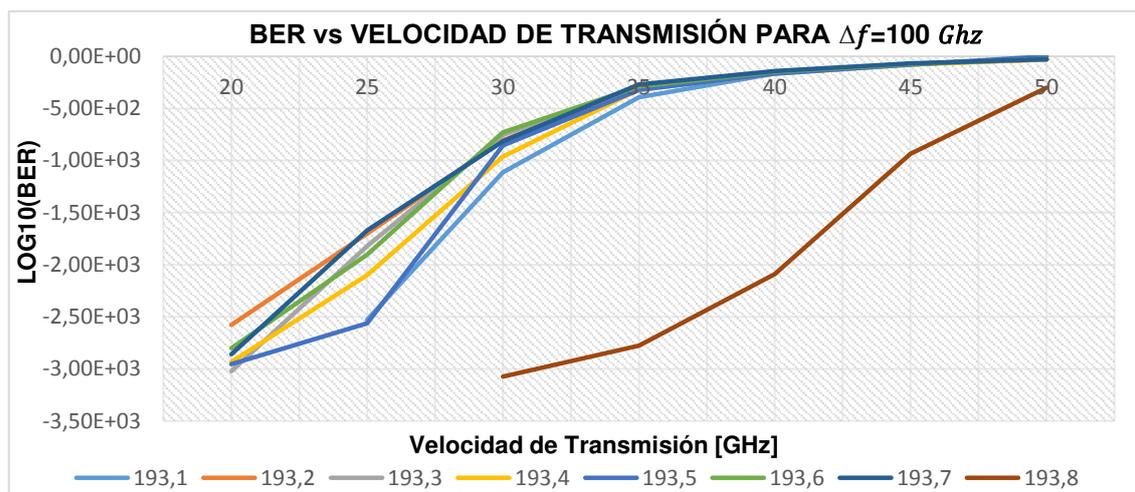


FIGURA 3.52. BER vs Velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamento de 100 GHz.

De la tabla 3.23 se puede concluir que al aumentar el número de canales de 4 a 8 en el MUX/DEMUX WDM, su velocidad máxima de operación (capacidad) por canal es de 40 Gbps, y que a velocidades superiores a 40 Gbps ya el MUX/DEMUX WDM no es funcional, tal y como se observa en los valores de factor Q y BER de la tabla. Además, con el aumento de número de canales no se nota una gran diferencia en la velocidad máxima de operación, ya que alcanza la misma velocidad máxima de operación que en el MUX/DEMUX de 4 canales con un poco de variación en sus parámetros. La razón para no tener una gran variación en la capacidad máxima del MUX/DEMUX, es porque en este apartado se simuló y recopiló la información con un espaciamento de canal de 100 GHz, que es relativamente grande en comparación a otros espaciamentos de canal que también se simularon y se presentarán más adelante.

Tabla 3.23. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM con FBG y circuladores para 8 canales con espaciamento de canal de 100 GHz a 25, 40 y 45 Gbps.

VTx [Gbps]	25	40	45
Q min	34,315	7,697	5,154
BER máx.	$2,21 \cdot 10^{-258}$	$6,44 \cdot 10^{-15}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$

Los diagramas de ojo para un canal intermedio (canal 4) están en la figura 3.53. Se puede concluir que el diagrama se va deteriorando a medida que se aumenta la velocidad de transmisión, tal y como sucedía en un MUX/DEMUX de 4 canales. Al trabajar con 10 Gbps el diagrama de ojo se encuentra totalmente despejado, garantizando que la recepción se podrá realizar sin ningún problema. Sin embargo, al aumentar la velocidad de transmisión

a 40 Gbps el diagrama de ojo ya comienza a cerrarse provocando que a velocidades superiores a 40 Gbps ya no se pueda garantizar una buena recepción de la información y por ende se limitará la capacidad máxima de operación del MUX/DEMUX WDM. Este comportamiento es igual para los 8 canales y se puede observar en las figuras N.3 a N.8 del anexo N.

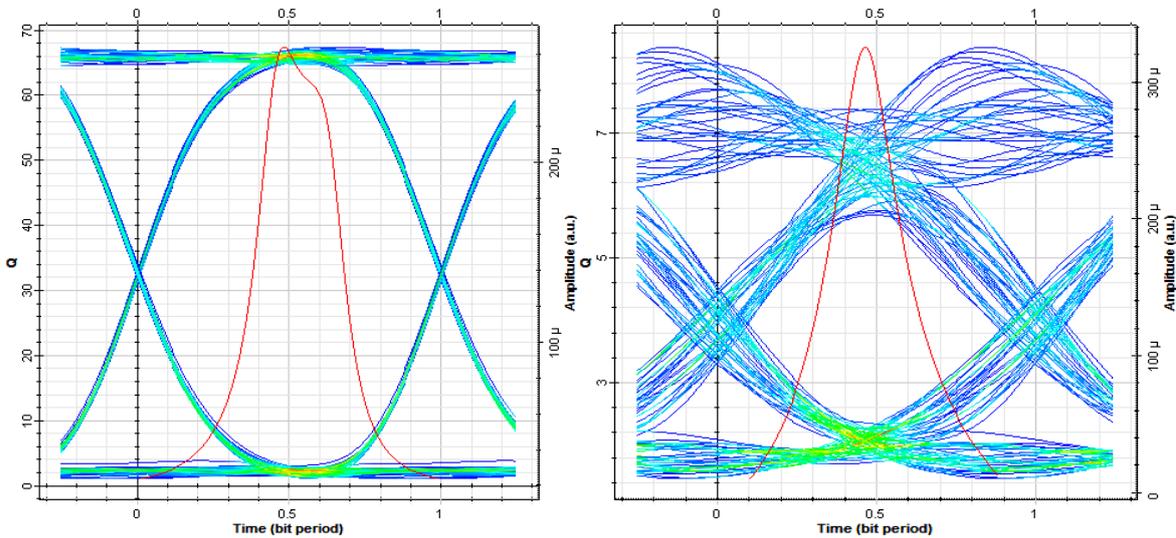


FIGURA 3.53. Diagramas de ojo para el cuarto canal 193.4 THz a velocidades de transmisión de 10 Gbps (izq) y 40 Gbps (der).

En la tabla 3.24 se observa las pérdidas de inserción del canal con mayores pérdidas del MUX/DEMUX WDM a 40 Gbps correspondiente al canal a 193.2 THz, estas pérdidas son de aproximadamente 7 dB (7,186 dB exactamente) en el MUX y aproximadamente 2.5 dB (2.445 dB exactamente) en el DEMUX. Se nota una gran diferencia al aumentar el número de canales, ya que se llega a tener pérdidas de inserción totales cercanas a 10 dB en el MUX/DEMUX WDM, superando las pérdidas de inserción con 4 canales (aproximadamente 6.5 dB). Esto se debe a que para multiplexar y demultiplexar más longitudes de onda también se necesita más componentes FBG y circuladores en su configuración ($N-1$, N =número de canales). Por ende, al tener más componentes todos los canales tendrán que pasar por ellos hasta ser demultiplexados y debido a que por cada FBG y circulador se añade pérdidas de inserción, esta será mayor en cada canal con respecto al MUX/DEMUX WDM de 4 canales.

Tabla 3.24. Potencia de entrada, salida del MUX y de salida del DEMUX con FBG y circuladores a 40 Gbps.

Frecuencia (THz)	Potencia de entrada al MUX (dBm)	Potencia de salida del MUX (dBm)	Potencia de salida del DEMUX (dBm)
193,2	0,404	-6,782	-9,237

3.3.3.2. Simulación de MUX/DEMUX WDM con FBG y circuladores para 8 canales con espaciamiento de 50 GHz.

En este apartado se simula el mismo escenario de la figura 3.49 pero con un espaciamiento de canal de 50 GHz. Los resultados obtenidos se muestran detalladamente en el anexo O con sus respectivos parámetros y gráficas.

En tablas O.1 a O.4 del anexo O, se puede apreciar que los valores de OSNR obtenidos son muy buenos para el espaciamiento de canal con el que se trabajó. Durante las simulaciones se llegó a obtener un valor máximo de OSNR 93.083 dB.

En la figura 3.54 se presenta la respuesta en frecuencia del canal 1,4 y La respuesta en frecuencia total se presenta en las figuras O.1 y O.2 del anexo O.

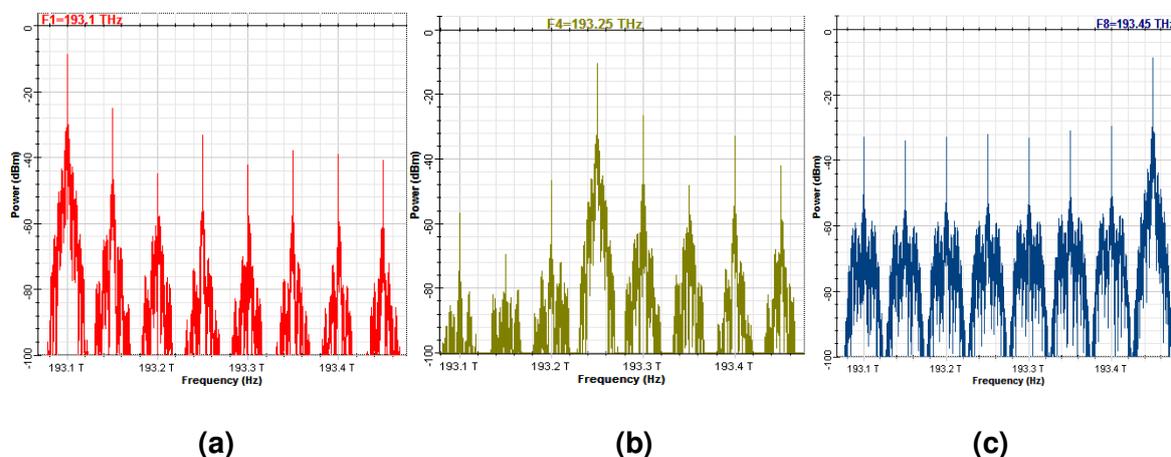


FIGURA 3.54. Respuesta en frecuencia de la demultiplexación de los canales a) 1, b) 4 y c) 4 respectivamente para un MUX/DEMUX de 8 canales WDM a 50 GHz.

De la respuesta en frecuencia se puede concluir que, las longitudes de onda intermedias presentan a sus extremos mayor cantidad de picos en comparación al mismo escenario con 4 canales. Por otro lado, al reducir el espaciamiento de canal de 100 GHz a 50 GHz, estos picos de longitudes de onda adyacentes indeseados, están más cerca de la longitud de onda central de cada canal demultiplexado. A causa de esto existirá mayor interferencia

y por ende afectará su calidad y BER de cada canal. Los canales más afectados serán aquellos que son demultiplexados mediante el proceso de reflexión en las FBG exceptuando el último canal, debido a que solamente se transmite de componente en componente hasta ser recuperado dentro de la configuración del MUX/DEMUX WDM. La forma y el comportamiento de la respuesta en frecuencia son similares a la que se obtuvo con el mismo sistema a 100 GHz.

Por otro lado, en la figura 3.55 se resume el comportamiento del factor Q para cada canal, basado en las tablas O.1 a O.4 del anexo O. Se observa que el factor Q de cada canal disminuye con el aumento de la velocidad, además de tener un mejor factor Q en los canales extremos (1 y 8), tal y como sucedió con el mismo sistema a 100 GHz de espaciamento. Una diferencia importante es que los canales intermedios (canales del 2 al 7) a un espaciamento de canal de 50 GHz presentan un alto grado de homogeneidad, ya que el comportamiento del factor Q tienden a ser exactamente igual en estos canales.

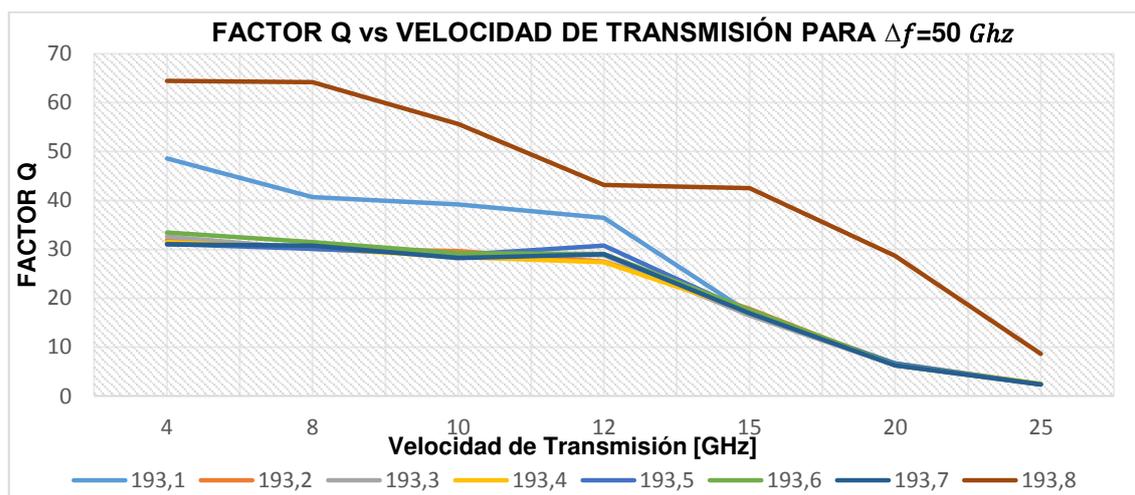


FIGURA 3.55. Factor Q vs velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamento de 50 GHz.

Los datos recopilados referentes al BER de los 8 canales en las tablas O.1 a O.4 del anexo O se presentan resumidos en la figura 3.56, el comportamiento del BER de los 8 canales se degrada con el aumento de la velocidad. En la figura también se puede apreciar de mejor manera la homogeneidad que se tiene en los canales del 1 al 7 a velocidades superiores a 15 Gbps. Este comportamiento se debe a que estos canales se demultiplexan uno a uno mediante reflexión, sin embargo, el último canal (canal 8) no se demultiplexa por este proceso de reflexión, evitando la dispersión y diafonía que se producen en la reflexión por las FBG. Por ende, el último canal presentará mejores características que el resto, tal y como se ve en la figura 3.56.

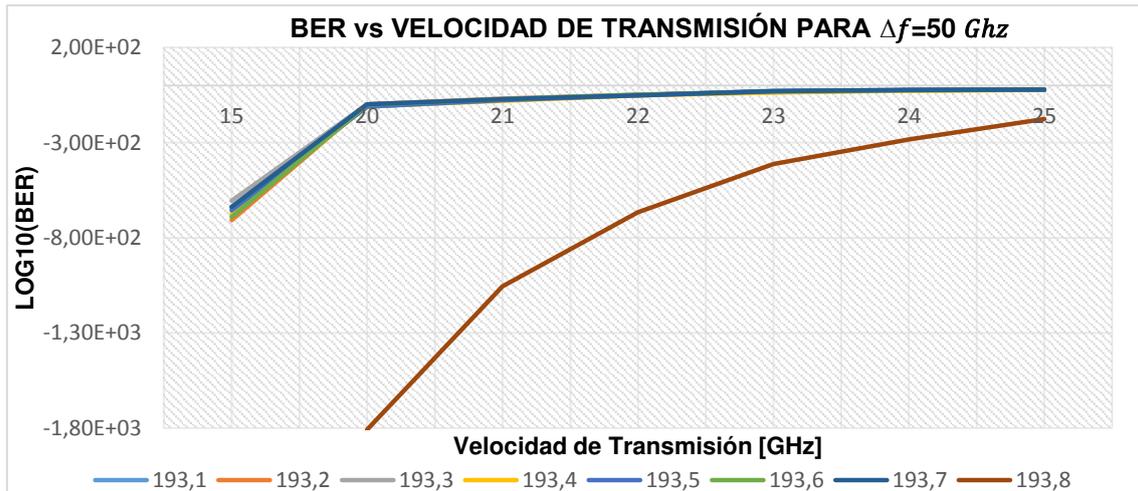


FIGURA 3.56. BER vs Velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamento de 50 GHz.

En la tabla 3.25 se presentan los valores de factor Q mínimo y BER máximo, de lo que se puede concluir que al aumentar el número de canales y al disminuir el espaciamento de canal de 100 GHz a 50 GHz, la capacidad máxima por canal del MUX/DEMUX WDM es afectada. De acuerdo con los datos el MUX/DEMUX WDM de 8 canales con un espaciamento de canal de 50 GHz es funcional únicamente a velocidades menores a 20 Gbps, que es menor a la alcanzada en el sistema de 4 canales a 50 GHz (25 Gbps). El MUX/DEMUX WDM de 8 canales a 20 Gbps cumple con el requerimiento de factor Q ($Q > 6$), ya que se tiene un valor mínimo de 6,290, sin embargo, no cumple con el requerimiento de BER ($BER < 10^{-12}$), pues este es igual a $1,45 \cdot 10^{-10}$. Razón por la cual a 20 Gbps o velocidades superiores el MUX/DEMUX WDM ya no es operable.

Tabla 3.25. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM con FBG y circuladores para 8 canales con espaciamento de canal de 50 GHz a 4, 20 y 25 Gbps.

VTx [Gbps]	4	20	25
Q mínimo	55,930	8,066	0
BER máximo	0	$3,34 \cdot 10^{-16}$	1

En la figura 3.57 se observa el diagrama de ojo del canal 4 a 8 Gbps y 20 Gbps. De las gráficas se puede concluir que, al reducir el espaciamento de canal el diagrama de ojo se degrada más rápidamente a medida que se incrementa la velocidad, en comparación al mismo sistema con un espaciamento de canal de 100 GHz. También se aprecia un diagrama de ojo a 8 Gbps abierto y despejado, sin embargo, al aumentar la velocidad de transmisión a 20 Gbps el diagrama de ojo ya se encuentra prácticamente cerrado además

de presentarse problemas de jitter, a causa de esto la señal no podrá ser recuperada correctamente en la recepción y limitará la velocidad máxima de operación del MUX/DEMUX. Los diagramas de ojo para el resto de las canales se presentan en las figuras O.3 a O.6 del anexo O.

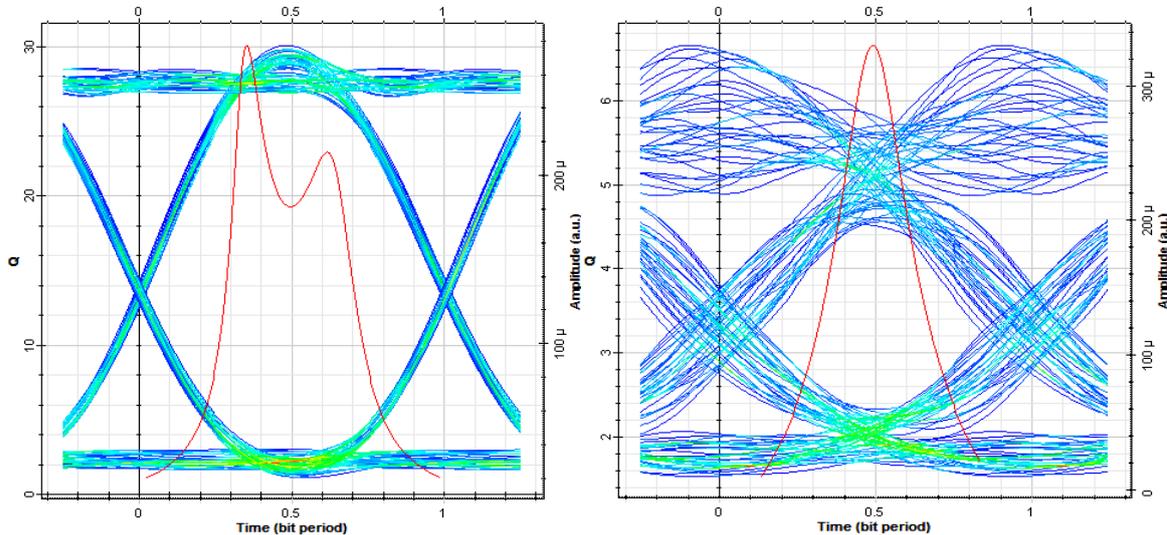


FIGURA 3.57. Diagramas de ojo para el cuarto canal 193.25 THz a velocidades de transmisión de 8 Gbps (izq) y 20 Gbps (der).

En la tabla 3.26 se presentan los datos obtenidos referentes a la potencia de salida, tanto del MUX como del DEMUX para el canal 2 (canal con máximas pérdidas de inserción) a 193.15 THz. se puede decir que las pérdidas de inserción en el MUX son aproximadamente 6.5 dB (6,636 dB exactamente) y de aproximadamente 2,5 dB (2,574 dB exactamente) en el DEMUX. Al compararlo con el mismo sistema a 100 GHz, la pérdida de inserción total en el mismo canal no es igual, sino levemente menor. Esto se debe a que las pérdidas de inserción en cada FBG no son constantes y dependen del espaciamiento de canal, coeficiente de reflexión y de la velocidad, como en el MUX/DEMUX para 4 canales.

Tabla 3.26. Potencia de entrada, salida del MUX y de salida del DEMUX con FBG y circuladores a 15 Gbps.

Frecuencia (THz)	Potencia de entrada al MUX (dBm)	Potencia de salida del MUX (dBm)	Potencia de salida del DEMUX (dBm)
193,2	0,404	-6,232	-8,806

3.3.3.3. Simulación de MUX/DEMUX WDM con FBG y circuladores para 8 canales con espaciamiento de 25 GHz

En este apartado final se simula el mismo escenario de la figura 3.49 pero con un espaciamiento de canal pequeño de 25 GHz. Los resultados obtenidos se muestran detalladamente en el anexo P con sus respectivos parámetros y gráficas.

Tras disminuir el espaciamiento de canal a 25 GHz, los valores de OSNR obtenidos durante la simulación siguen siendo muy buenos tal y como se lo puede observar en las tablas P.1 a P.4 del anexo P. Presentando valores de OSNR que rondan los 90 dB.

A continuación, en la figura 3.58 se presenta la respuesta en frecuencia del canal 1, 4 y 8, al igual que en los apartados anteriores, debido a que a partir de estos canales se puede hacer una reseña general del comportamiento del MUX/DEMUX WDM. La respuesta en frecuencia total se presenta en las figuras P.1 y P.2 del anexo P.

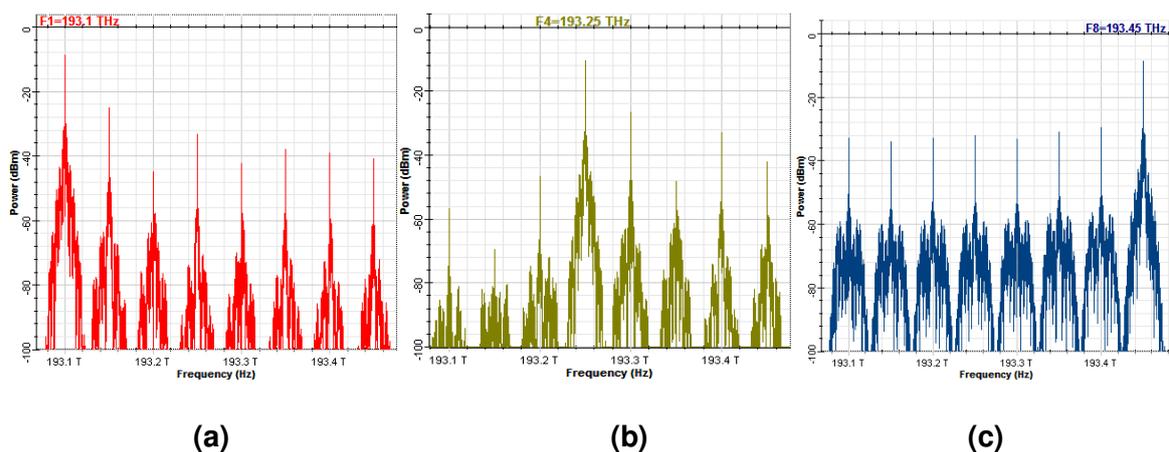


FIGURA 3.58. Respuesta en frecuencia de la demultiplexación de los canales a) 1, b) 4 y c) 8 respectivamente para un MUX/DEMUX de 8 canales WDM a 25 GHz.

Al observar la respuesta en frecuencia de cada canal, estas son muy similares a las respuestas obtenidas con espaciamiento de canal de 100 GHz y 50 GHz., Igualmente en este caso los picos adyacentes a las longitudes de onda centrales de los canales son más cercanos. Al trabajar con un espaciamiento de canal pequeño de 25 GHz, en cada canal se tendrá mayor interferencia por longitudes de onda adyacentes, como consecuencia, la velocidad máxima (capacidad) por canal del MUX/DEMUX se verá afectada negativamente, y el BER presentará características más deterioradas que al trabajar con espaciamientos de canal más grandes.

En la figura 3.59 se resumen los resultados obtenidos por cada canal de las tablas P.1 a P.4 del anexo P, observándose que el comportamiento del factor Q es la misma en los

casos anteriores, es decir el factor Q decae con el aumento de la velocidad. Sin embargo, al reducir el espaciado de canal a 25 GHz, el factor Q de la mayoría de los canales decae a valores muy próximos a 0 con velocidades cercanas a 15 Gbps. El último canal presenta un mejor comportamiento que el resto.

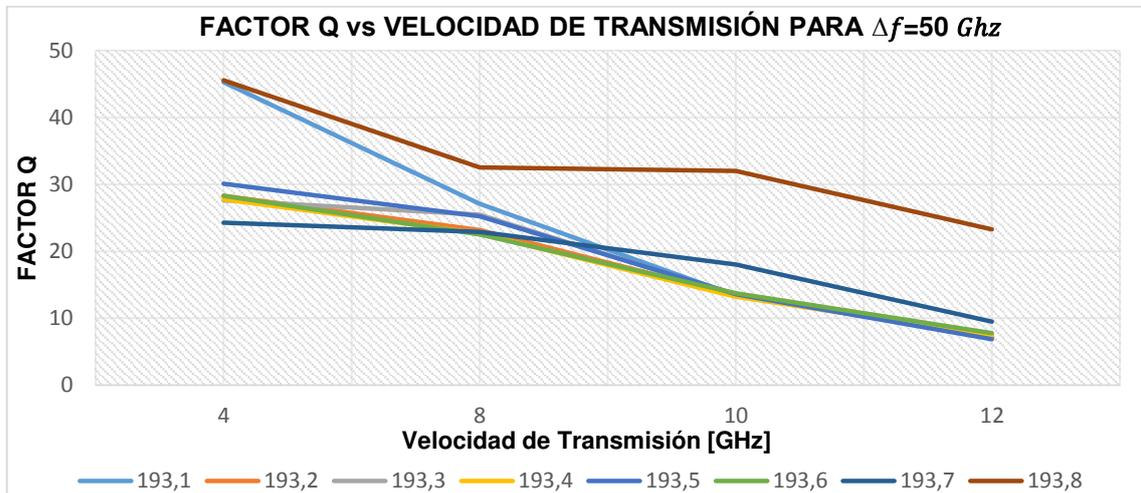


FIGURA 3.59. Factor Q vs velocidad de transmisión para 8 canales con espaciado de 25 GHz.

En la figura 3.60 se presenta el comportamiento del BER con la velocidad para cada uno de los 8 canales, la información detallada de la gráfica se encuentra en las tablas P.1 a P.4 del anexo P. De la gráfica se aprecia que similar a los casos anteriores, el BER se deteriora con el aumento de la velocidad, además se observa que el último canal tiene mejores características en términos de BER, sin embargo, al llegar a una velocidad de tan solo 15 Gbps el BER de todos los canales llega a estar muy cerca de 1.

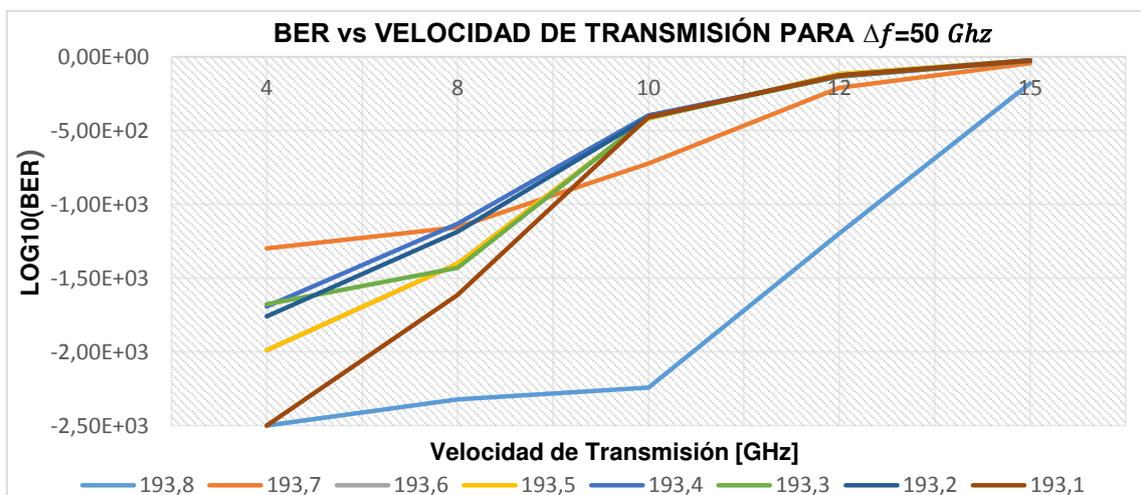


FIGURA 3.60. BER vs Velocidad de transmisión para 8 canales con espaciado de 25 GHz.

En la tabla 3.27 se presenta valores de factor Q mínimo y BER máximo. Se puede concluir que al reducir el espaciamiento de canal a 25 GHz la velocidad máxima de operación (capacidad) por canal se limita rápidamente. En los datos de la tabla se observa que el MUX/DEMUX WDM solamente puede operar adecuadamente a una velocidad máxima de 12 Gbps, teniendo una variación considerable con respecto al mismo sistema con 50 GHz y 100 GHz de espaciamiento de canal. A velocidades superiores a 12 Gbps el MUX/DEMUX WDM con espaciamiento de canal de 25 GHz ya no será operable pues ya que no cumplirá con los valores recomendados de factor Q y BER. Otro efecto que se observa, es que al incrementar el número de canales de 4 a 8, la capacidad por canal se reduce debido a problemas de interferencia y dispersión más fuertes por el espaciamiento de canal pequeño con el que se simuló y que afectan directamente a la calidad y BER de cada canal.

Tabla 3.27. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM con FBG y circuladores para 8 canales con espaciamiento de canal de 25 GHz a 4, 8, 10 y 12 Gbps.

VTx [GHz]	4	8	10	12
Q min	24,271	22,532	13,225	6,888
BER max	$1,98 \cdot 10^{-130}$	$9,90 \cdot 10^{-113}$	$2,98 \cdot 10^{-40}$	$2,63 \cdot 10^{-12}$

De los diagramas de ojo de la figura 3.61, se observa que, al reducir el espaciamiento de canal a 25 GHz, el diagrama de ojo a 4 Gbps se encuentra despejado y abierto en su totalidad. Sin embargo, al trabajar con un espaciamiento de canal pequeño, el ojo se encuentra cerrado a tan solo 12 Gbps, teniendo una diferencia notorita con los diagramas de ojo para el mismo sistema con 100 GHz y 50 GHz de espaciamiento de canal, ya que el diagrama de ojo para todos los canales se degrada más rápido con el aumento de la velocidad al trabajar con un espaciamiento de canal más pequeño. Los diagramas de ojo para todos los canales se presentan en las figuras P.3 a P.6 del anexo P.

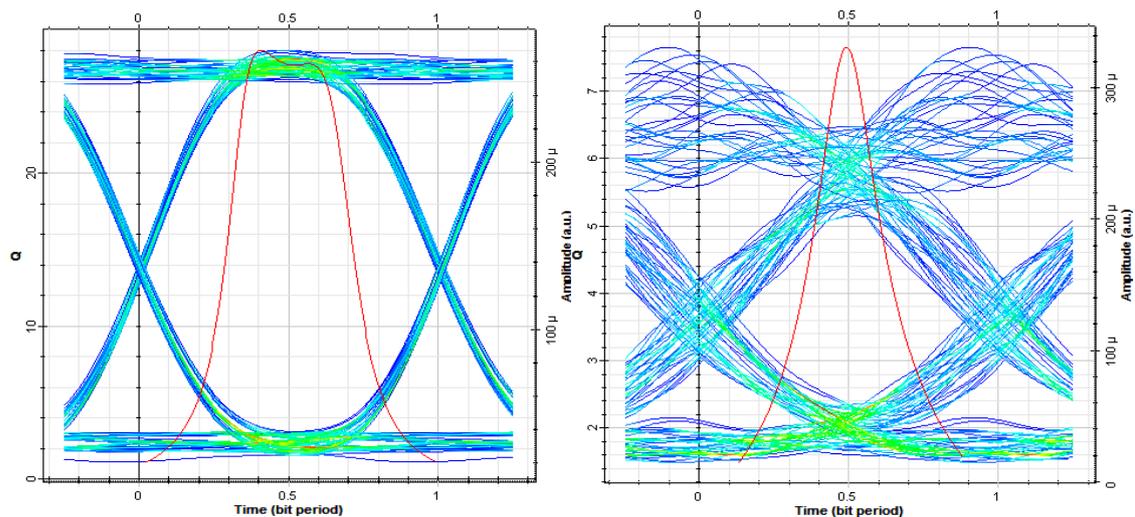


FIGURA 3.61. Diagramas de ojo para el cuarto canal 193.175 THz a velocidades de transmisión de 4 Gbps (izq) y 12 Gbps (der).

En la tabla 3.28 se presentan las potencias de salida del MUX y DEMUX para el canal 2 a 193.125 THz (canal con mayor pérdida de inserción). De la tabla se puede concluir que al igual que el caso de simulación anterior, las pérdidas de inserción no son constantes y varían en función a parámetros como la velocidad de transmisión y el espaciamiento de canal. En esta simulación con 25 GHz de espaciamiento de canal, se obtuvo unas pérdidas de inserción en el MUX de aproximadamente 6,5 dB (6,66 dB exactamente) y de aproximadamente 2,5 dB (2,65 exactamente) en el DEMUX. Con el aumento de canales se observa un incremento en pérdidas de inserción en cada canal, ya que el MUX/DEMUX WDM está conformado por más componentes y cada uno presenta pérdidas de inserción independientes que son sumadas al demultiplexar cada canal. La información detallada para cada canal se encuentra en las tabas P.1 a P.4 del anexo P.

Tabla 3.28. Potencia de entrada, salida del MUX y de salida del DEMUX con FBG y circuladores a 12 Gbps.

Frecuencia (THz)	Potencia de entrada al MUX (dBm)	Potencia de salida del MUX (dBm)	Potencia de salida del DEMUX (dBm)
193,2	0,404	-6,256	-8,906

3.3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MUX/DEMUX WDM BASADO EN FBG Y CIRCULADORES

Tras realizar todas las simulaciones del MUX/DEMUX basado en FBG y circuladores, se puede concluir que su comportamiento al disminuir el espaciamiento de canal es muy similar para el mismo escenario de simulación con 4 y 8 canales, es decir el factor de

calidad Q y el BER decaen a medida que se incrementa gradualmente la velocidad. Adicionalmente, la capacidad también se ve afectada cuando se reduce el espaciamiento de canal, esto se puede evidenciar cuando se redujo el espaciamiento de canal de 100 GHz a 25 GHz a una velocidad determinada, donde la capacidad pasó de 40 Gbps a 15 Gbps en cada uno de los 4 canales y de 40 Gbps a 12 Gbps por canal cuando se trabajó con 8 canales.

Un comportamiento en común para 4 y 8 canales a diferente espaciamiento de canal y velocidad de transmisión es que el último canal demultiplexado presenta un mejor desempeño en comparación al resto de canales. Esto se debe a que el último canal nunca es recuperado por el proceso de reflexión de las FBG que conforman el MUX/DEMUX WDM y solamente se transmite de componente en componente hasta extraer completamente el resto de las longitudes de onda correspondiente a los demás canales. A causa de esto, el último canal no es afectado por la dispersión y diafonía que se produce cuando se recupera una longitud de onda por reflexión en una FBG y por ende tendrá mejor calidad y menor tasa de bits errados que el resto de los canales para una determinada velocidad.

En la respuesta en frecuencia del último canal, este se ve afectado por varios picos presentes junto a su longitud de onda central, que pertenecen a porciones de señales que no fueron reflejadas en FBG anteriores. A causa de esto, al trabajar con espaciamientos de canal mayores, es más notorio el desempeño del último canal con respecto al resto, ya que los picos no deseados se encontrarán más alejados de la longitud de onda central del último canal y por ende el desempeño de este será superior a los demás canales, que, si son recuperados por el proceso de reflexión de las FBG, sufriendo dispersión y diafonía debido a esta reflexión.

Al aumentar el número de canales de 4 a 8 el comportamiento del MUX/DEMUX WDM no varía extremadamente, ya que la capacidad que se llegó a tener con 4 y 8 canales es prácticamente similar. Sin embargo, los valores de factor Q y BER para 8 canales son inferiores a los que se obtuvieron con 4 canales para una determinada velocidad. Esto se debe a que al trabajar el MUX/DEMUX WDM con 8 canales, se presentará mayor interferencia producida por canales adyacentes, en comparación al mismo MUX/DEMUX WDM con 4 canales.

En cuanto a pérdidas de inserción del MUX/DEMUX WDM, estas no son las mismas en todos los canales, los canales intermedios son los que mayores pérdidas presentan en comparación a los canales ubicados en los extremos. La diferencia de pérdidas de inserción en cada canal se debe a que los canales extremos pasan solamente una vez por

el proceso de reflexión a través de las FBG, al contrario de lo que sucede en los canales intermedios que sufren el proceso de reflexión dos veces hasta ser demultiplexados debido a la configuración del MUX/DEMUX WDM. Dado que las pérdidas de inserción en las FBG están dadas principalmente por pérdidas en el proceso de reflexión de esta, se presenta mayor pérdida de inserción en los canales intermedios en comparación a los canales extremos. Adicionalmente, al aumentar el número de canales, las pérdidas de inserción también aumentarán ya que las longitudes de onda de cada canal viajarán a través de más componentes dentro del MUX/DEMUX WDM, que añadirán más pérdidas de inserción en cada uno de los canales. Las pérdidas de inserción aumentarán a medida que se incremente el número de canales ya que se necesita N-1 componentes (FBG y circuladores) para la construcción de un MUX/DEMUX WDM basado en FBG y circuladores.

3.4. SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX WDM DISPONIBLE EN OPTISYSTEM

Se estudiará el MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem, en el que únicamente se realizará un análisis en función de los parámetros de salida de factor Q y BER. Las pérdidas de inserción no se tomarán en cuenta para el análisis debido a que este parámetro se puede configurar a voluntad. No se mostrará los resultados detallados como en los casos anteriores, ya que este bloque no está basado en alguna tecnología en específico, únicamente se tomará los datos relevantes para su posterior comparación. La información que se usará para configurar cada escenario de simulación se presenta en la tabla 3.29.

Tabla 3.29. Longitudes de onda y frecuencias centrales para las pruebas de simulación.

Longitudes de onda y frecuencias centrales para las pruebas de simulación					
Espaciamiento de canal = 100 GHz		Espaciamiento de canal = 50 GHz		Espaciamiento de canal = 25 GHz	
Frecuencia Central para Δf 0.1 THz	Longitud de onda central para $\Delta\lambda = 0.8 \text{ nm}$	Frecuencia Central para Δf 0.05 THz	Longitud de onda central para $\Delta\lambda = 0.4 \text{ nm}$	Frecuencia Central para Δf 0.025 THz	Longitud de onda central para $\Delta\lambda = 0.2 \text{ nm}$
193,1	1552,52	193,1	1552,52	193,1	1552,52
193,2	1551,72	193,15	1552,12	193,125	1552,32
193,3	1550,92	193,2	1551,72	193,15	1552,12
193,4	1550,12	193,25	1551,32	193,175	1551,92
193,5	1549,32	193,3	1550,92	193,2	1551,72
193,6	1548,51	193,35	1550,52	193,225	1551,52
193,7	1547,72	193,4	1550,12	193,25	1551,32
193,8	1546,92	193,45	1549,72	193,275	1551,12

En las figuras 3.62 y 3.63 se presentan al componente *WDM MUX* y *WDM DEMUX* con sus respectivos parámetros de configuración.

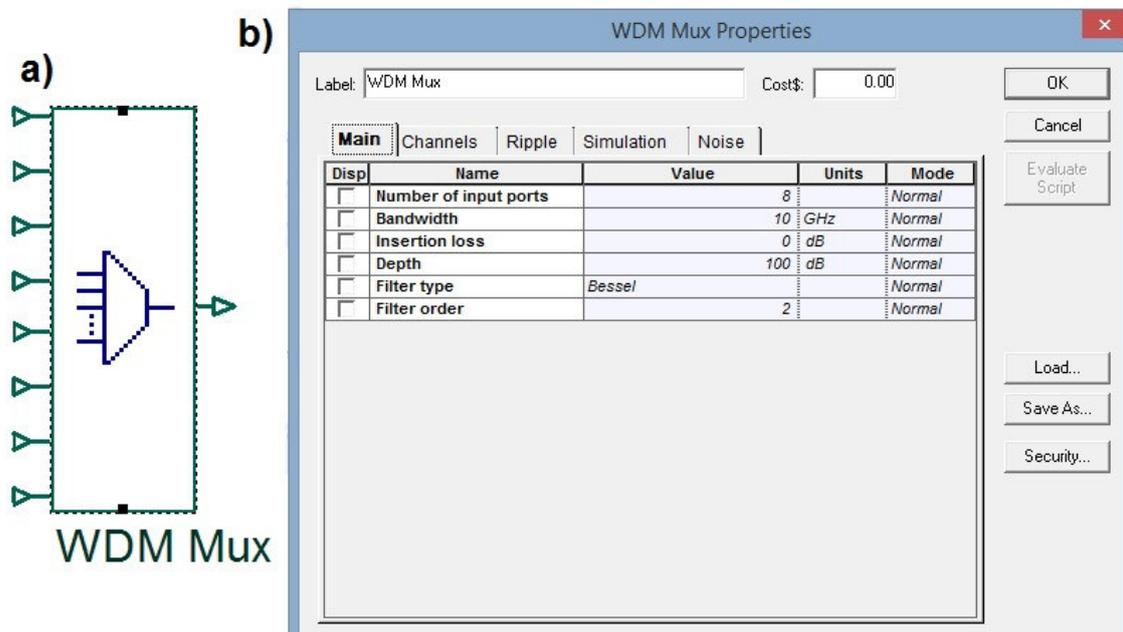


FIGURA 3.62. a) WDM MUX disponible en OptiSystem, b) Propiedades del WDM MUX disponible en OptiSystem.

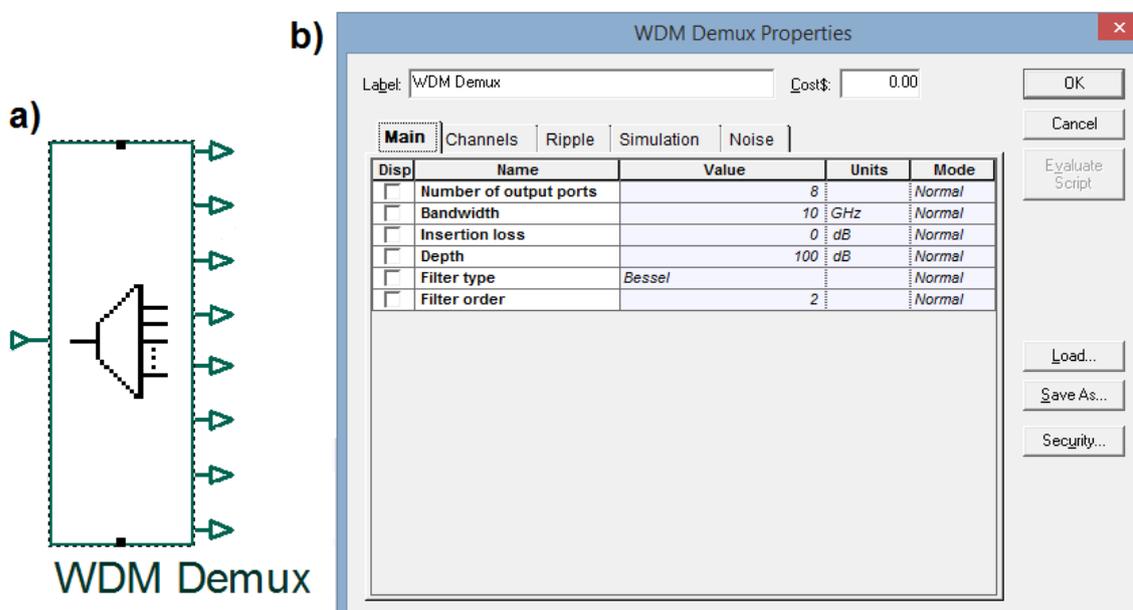


FIGURA 3.63. a) WDM DEMUX disponible en OptiSystem, b) Propiedades del WDM DEMUX disponible en OptiSystem.

Únicamente se configurará el parámetro ancho de banda (*Bandwidth*) de las figuras 3.62 y 3.63 ya que este parámetro es crítico y depende del espaciamiento del canal. Se utilizará

los valores de la tabla 3.17 para su configuración en cada simulación y el resto de los parámetros se dejan por defecto.

Las figuras 3.64 y figura 3.65 muestran los escenarios de simulación del sistema de comunicación óptico para 4 y 8 canales con los bloques disponibles en OptiSystem.

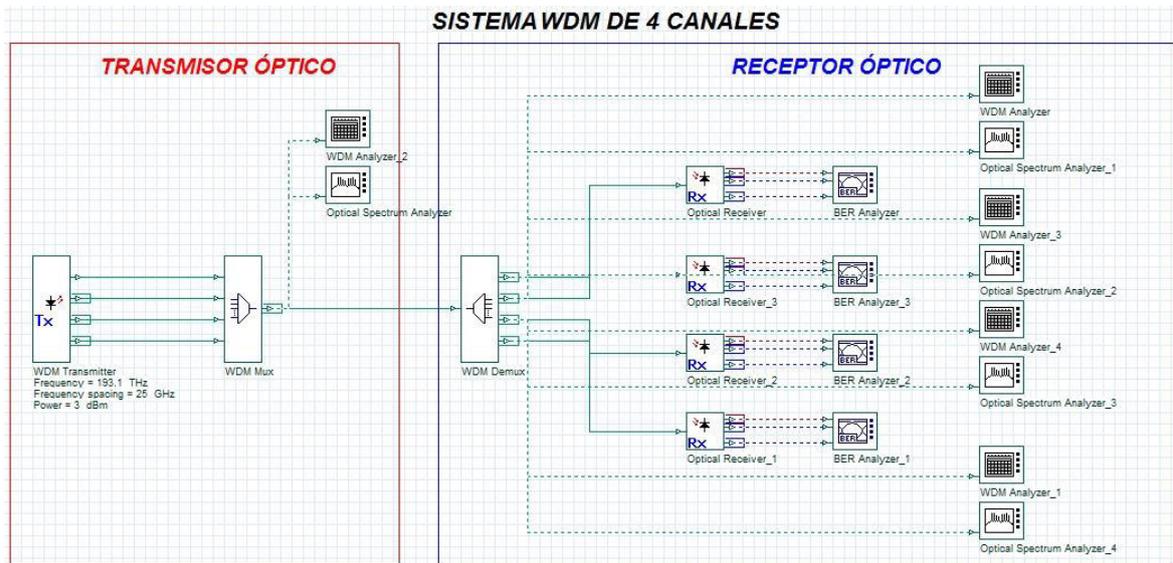


FIGURA 3.64. Sistema WDM con 4 canales de entrada modelado en OptiSystem.

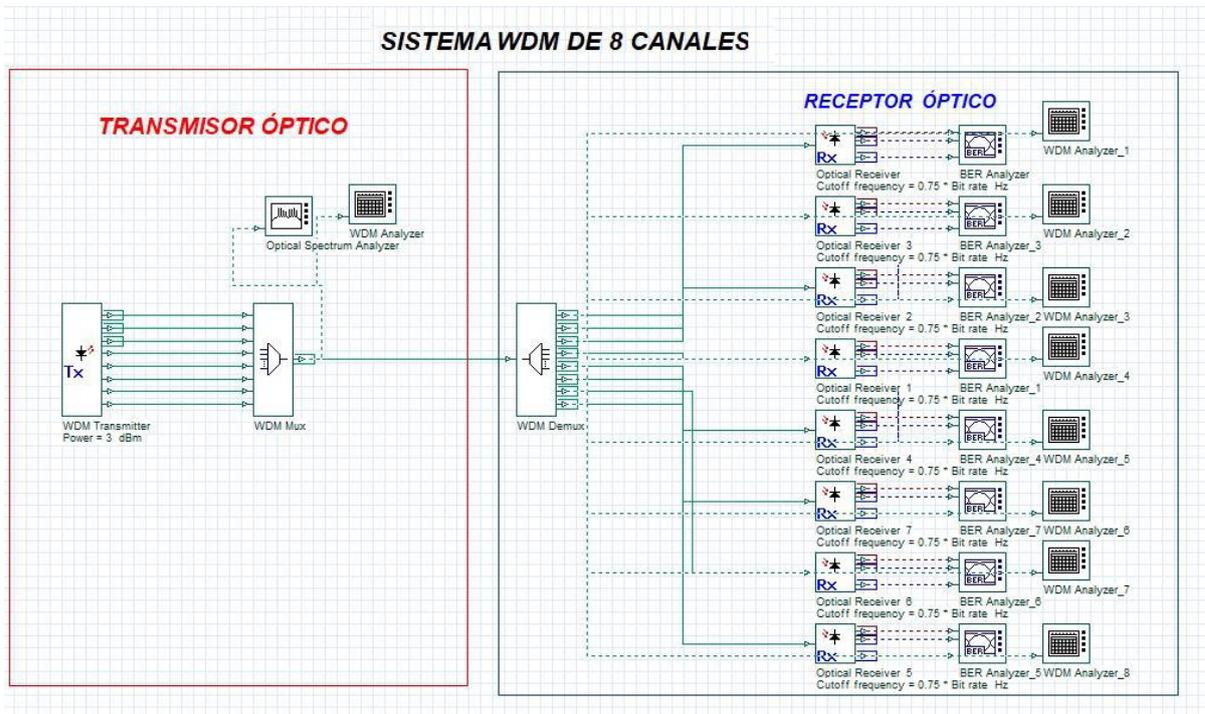


FIGURA 3.65. Sistema WDM con 8 canales de entrada modelado en OptiSystem.

3.4.1. SIMULACIÓN DE MUX/DEMUX WDM DISPONIBLE EN OPTISYSTEM PARA 4 CANALES, VARIANDO EL ESPACIAMIENTO DE CANAL Y VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN

Las siguientes simulaciones se basan en los escenarios presentados en las figuras 3.64 y 3.65, en las cuales se realizarán las pruebas para multiplexar y demultiplexar 4 y 8 longitudes de onda respectivamente, con la implementación del MUX/DEMUX WDM que está disponible en el software de simulación.

3.4.1.1. Simulación MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem para 4 y 8 canales ópticos con espaciamiento de 100 GHz

Los resultados obtenidos al realizar la simulación del MUX/DEMUX WDM para un espaciamiento de 100 GHz se encuentran resumidos en las gráficas 3.66, 3.67, 3.68 y 3.69.

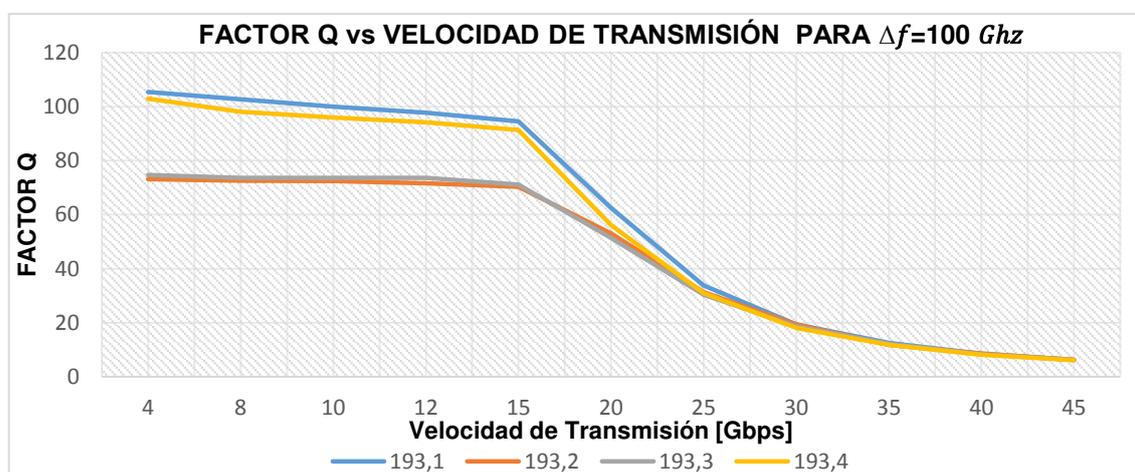


FIGURA 3.66. Factor Q vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamiento de 100 GHz.

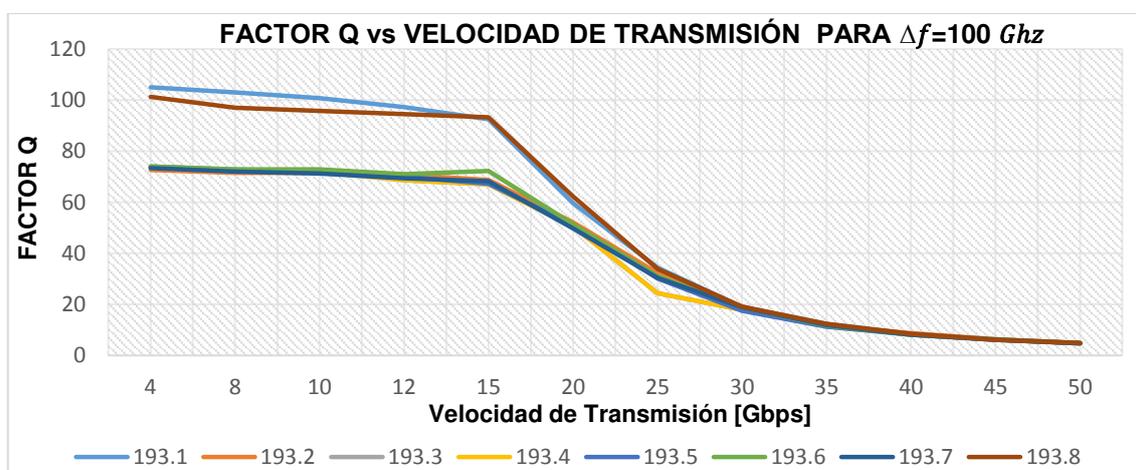


FIGURA 3.67. Factor Q vs velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamiento de 100 GHz.

La figura 3.66 muestra el comportamiento del factor Q al aumentar la velocidad de los 4 canales. A medida que se incrementa la velocidad el factor Q de los 4 canales se degrada hasta llegar al valor mínimo tolerable. Los canales extremos 1 y 4 presentan un mayor factor de calidad a 4 Gbps con respecto a los canales intermedios 2 y 3. Sin embargo a partir de 20 Gbps los factores de calidad en los 4 canales son muy similares y disminuyen con el aumento de la velocidad.

Al incrementar el número de canales a 8, se obtienen resultados idénticos, esto se lo puede observar en la figura 3.67. Es decir, los canales con mejor respuesta son los canales 1 y 8, ya que no están expuestos a longitudes de onda adyacentes como el resto de los canales. Esto se debe a que el MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem no está construido con una tecnología en especial, por lo que al incrementar el número de canales no existen parámetros objetivos de análisis que causen el deterioro en la calidad de transmisión de los canales del MUX/DEMUX WDM, como en el caso de los dos MUX/DEMUX simulados anteriormente.

En la figura 3.68 se puede apreciar cómo la velocidad de transmisión afecta directamente a la tasa de bit de errados, provocando que a mayor velocidad exista mayor probabilidad de pérdidas de datos. Este comportamiento es exactamente similar para los 4 canales, tal como se puede apreciar en la gráfica.

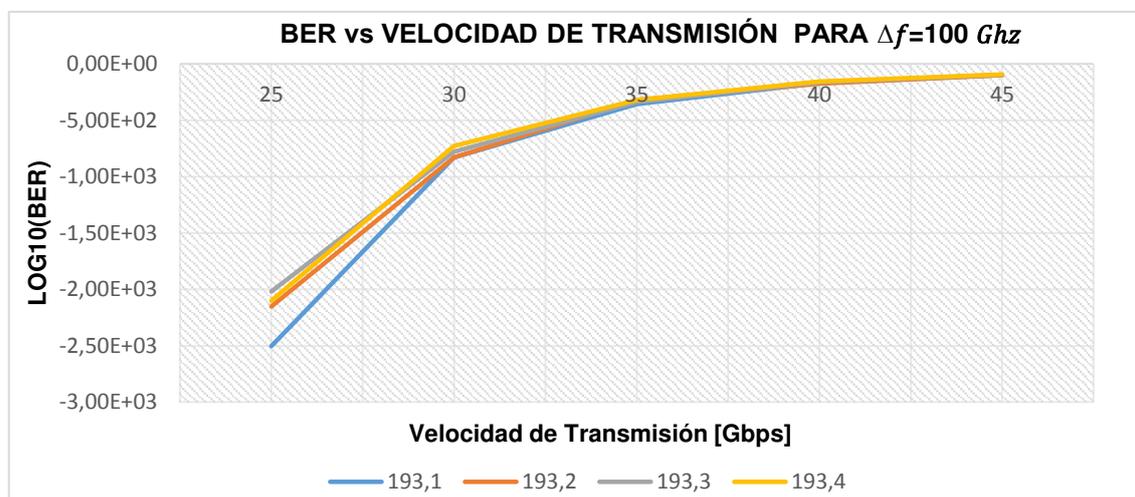


FIGURA 3.68. BER vs Velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamiento de 100 GHz.

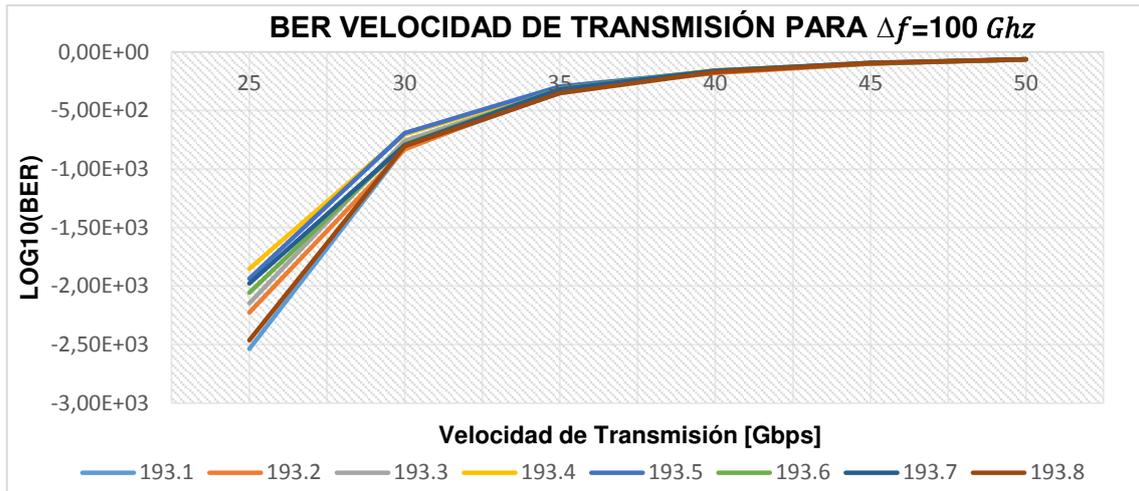


FIGURA 3.69. BER vs Velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamiento de 100 GHz.

Al incrementar a 8 el número de canales, el comportamiento y valores de BER son similares en comparación al mismo sistema con 4 canales y se lo puede apreciar en la figura 3.69.

La tabla 3.30 muestra datos de factor Q min y BER máximo obtenidos de la simulación del MUX/DEMUX WDM para 4 y 8 canales.

Tabla 3.30. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem para 4 y 8 canales con espaciamiento de 100 GHz a 4, 40 y 45 Gbps.

VTx [Gbps]	4	40	45
Q mínimo (4 canales)	73,148	8,099	6,148
BER máximo (4 canales)	0	$4.79 \cdot 10^{-19}$	$4.57 \cdot 10^{-8}$
Q mínimo (8 canales)	72,665	8,133	6,112
BER máximo (8 canales)	0	$1.90 \cdot 10^{-16}$	$4.49 \cdot 10^{-10}$

De la tabla 3.30 se puede concluir que el MUX/DEMUX WDM puede operar hasta una velocidad de 40 Gbps, pues a esa velocidad los valores de factor Q y BER están dentro de los límites recomendados, A velocidades superiores de 40 Gbps los valores de BER y factor Q no cumplen estos límites, por lo tanto, a 45 Gbps el MUX/DEMUX WDM ya no opera correctamente. Este análisis es el mismo para 4 y 8 canales, debido a que los resultados obtenidos de la simulación son muy similares en los dos casos y por ende su comportamiento tiende a ser el mismo.

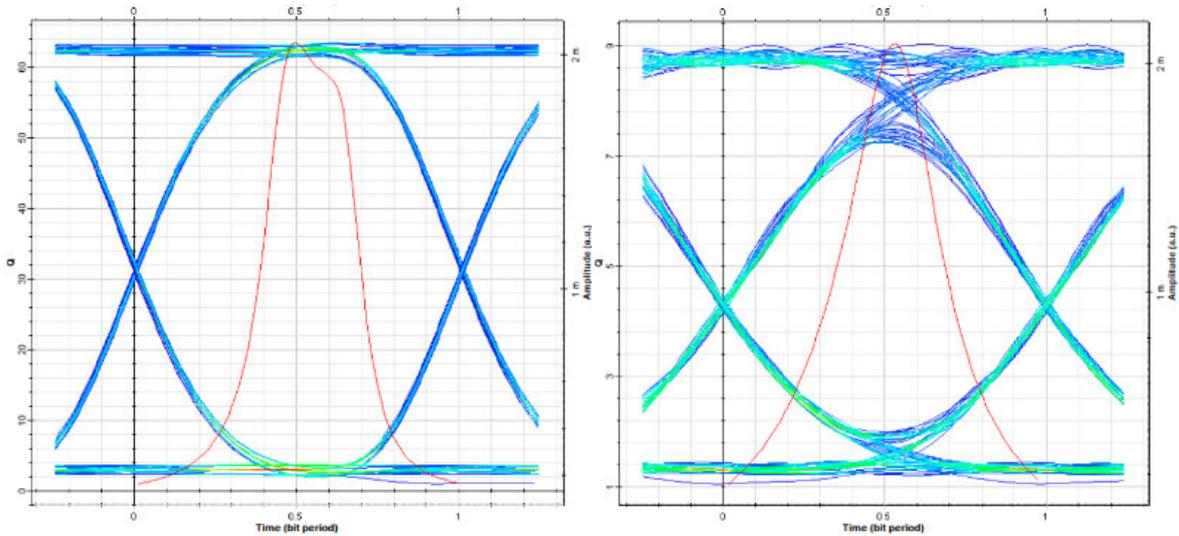


FIGURA 3.70. Diagramas de ojo para el canal 193.3 THz a 4 Gbps (izq) y 40 Gbps (der) para 4 canales.

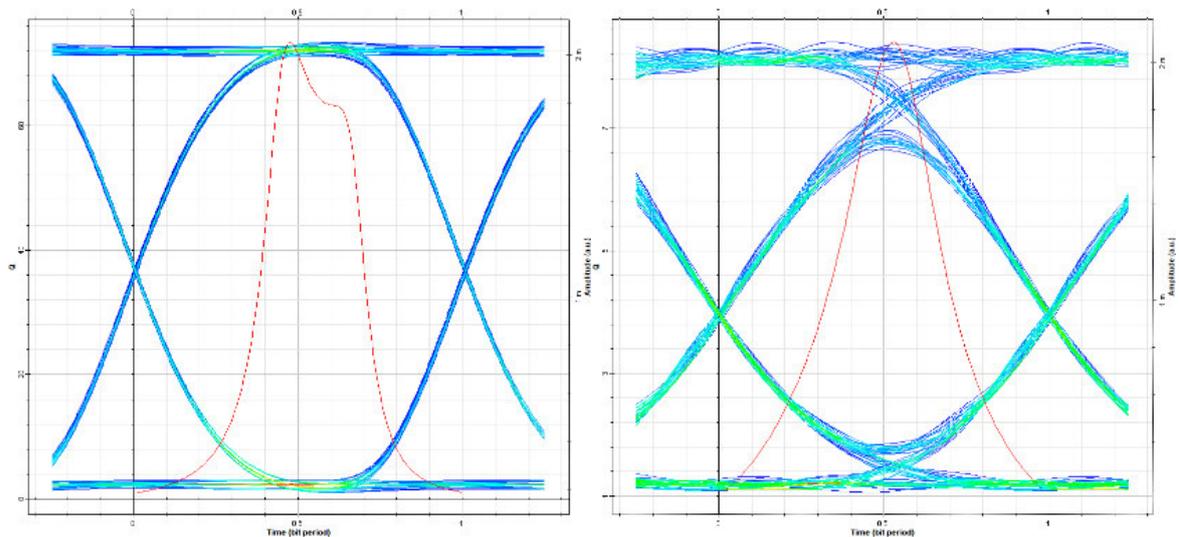


FIGURA 3.71. Diagramas de ojo para el canal 193.3 THz a 4 Gbps (izq) y 40 Gbps (der) para 8 canales.

En las figuras 3.70 y 3.71 se puede evidenciar que el diagrama de ojo a 4 Gbps se encuentra despejado, sin embargo, al aumentar la velocidad este tiende a cerrarse en el eje vertical, por lo que a velocidades mayores a 40 Gbps el ojo se encontrará menos despejado provocando distorsión y dificultando la recepción de los datos. El mismo comportamiento sucede para 4 y 8 canales, tal y como se ve en las gráficas.

3.4.4.2. Simulación de MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem para 4 canales con espaciamento de 50 GHz

Los resultados obtenidos al realizar la simulación del MUX/DEMUX WDM para un espaciamento de 50 GHz se encuentran resumidos en las gráficas 3.72, 3.73, 3.74 y 3.75.

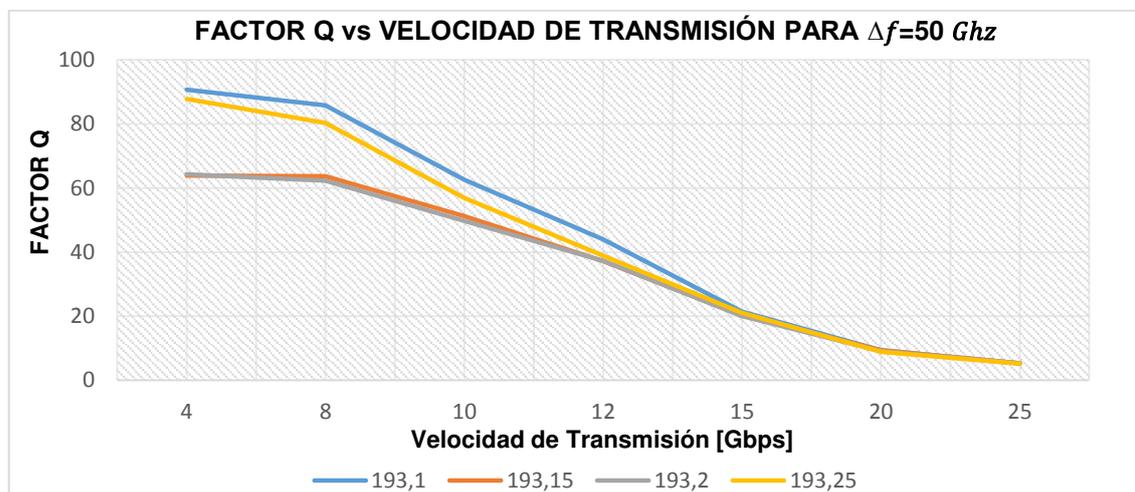


FIGURA 3.72. Factor Q vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamento de 50 GHz.

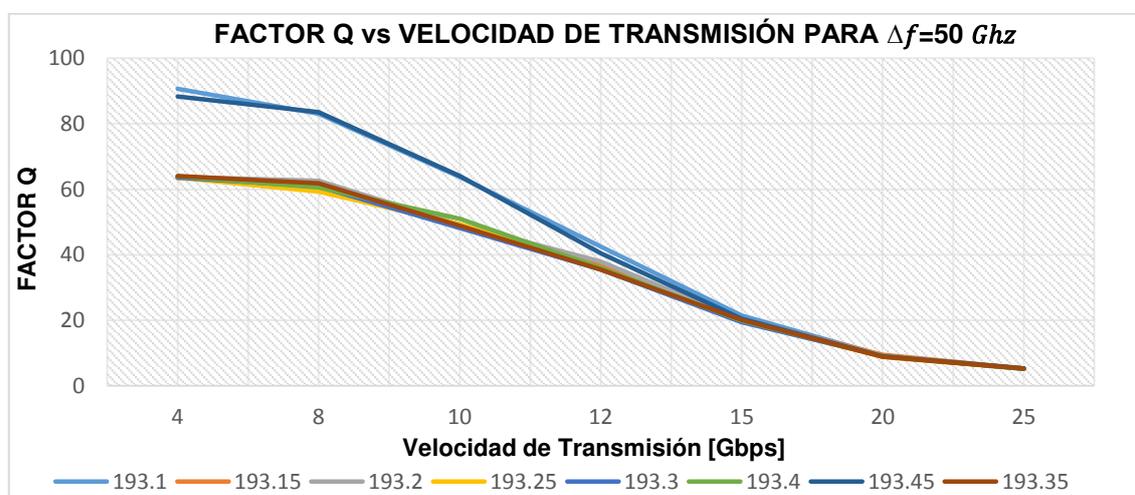


FIGURA 3.73. Factor Q vs velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamento de 50 GHz.

De la figura 3.72 se puede concluir que el factor Q tiende a disminuir con el aumento de la velocidad, sin embargo, al tener un espaciamento de canal menor con respecto al anterior escenario, sus valores de factor Q son menores en los 4 canales comparados con el mismo escenario a un espaciamento de canal de 100 GHz. Al incrementar el número de canales a 8 sucede prácticamente lo mismo y sus valores son muy similares a los obtenidos con 4 canales, esto se puede observar en la figura 3.73.

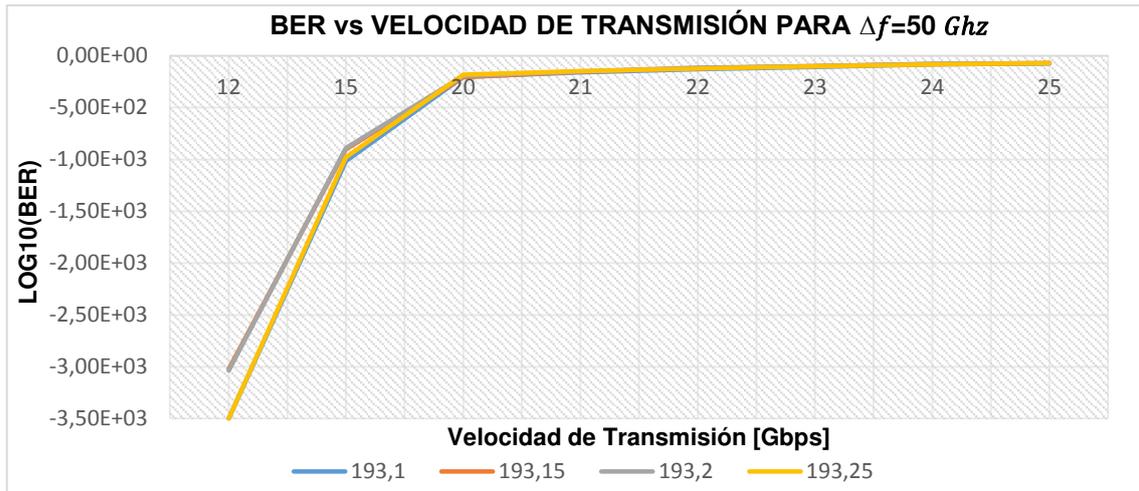


FIGURA 3.74. BER vs Velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamento de 50 GHz.

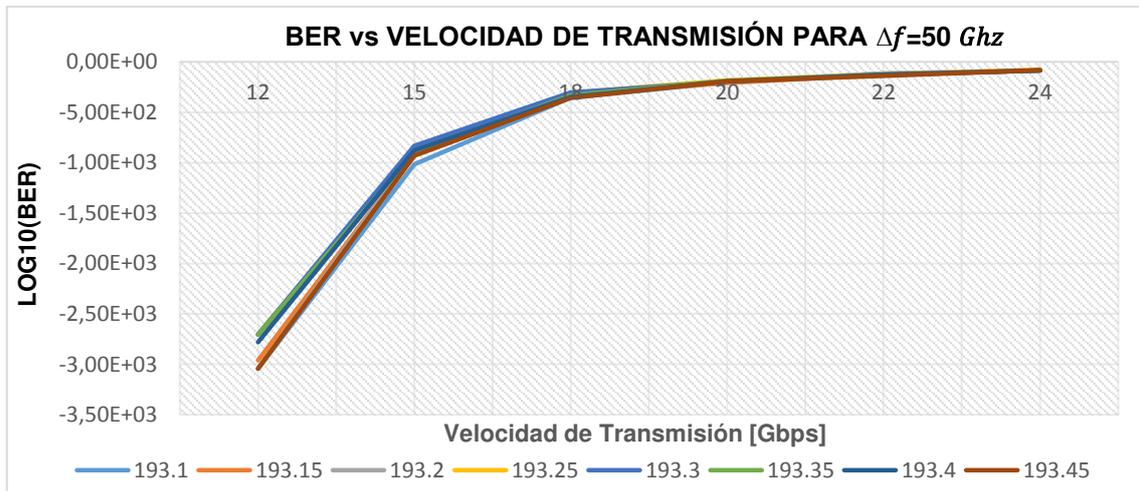


FIGURA 3.75. BER vs Velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamento de 50 GHz.

De igual manera, al disminuir el espaciamento de canal de 100 GHz a 50 GHz, el aumento de la velocidad influye negativamente en el BER, ya que se deteriora a medida que se incrementa la velocidad, este comportamiento es similar para el MUX/DEMUX WDM de 4 y 8 canales y se lo puede observar en las figuras 3.74 y 3.75.

En la tabla 3.31 se puede observar que con un espaciamento de canal de 50 GHz a 4 Gbps el valor de factor Q disminuye comparado con el mismo sistema de simulación con un espaciamento de canal a 100 GHz presente en la tabla 3.30, esta tendencia se da de igual manera para todas las velocidades consideradas en la simulación de los MUX/DEMUX de 4 y 8 canales. Se puede concluir que el MUX/DEMUX WDM de 4 y 8 canales con espaciamento de 50 GHz operará a una velocidad menor comparado con el

mismo sistema a un espaciamiento de canal de 100 GHz. Además, se puede observar que el MUX/DEMUX WDM con espaciamiento de canal de 50 GHz puede operar correctamente hasta velocidades de 20 Gbps, sin embargo, al trabajar con un espaciamiento de 100 GHz este puede operar hasta una velocidad de 40 Gbps. Este comportamiento sucede prácticamente igual en el MUX/DEMUX WDM de 8 canales.

Tabla 3.31. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem para 4 y 8 canales con espaciamiento de 50 GHz a 4, 20 y 25 Gbps.

Velocidad de Transmisión [Gbps]	4	20	25
Q mínimo (4 canales)	63,881	9,104	5,223
BER máximo (4 canales)	0	$4.79 \cdot 10^{-19}$	$4.57 \cdot 10^{-8}$
Q mínimo (8 canales)	63,45	8,795	5,210
BER máximo (8 canales)	0	$6.52 \cdot 10^{-19}$	$1.76 \cdot 10^{-8}$

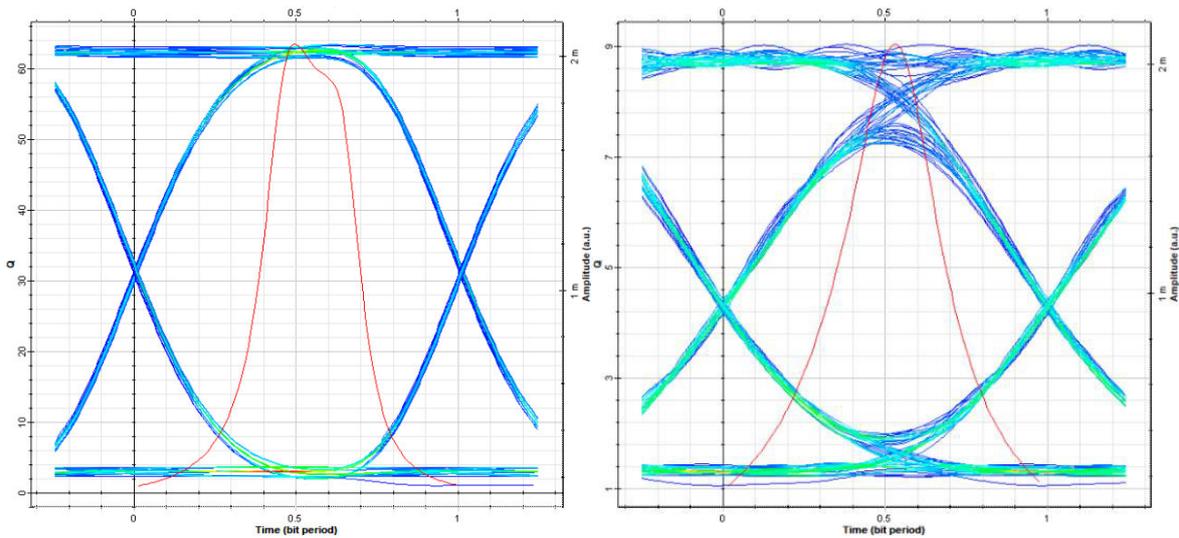


FIGURA 3.76. Diagramas de ojo para el canal 193.3 THz a 4 Gbps (izq) y 20 Gbps (der) para 4 canales.

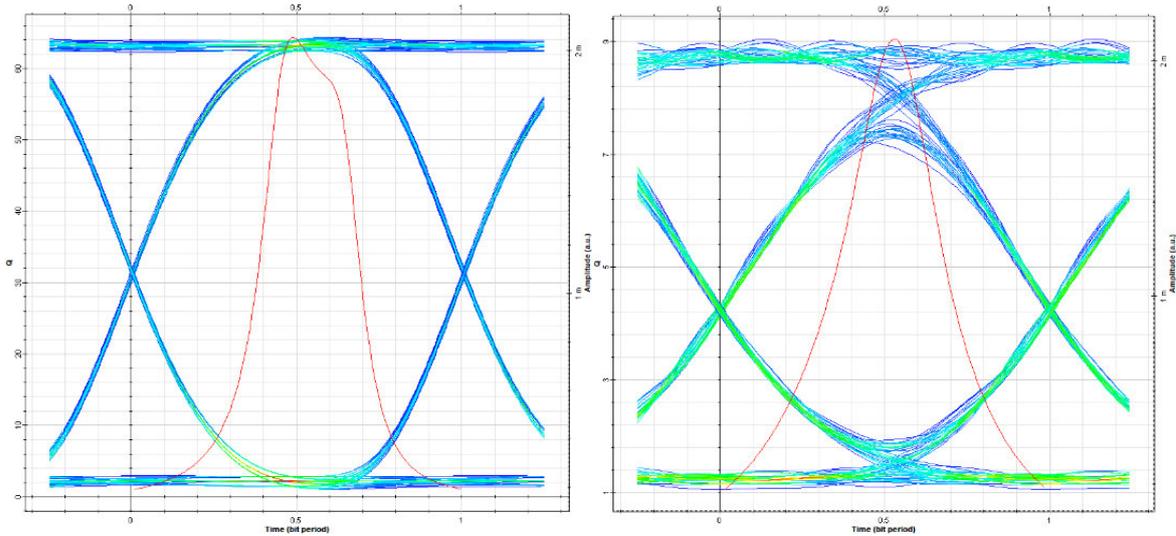


FIGURA 3.77. Diagramas de ojo para el canal 193.3 THz a 4 Gbps (izq) y 20 Gbps (der) para 8 canales.

En las figuras 3.76 y 3.77 se puede evidenciar que el diagrama de ojo a 4 Gbps se encuentra despejado, sin embargo, al aumentar la velocidad este tiende a cerrarse en el eje vertical. Se puede observar un alto grado de similitud entre el diagrama de ojo del canal 193.3 THz en los MUX/DEMUX WDM para 4 y 8 canales, tal y como se obtuvo con un espaciamento de canal de 100 GHz

3.4.4.3. Simulación de MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem para 4 canales con espaciamento de 25 GHz

Los resultados obtenidos al realizar la simulación del MUX/DEMUX WDM para un espaciamento de 25 GHz se encuentran resumidos en las gráficas 3.78, 3.79, 3.80 y 3.81.

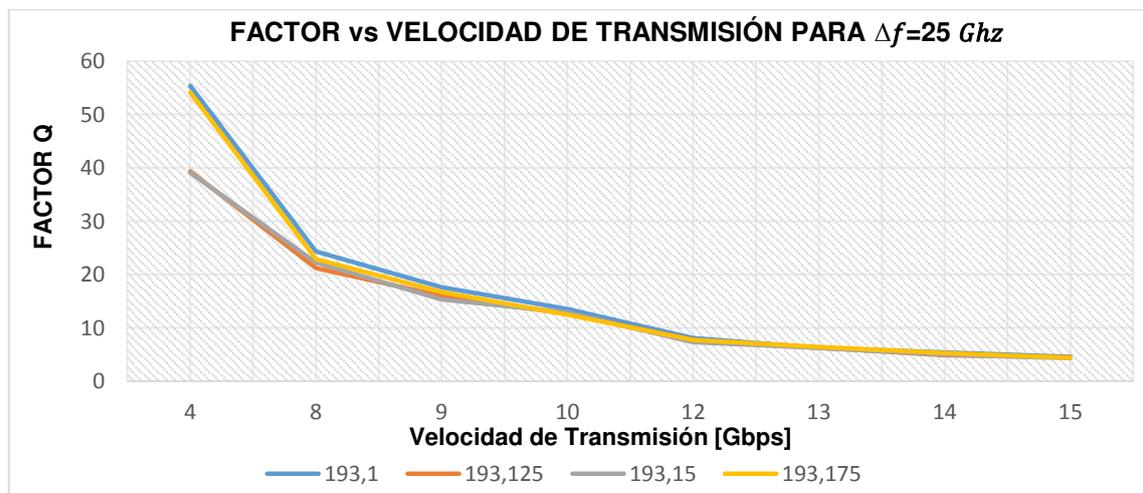


FIGURA 3.78. Factor Q vs Velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamento de canal de 25 GHz

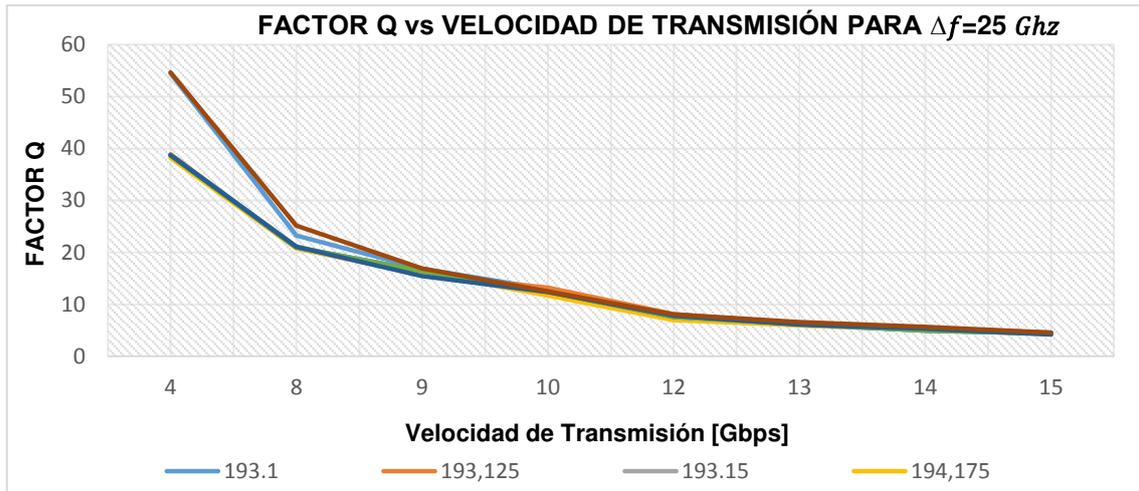


FIGURA 3.79. Factor Q vs velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamento de 25 GHz

En la figura 3.78, 3.79, 3.80 y 3.81 se observa que, al reducir el espaciamento de canal a 25 GHz, el factor Q y BER conserva la misma tendencia en sus curvas, con respecto a un espaciamento de canal de 50 GHz, con la diferencia de que, al reducir el espaciamento de canal, los canales son afectados negativamente en términos de factor Q y BER. De igual manera este comportamiento es similar en el MUX/DEMUX de 4 y 8 canales, tal y como sucedió en las simulaciones anteriores.

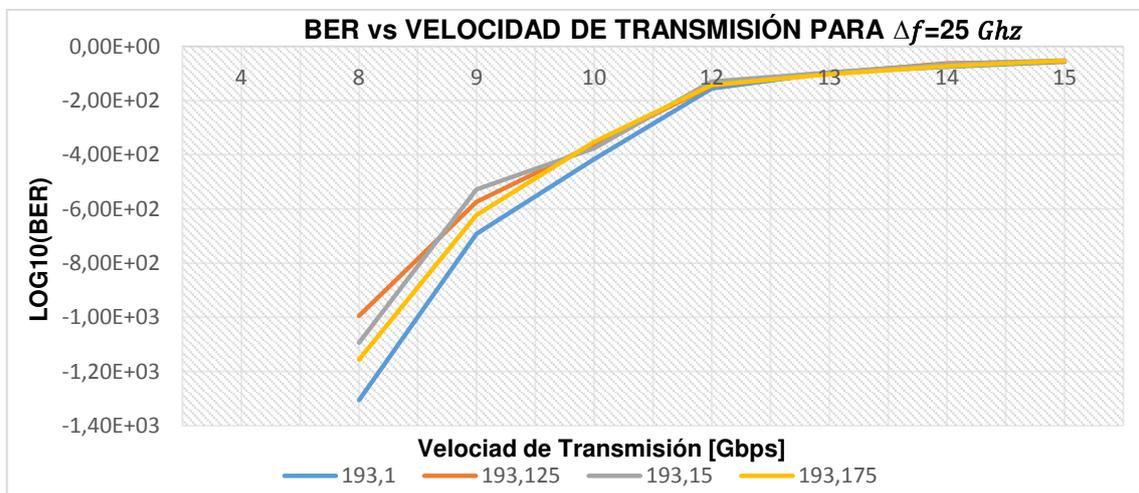


FIGURA 3.80. BER vs Velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamento de 25 GHz.

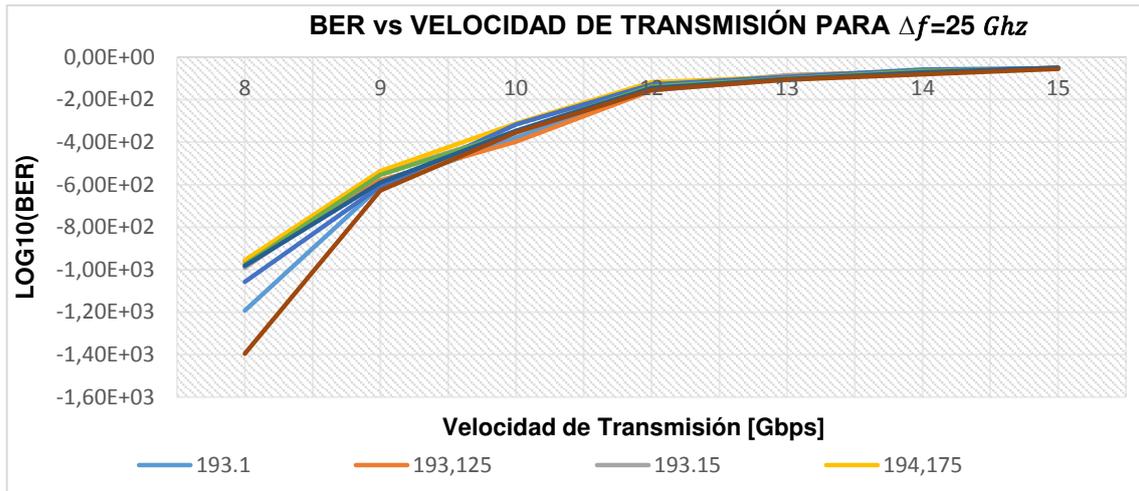


FIGURA 3.81. BER vs Velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamento de 25 GHz.

En la tabla 3.32 se observa que el MUX/DEMUX WDM con espaciamento de canal de 25 GHz para 4 y 8 canales puede operar a una capacidad menor al mismo sistema con un espaciamento de canal a 50 GHz y 100 GHz, debido que, al disminuir el espaciamento de canal, el factor Q disminuirá para todas las velocidades usadas en la simulación. También se visualiza que el MUX/DEMUX WDM con espaciamento de canal de 25 GHz puede operar correctamente hasta velocidades de 12 Gbps, a diferencia del MUX/DEMUX WDM con un espaciamento de 50 GHz que puede operar hasta velocidades de 20 Gbps, tomando en cuenta los valores recomendados citados anteriormente. En la tabla también se aprecia que los valores obtenidos para 4 y 8 canales son muy parecidos al igual que sucedió en las simulaciones anteriores.

Tabla 3.32. Valores de Q mínimo y BER máximo del MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem para 4 y 8 canales con espaciamento de 25 GHz a 4, 10,12 y 15 Gbps.

VTx [GHz]	4	10	12	15
Q min (4 canales)	39,117	12,465	7,325	4,342
BER máx. (4 canales)	0	$5.32 \cdot 10^{-36}$	$1.11 \cdot 10^{-13}$	$6.6 \cdot 10^{-6}$
Q min (8 canales)	38,213	11,704	6,952	4,25
BER máx. (8 canales)	0	$2.36 \cdot 10^{-32}$	$1.62 \cdot 10^{-12}$	$1.06 \cdot 10^{-5}$

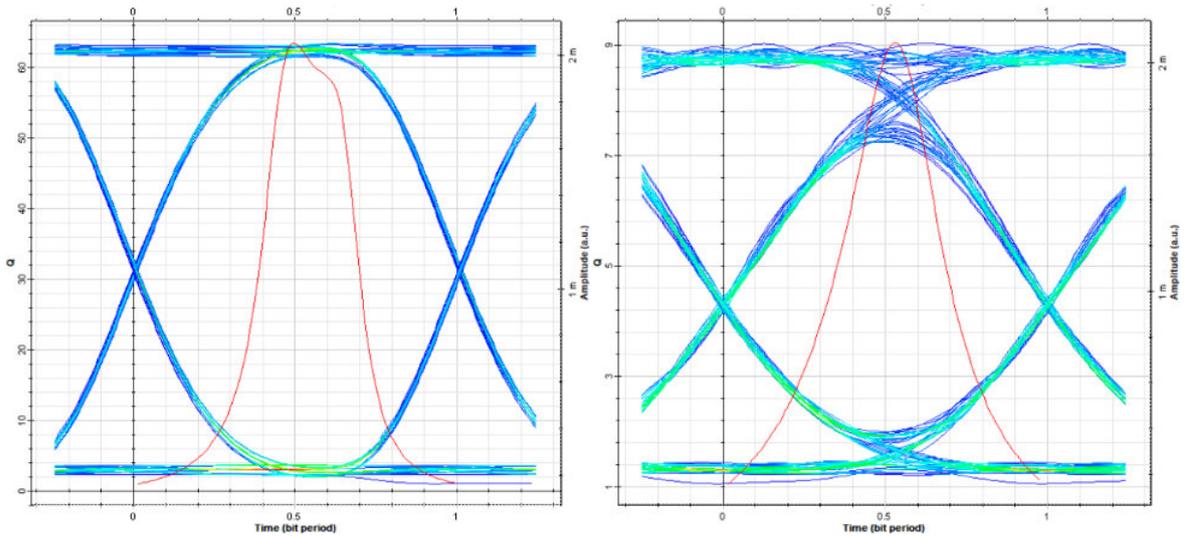


FIGURA 3.82. Diagramas de ojo para el canal 193.3 THz a 4 Gbps (izq) y 12 Gbps (der) para 4 canales.

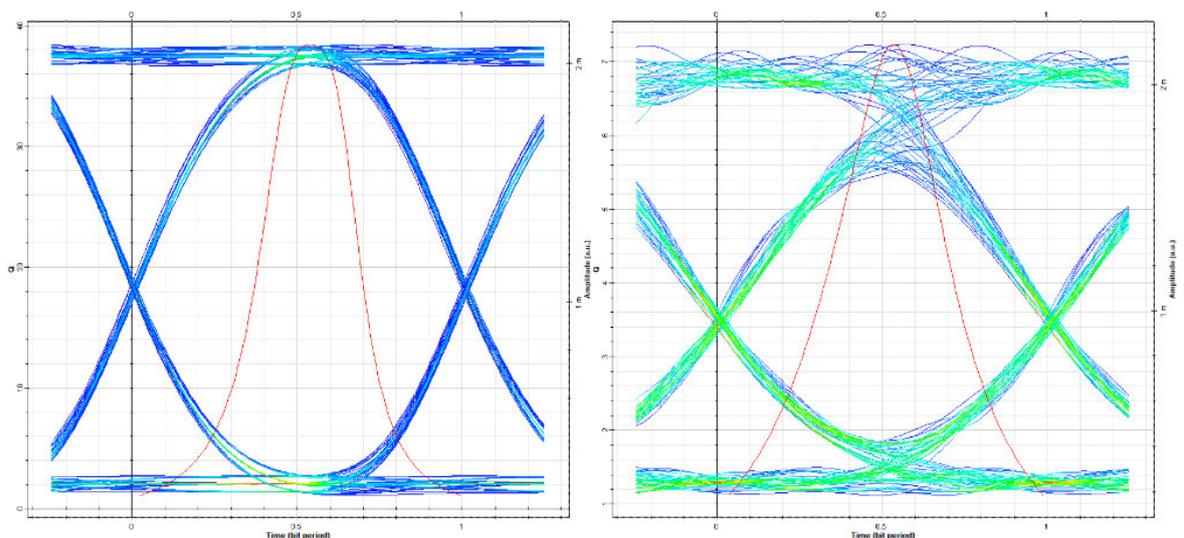


FIGURA 3.83. Diagramas de ojo para el canal 193.3 THz a 4 Gbps (izq) y 12 Gbps (der) para 8 canales.

Al aumentar la velocidad el ojo empieza a cerrarse como se puede observar en la figura 3.82 y 3.83, mientras que a una velocidad de 4 Gbps el diagrama de ojo se encuentra despejado. Con estas observaciones confirmamos que a velocidades mayores a 12 Gbps el ojo se encontrará menos despejado por lo que provocará distorsión y dificultará la recepción de los datos. Este comportamiento es similar en todos los canales del MUX/DEMUX WDM para 4 y 8 canales.

3.4.4.4. Análisis de resultados del MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem

Tras realizar las simulaciones del MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem, se puede concluir que al aumentar la velocidad el factor Q tiende a disminuir y el valor de BER a aumentar en cada canal independientemente del espaciamiento de canal. Sin embargo, con el aumento del espaciamiento de canal se obtiene mejores valores de factor Q y BER para todas las velocidades empleadas en la simulación en los 4 y 8 canales. Esto se evidencia al trabajar con un espaciamiento de canal de 100 GHz, donde alcanzó una velocidad máxima de operación de 45 Gbps por canal. Finalmente se pudo observar que todos los canales se degradan de la misma forma para todos los espaciamientos de canal que se usaron en la simulación.

3.5. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS 3 TIPOS DE MUX/DEMUX WDM

En el siguiente apartado se realizará la comparación de las distintas tecnologías para los MUX/DEMUX WDM con los resultados obtenidos en los análisis anteriores. En primer lugar, se mostrarán las figuras de factor Q mínimo (Q_{min}) y tasa de bits de errores máximo ($BER_{máx}$) en relación con la velocidad de transmisión, para realizar una evaluación en términos de capacidad y determinar qué tecnología tiene mejor comportamiento, tomando como referencia los valores de Factor Q y BER recomendados por la ITU-T. Los datos utilizados, serán los obtenidos en las tablas citadas anteriormente, de donde se escogerá el peor valor de BER y Factor Q, para cada velocidad independientemente del canal. Después se analizarán de la misma manera las figuras de factor Q máximo (Q_{max}) y tasa de bits de errores mínimo (BER_{min}) en relación con la velocidad de transmisión, pero con la diferencia que se toman los mejores valores de factor Q y BER para cada velocidad, de tal manera que se evalúa el rendimiento de las diferentes tecnologías. Al final se realiza una reseña general de las tres tecnologías de MUX/DEMUX WDM para determinar su mejor desempeño y justificar su comportamiento.

Tras el análisis de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para los distintos MUX/DEMUX WDM a un espaciamiento de canal de 100 GHz, se puede concluir que para 4 y 8 canales el MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem y el construido a partir de FBG y circuladores pueden tolerar la misma velocidad máxima de operación (capacidad) y duplican a la alcanzada con el MUX/DEMUX WDM con MZI. Adicionalmente, el MUX/DEMUX WDM basado MZI en cascada es el primero en llegar a superar el mínimo valor de factor Q y BER máximo recomendados para una operación eficiente y por ende

es el que menor capacidad por canal tendrá, esta particularidad ocurre para 4 y 8 canales y se puede evidenciar en las gráficas que se presentarán más adelante.

En las figuras 3.84.a y 3.84.b se observa el Q mínimo vs velocidad de transmisión y BER máximo vs velocidad de transmisión para las tres tecnologías de MUX/DEMUX WDM de 4 canales respectivamente, para un espaciamiento de canal de 100 GHz. La tabulación de datos de estas graficas se muestra en las tablas Q.1 y Q.2 del anexo Q. Estas gráficas permiten determinar cuál MUX/DEMUX WDM puede funcionar a mayor velocidad en base al Q mínimo y BER máximo recomendado para canales WDM.

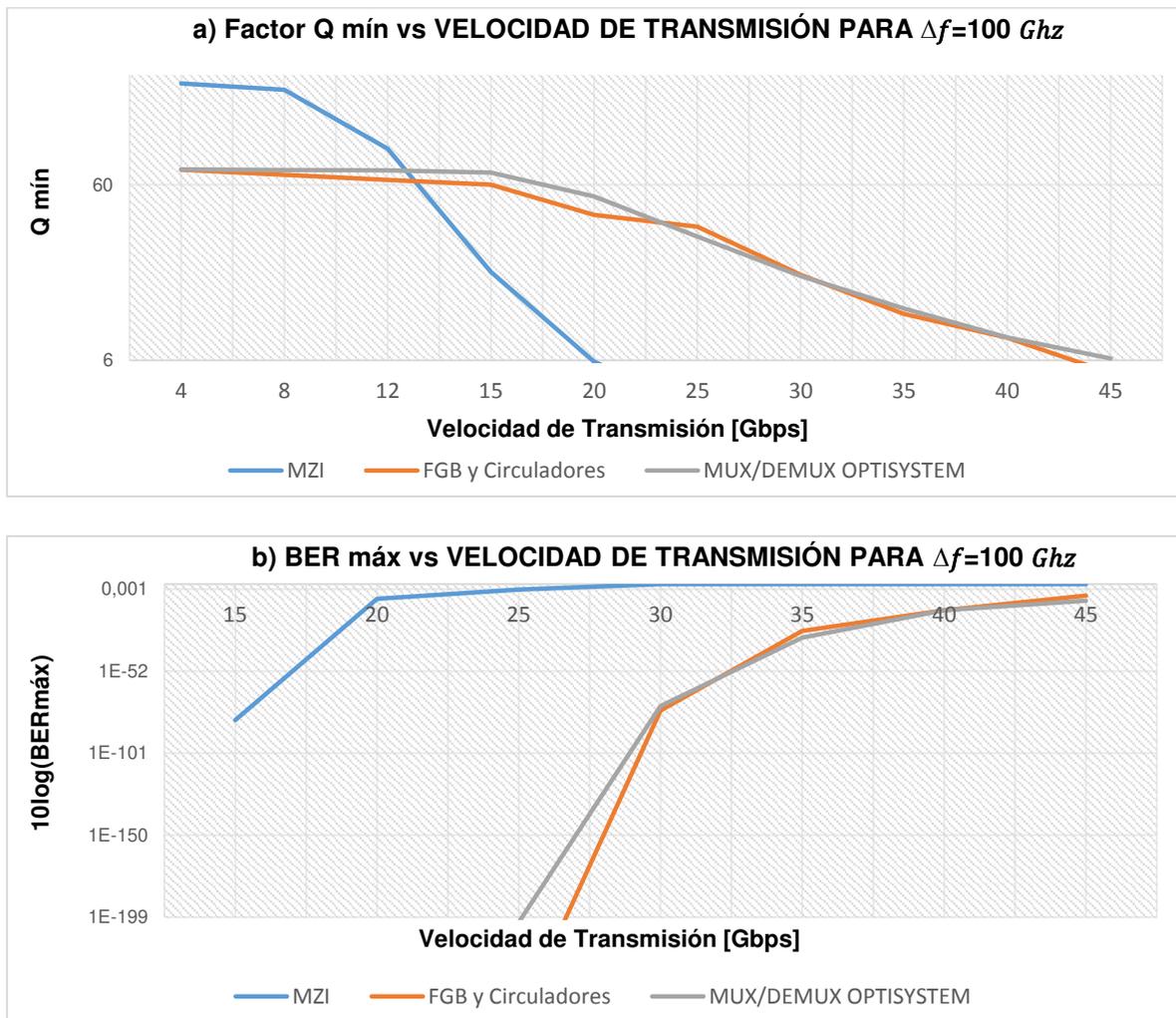


FIGURA 3.84. a) Q mínimo y b) BER máximo vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamiento de 100 GHz.

En la figura 3.85.a y 3.85.b se observa las gráficas presentadas anteriormente, pero para 8 canales. La información detallada de las figuras se encuentra en las tablas R.1 y R.2 anexo R. En estas gráficas se aprecia que, tras aumentar el número de canales, la velocidad máxima de operación se reduce en los MUX/DEMUX WDM basados en MZI. Por

otro lado, en el MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem y el basado en FBG y circuladores, el aumento de canales no influye en el comportamiento, ya que los resultados de 8 canales son muy similares a los que se obtuvo con 4 canales.

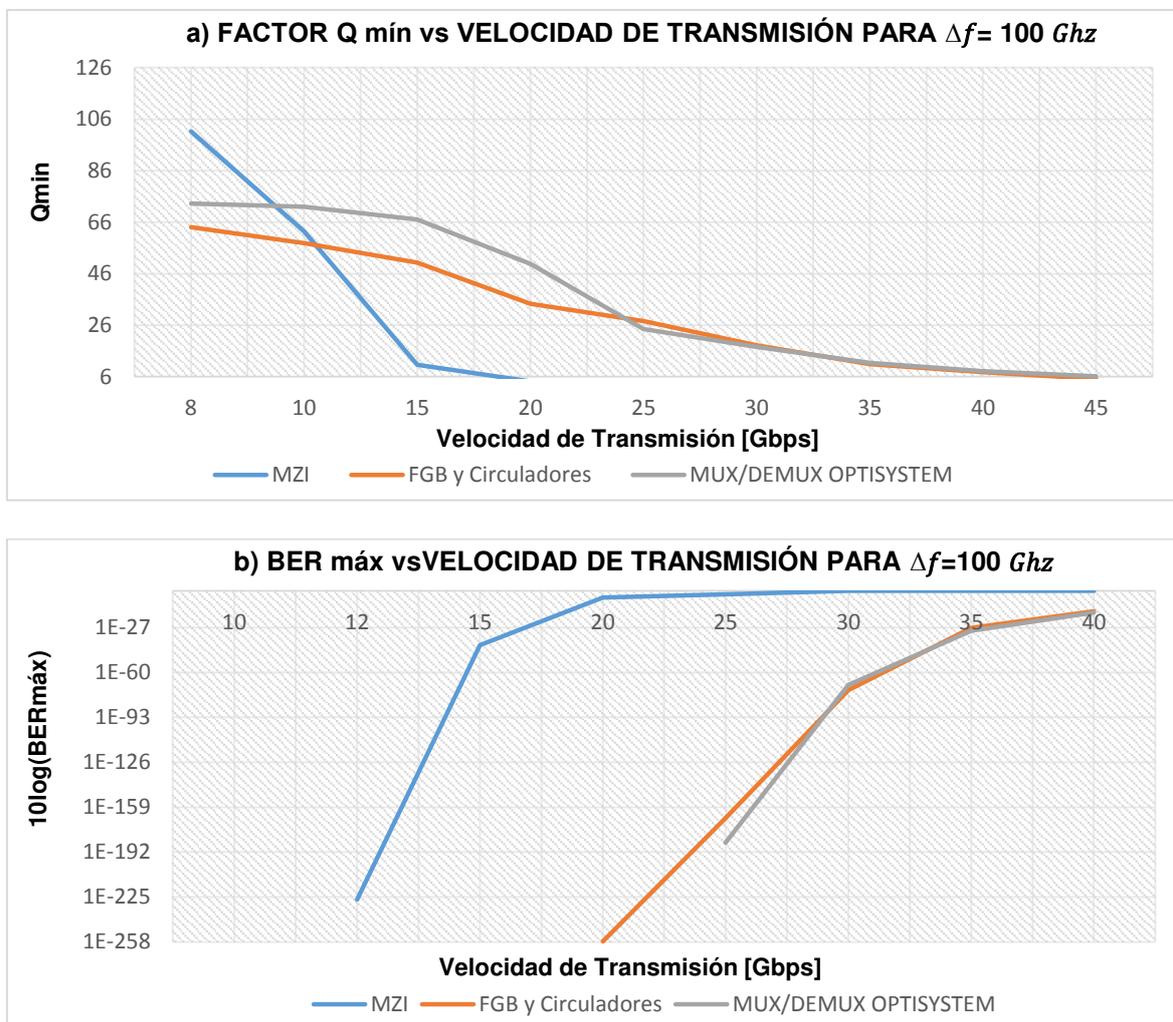


FIGURA 3.85. a) Q mínimo y b) BER máximo vs velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamento de 100 GHz.

Tras los resultados obtenidos, el orden en términos de capacidad de mayor a menor para los MUX/DEMUX WDM de 4 y 8 canales es el siguiente:

1. MUX/DEMUX disponible en OptiSystem (capacidad aproximada de 160 Gbps para 4 canales y 320 Gbps para 8 canales)
2. MUX/DEMUX basado en FBG y circuladores (capacidad aproximada de 160 Gbps para 4 canales y 320 Gbps para 8 canales)
3. MUX/DEMUX basado en MZI (capacidad aproximada de 72 Gbps para 4 canales y 120 Gbps para 8 canales).

En la figura 3.86.a se puede observar que el MUX/DEMUX con MZI para 4 canales ofrece mejores valores de factor Q a bajas velocidades (cercana a 10 Gbps) en comparación a los otros dos tipos de MUX/DEMUX WDM. Por otro lado, a velocidades superiores a 10 Gbps el que presenta mejor comportamiento en términos de factor de calidad Q es el MUX/DEMUX WDM basado en FBG y circuladores, seguido del MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem y el que presenta valores más bajos de factor de calidad Q es el MUX/DEMUX WDM basado en MZI. La información que respalda a la figura 3.86 se presenta en las tablas Q.1 y Q.2 del anexo Q.

En la figura 3.86.b se puede observar que el MUX/DEMUX con FBG y circuladores para 4 canales presenta mejor BER a todas las velocidades empleadas en la simulación, seguido del disponible en OptiSystem y el que peor condición de BER presenta es el MUX/DEMUX WDM basado en MZI, la información que respalda estos resultados se presenta en las tablas Q.1 y Q.2 del anexo Q. Se analizó la gráfica a partir de 15 Gbps en adelante debido a que todos los dispositivos presentan buenas condiciones de BER hasta 12 Gbps.

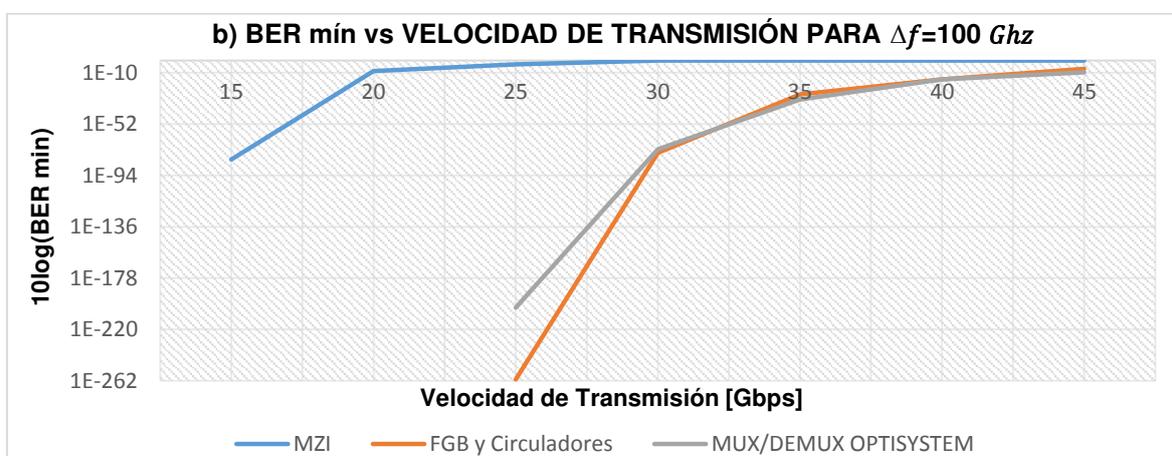
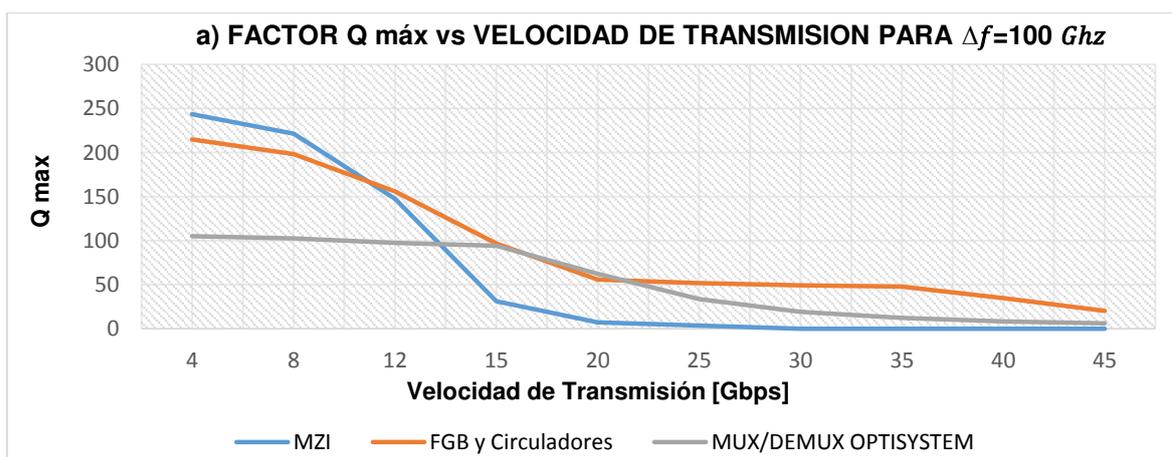


FIGURA 3.86. a) Q máximo y b) BER mínimo vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamento de 100 GHz.

Al incrementar el número de canales a 8 se presentan ligeras diferencias en el desempeño de los tres MUX/DEMUX WDM con respecto al de 4 canales. A velocidades menores a 10 Gbps, sigue siendo el MUX/DEMUX basado en MZI, el que mejor factor Q y BER presenta (mejor rendimiento). Sin embargo, de las figuras 3.87.a y 3.87.b se observa que a velocidades entre 11 Gbps y 22 Gbps aproximadamente, el que mejor desempeño presenta es el MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem, seguido del basado en FBG y circuladores. Por otro lado, a velocidades superiores a 22 Gbps (aproximadamente) se tiene el mismo comportamiento que se obtuvo con los MUX/DEMUX WDM con 4 canales, es decir el que mejor desempeño presenta es el MUX/DEMUX WDM basado en FBG y circuladores, seguido del disponible en OptiSystem y por último el que peor desempeño presenta es el basado en MZI. Esto se puede sustentar con la información de las tablas R.1 y R.2 del anexo R.

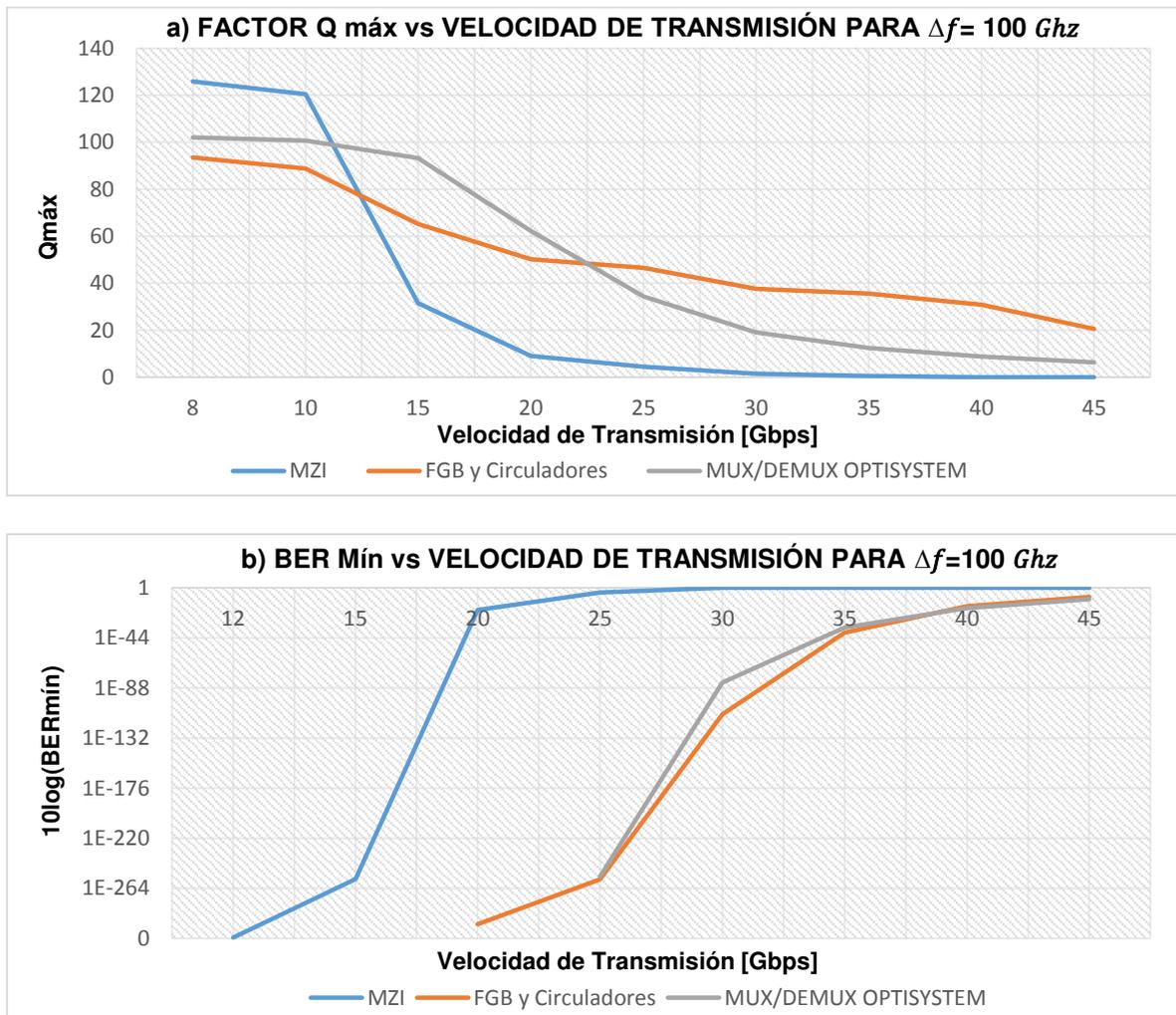


FIGURA 3.87. a) Q máximo y b) BER mínimo vs velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamento de 100 GHz.

Continuando con el análisis, al disminuir el espaciamento de canal a 50 GHz para los MUX/DEMUX WDM de 4 y 8 canales, se espera que los distintos tipos de MUX/DEMUX WDM operen a menor velocidad de acuerdo con el análisis que se realizó individualmente. Mediante las figuras 3.88.a y 3.88.b se observa que esto se cumple para 4 canales, la tabulación de estos resultados se presenta en las tablas Q.3 y Q.4 del anexo Q. Siendo el MUX/DEMUX disponible en OptiSystem el que mayor velocidad de operación alcanza (capacidad), seguido del basado en FBG y circuladores y por último el basado en MZI.

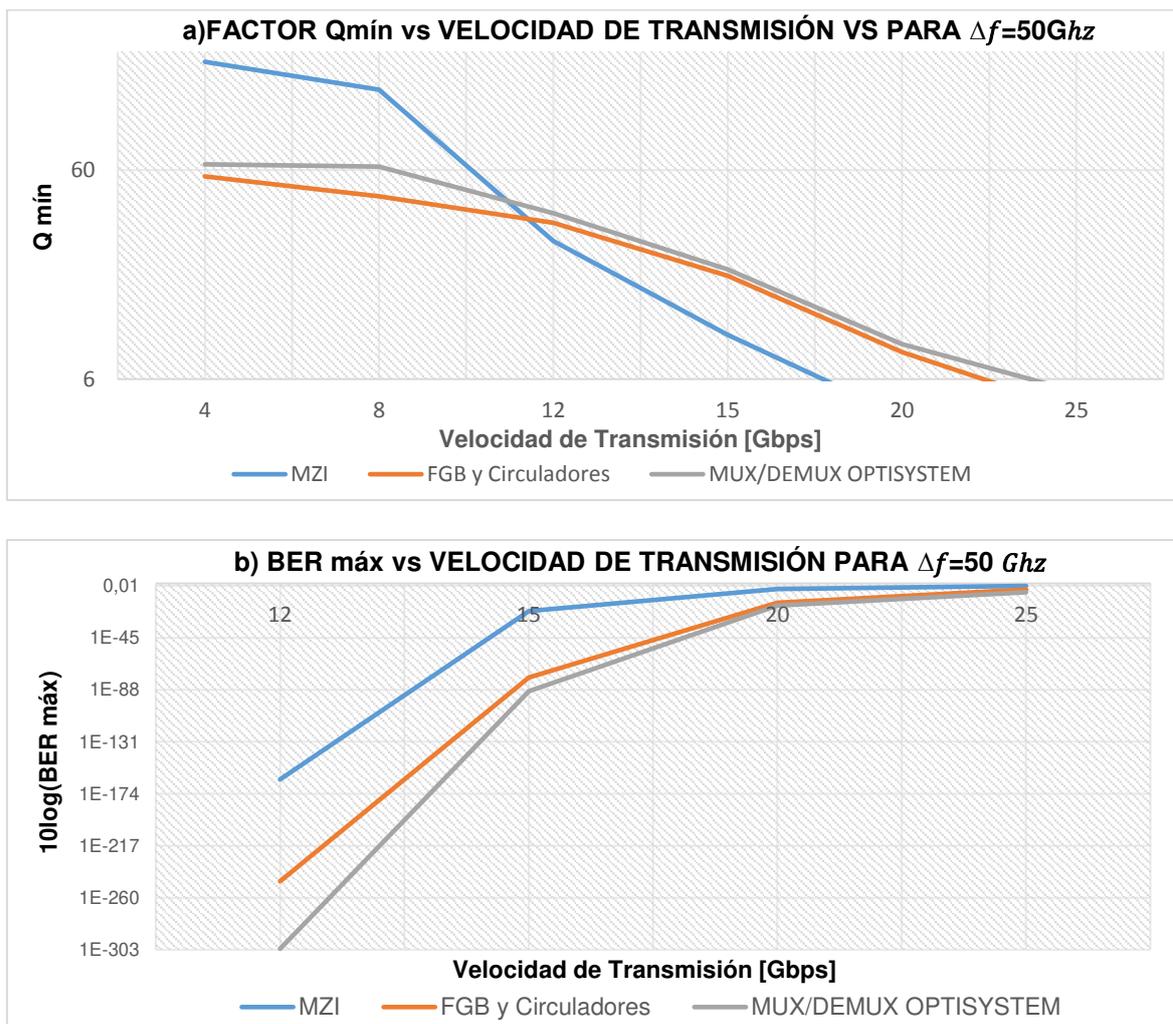


FIGURA 3.88. a) Q mínimo y b) BER máximo vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamento de 50 GHz.

Al aumentar el número de canales se espera que la velocidad máxima de operación (capacidad) por canal de los MUX/DEMUX WDM a 50 GHz sea menor en comparación a los de 4 canales. Esto se evidencia en las figuras 3.89.a y 3.89.b, donde se observa que el MUX/DEMUX WDM basado en MZI alcanza una velocidad máxima de 12 Gbps, que es menor a la que se obtuvo con 4 canales (15 Gbps). En caso del MUX/DEMUX WDM basado

en FBG y circuladores la velocidad de operación máxima está por debajo de los 20 Gbps y ya no alcanza los 20 Gbps, como se obtuvo con 4 canales. Por otro lado, en el MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem el aumento de canales no afectó drásticamente, ya que llegó a alcanzar la misma velocidad máxima de operación que se alcanzó con 4 canales.

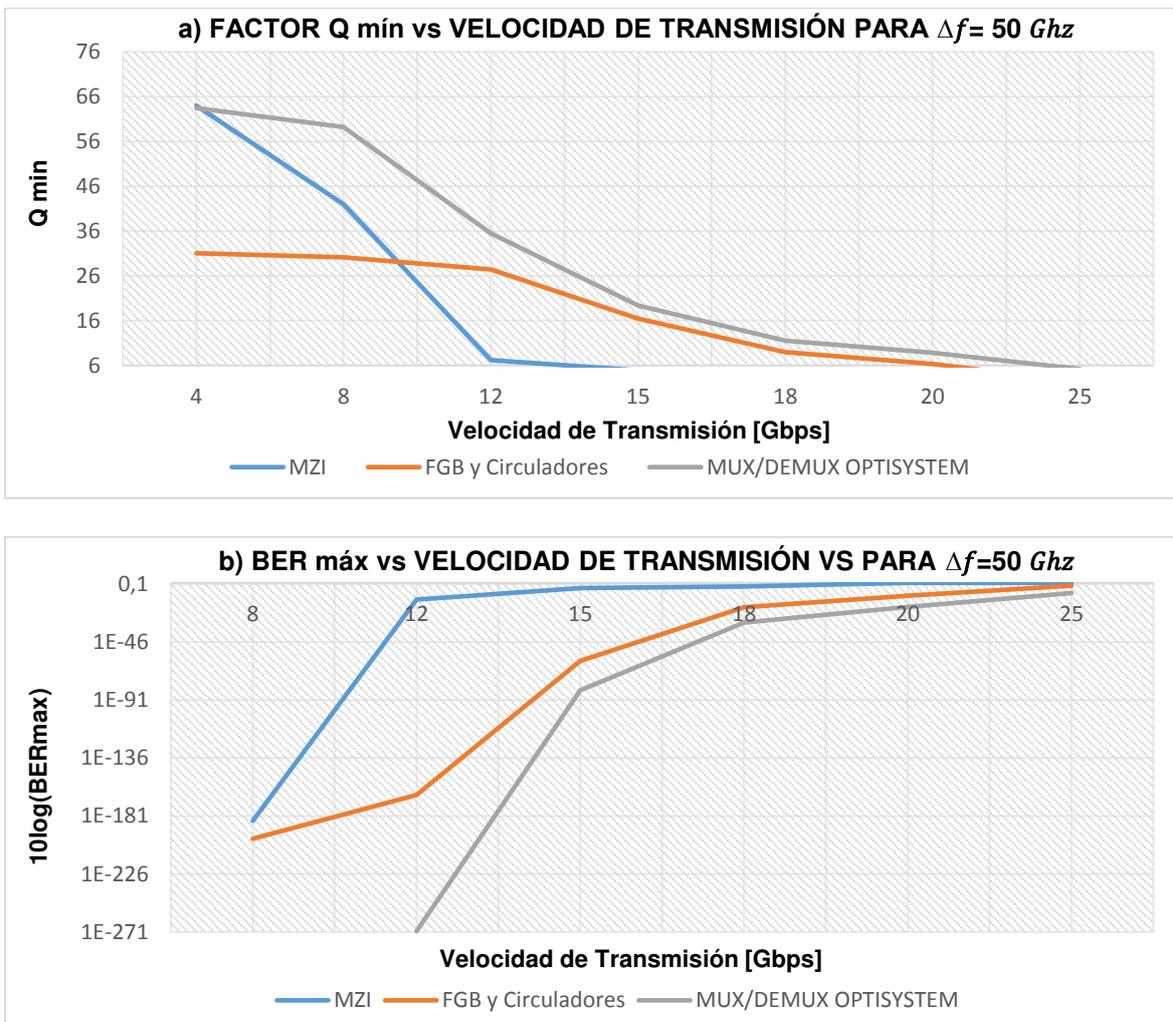


FIGURA 3.89. a) Q mínimo y b) BER máximo vs velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamiento de 50 GHz.

Al observar este comportamiento se confirma que, con la disminución del espaciamiento de canal, los tres tipos de MUX/DEMUX WDM alcanzan una velocidad menor con respecto a un espaciamiento de canal de 100 GHz, tanto para 4 y 8 canales. El orden de capacidad de mayor a menor basando en estas gráficas de 4 y 8 canales es el siguiente.

1. MUX/DEMUX disponible en OptiSystem (capacidad aproximadamente de 90 Gbps para 4 canales y de aproximadamente 180 Gbps para 8 canales)

2. MUX/DEMUX basado en FBG y circuladores (capacidad aproximada de 80 Gbps para 4 canales y menor a 160 Gbps para 8 canales)

3. MUX/DEMUX basado en MZI (capacidad aproximada de 60 Gbps para 4 canales y de aproximadamente 96 Gbps para 8 canales)

Al igual que para el MUX/DEMUX WDM con espaciamento de 100 GHz, el análisis del desempeño de cada uno se hará en base a las figuras 3.90.a y 3.90.b referentes a factor Q máximo vs velocidad de transmisión y BER mínimo vs velocidad de transmisión para cada uno de los MUX/DEMUX WDM con espaciamento de canal de 50 GHz. De las gráficas se puede concluir que el MUX/DEMUX WDM para 4 canales basado en MZI, presenta un mejor factor de calidad Q hasta aproximadamente una velocidad de 12 Gbps. Por otro lado, a partir de 12 Gbps el orden de desempeño de los MUX/DEMUX se invierte, siendo el MUX/DEMUX con FBG y circuladores el que mejor factor Q y BER presenta y por ende mejor desempeño tiene, seguido del MUX/DEMUX disponible en OptiSystem, dejando al MUX/DEMUX basado en MZI con el peor desempeño. La tabulación de estos resultados se presenta en las tablas Q.3 y Q.4 del anexo Q.

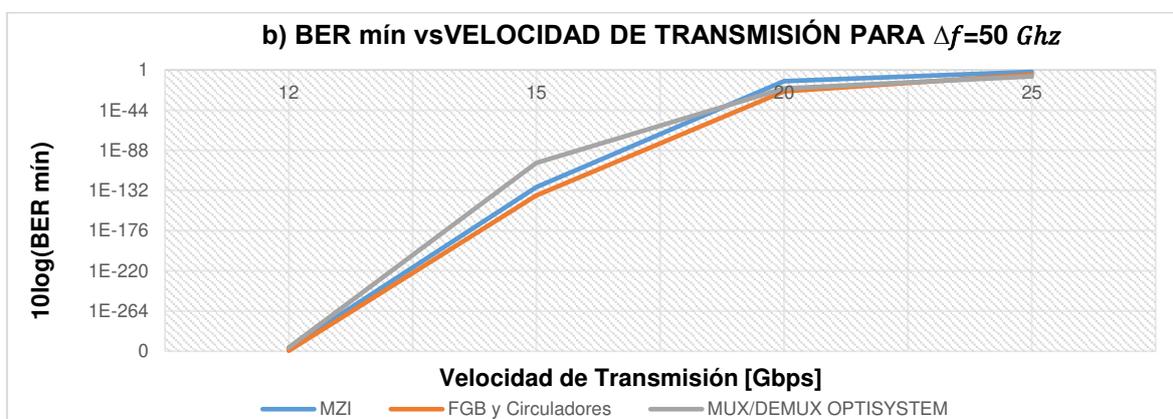
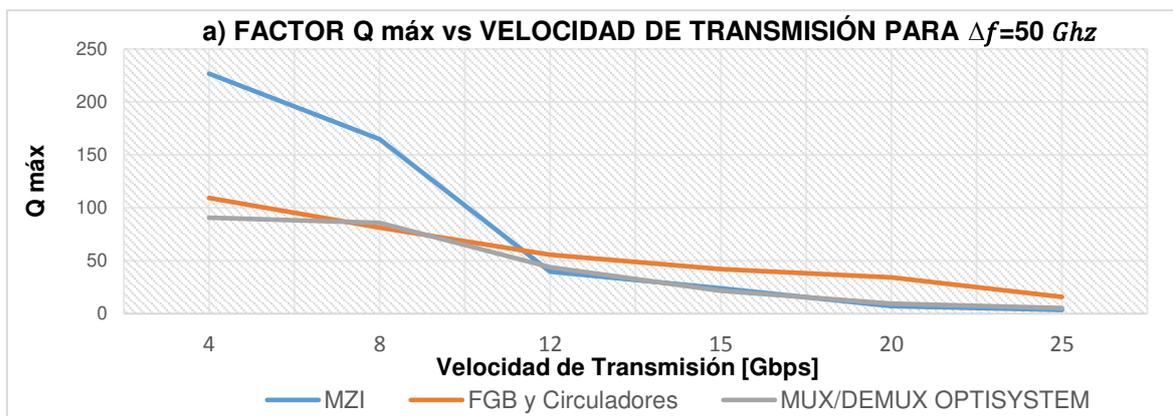


FIGURA 3.90. a) Q máximo y b) BER mínimo vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamento de 50 GHz.

Al incrementar el número de canales a 8, el orden del desempeño de las tres tecnologías de MUX/DEMUX WDM varía con respecto al obtenido con 4 canales. En este caso el que mejor desempeño presenta es el MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem hasta una velocidad de transmisión de 12 Gbps. Sin embargo, a velocidades superiores a 12 Gbps el que presenta mejor desempeño es el MUX/DEMUX basado en FBG y circuladores, seguido del disponible en OptiSystem y por último el que peor desempeño presenta en el basado en MZI, tal y como se lo puede apreciar en las figuras 3.91.a y 3.91.b donde se muestran las curvas para el Factor Q y BER. Las figuras están basadas en los datos que se presentan en las tablas R.3 y R.4 del anexo R.

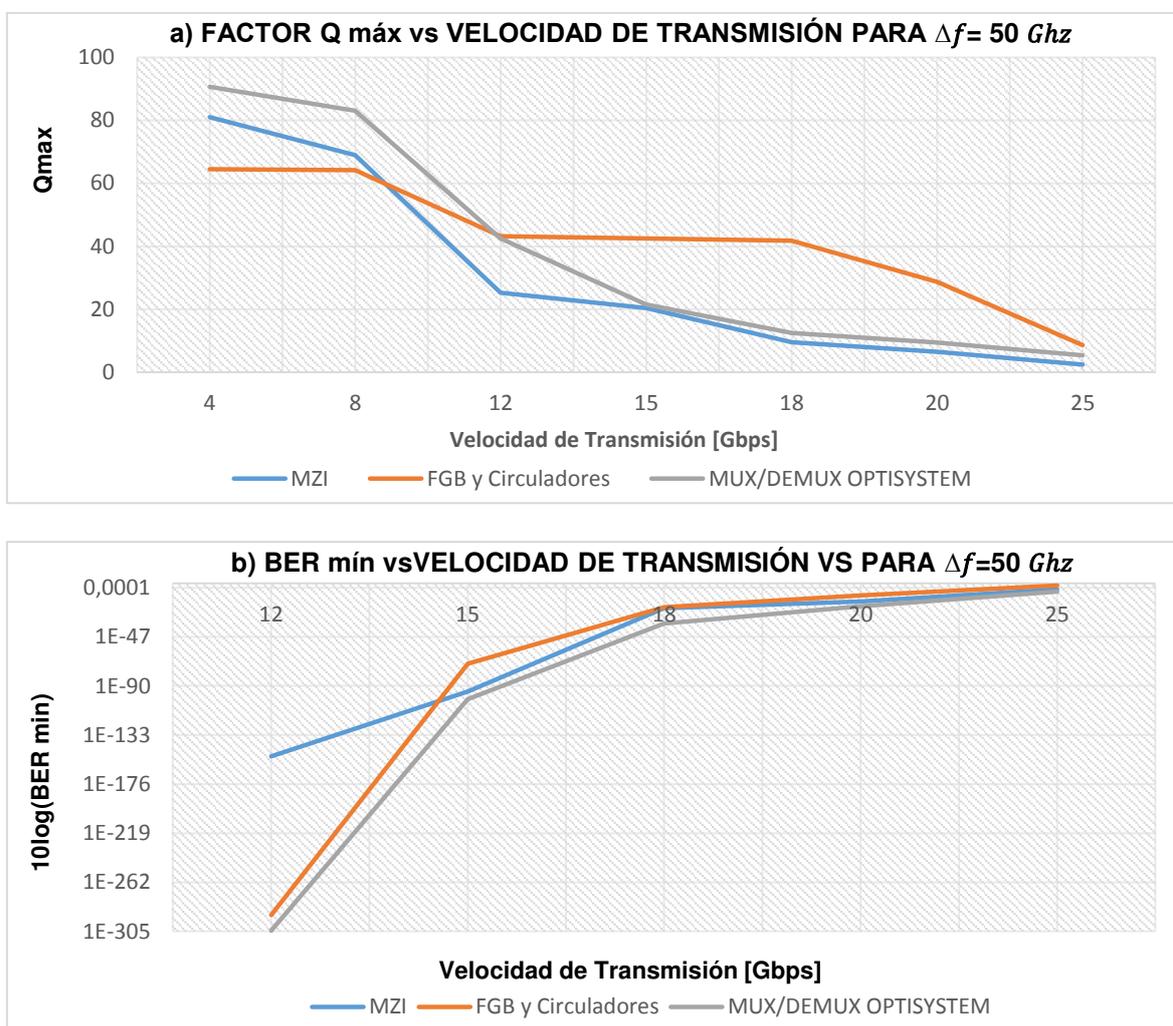


FIGURA 3.91. a) Q máximo y b) BER mínimo vs velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamiento de 50 GHz.

Finalmente, al disminuir el espaciamiento de canal a 25 GHz en los MUX/DEMUX WDM para 4 canales, los tres tipos de MUX/DEMUX WDM alcanzan velocidades de operación menores en comparación a espaciamientos de canal de 50 GHz y 100 GHz. En la figura

3.92.a y 3.92.b se observa a qué velocidad cada MUX/DEMUX WDM llega a su límite de factor Q y BER, la información tabulada de las figuras se encuentra en las tablas Q.5 y Q.6 del anexo Q. Se puede concluir que el MUX/DEMUX WDM basado en FBG y circuladores es el que alcanza una mayor velocidad (capacidad), seguido del MUX/DMUX disponible en OptiSystem y el que menor capacidad presenta es el MUX/DEMUX WDM basado en MZI.

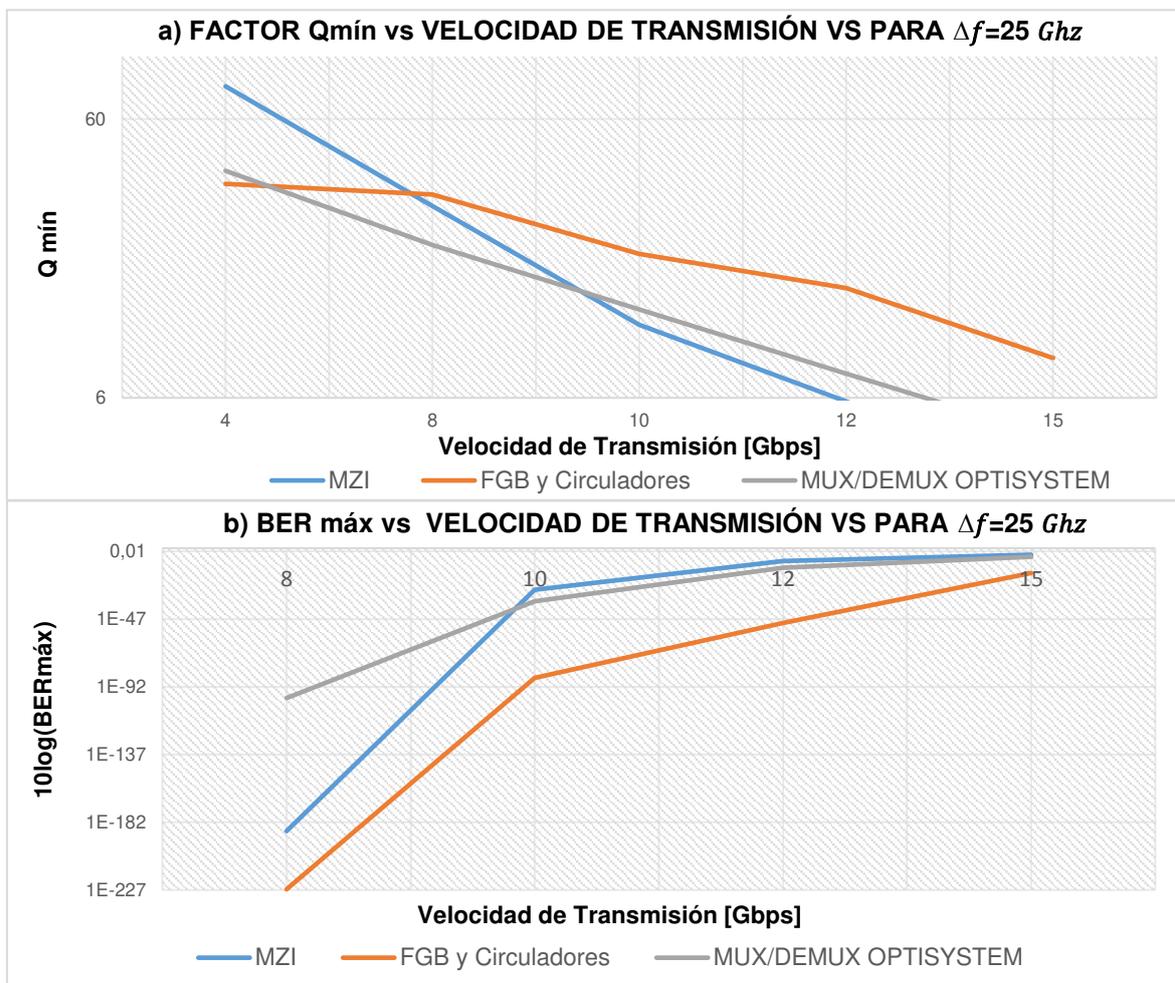


FIGURA 3.92. a) Q mínimo y b) BER máximo vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamento de 25 GHz.

Al aumentar el número de canales, los MUX/DEMUX WDM que mayor capacidad presentan son el de OptiSystem y el basado en FBG y circuladores (ambos alcanzan 12 Gbps por canal), con la diferencia de que este último disminuyó su capacidad con respecto al de 4 canales y el disponible en OptiSystem mantuvo su capacidad al trabajar con 4 y 8 canales. Por otro lado, en las figuras 3.93.a y 3.93.b, se observa que el MUX/DEMUX WDM basado en MZI alcanza una velocidad máxima de 7 Gbps por canal, que es menor a la que se obtuvo con 4 canales (10 Gbps por canal). Las figuras que se analizaron en este apartado están basadas en los datos de las tablas R.5 y R.6 del anexo R.

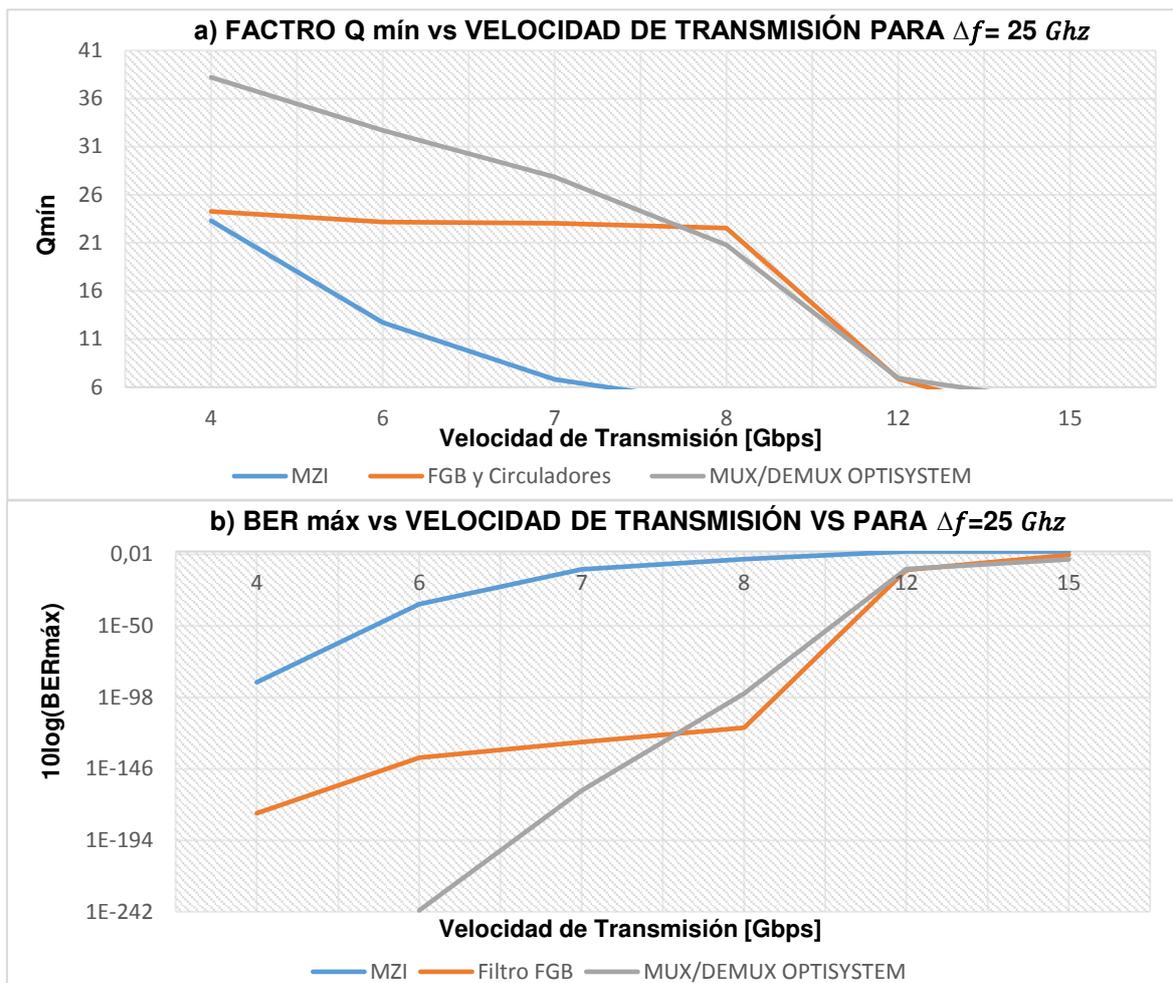


FIGURA 3.93. a) Q mínimo y b) BER máximo vs velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamiento de 25 GHz.

La información recopilada de los MUX/DEMUX WDM de 4 y 8 canales a un espaciamiento de canal de 25 GHz se presenta resumida en términos de desempeño en orden de mayor a menor de la siguiente manera:

1. MUX/DEMUX basado en FGB y circuladores (capacidad aproximada de 60 Gbps para 4 canales y de 96 Gbps para 8 canales)
2. MUX/DEMUX disponible en OptiSystem (capacidad aproximada de 48 Gbps para 4 canales y de 96 Gbps para 8 canales)
3. MUX/DEMUX basado en MZI (capacidad aproximada de 40 Gbps para 4 canales y de 56 Gbps para 8 canales)

En cuanto al desempeño de los tres MUX/DEMUX WDM para 4 canales, se puede deducir que el comportamiento de las curvas a un espaciamiento de canal de 25 GHz es muy similar al obtenido con espaciamientos de canal mayores. Con un espaciamiento 25 GHz

el MUX/DEMUX con MZI presenta un mejor factor Q hasta una velocidad cercana a 8 Gbps. Por otro lado, el MUX/DEMUX WDM basado en FBG y circuladores presenta valores de factor Q y BER mejores, es decir superior desempeño en comparación a las otras dos tecnologías a velocidades superiores a 8 Gbps, seguido del MUX/DEMUX basado en MZI, dejando al MUX/DEMUX de OptiSystem con el peor desempeño. La tabulación de estos resultados se presenta en las tablas Q.5 y Q.6 del anexo Q.

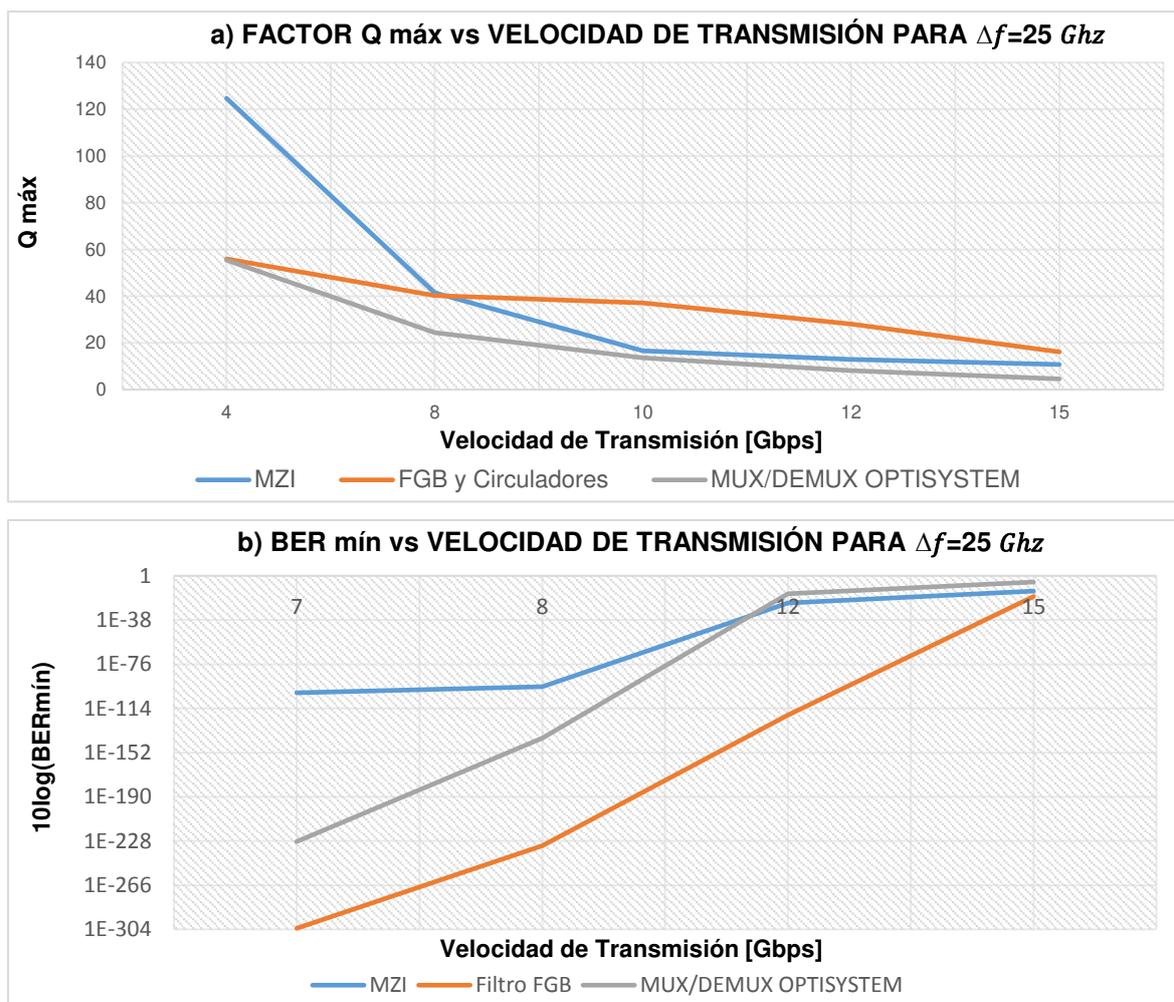


FIGURA 3.94. a) Q máximo y b) BER mínimo vs velocidad de transmisión para 4 canales con espaciamiento de 25 GHz.

Al aumentar el número de canales a 8, el comportamiento de las tres tecnologías de MUX/DEMUX WDM varía poco con respecto al de 4 canales. El basado en MZI tiene valores de factor Q y BER superiores a las otras dos tecnologías hasta una velocidad aproximada de 6.5 Gbps y ya no de 8 Gbps como en el caso de 4 canales. De igual manera para velocidades superiores a 6.5 Gbps, el que presenta mejores valores de factor Q y BER es el MUX/DEMUX basado en FBG y circuladores, seguido del de OptiSystem y el que presenta valores más bajos de factor Q y BER es el basado en MZI, tal como se lo

muestra en la figura 3.95, la misma que está respaldada en los datos de las tablas R.5 y R.6 del anexo R.

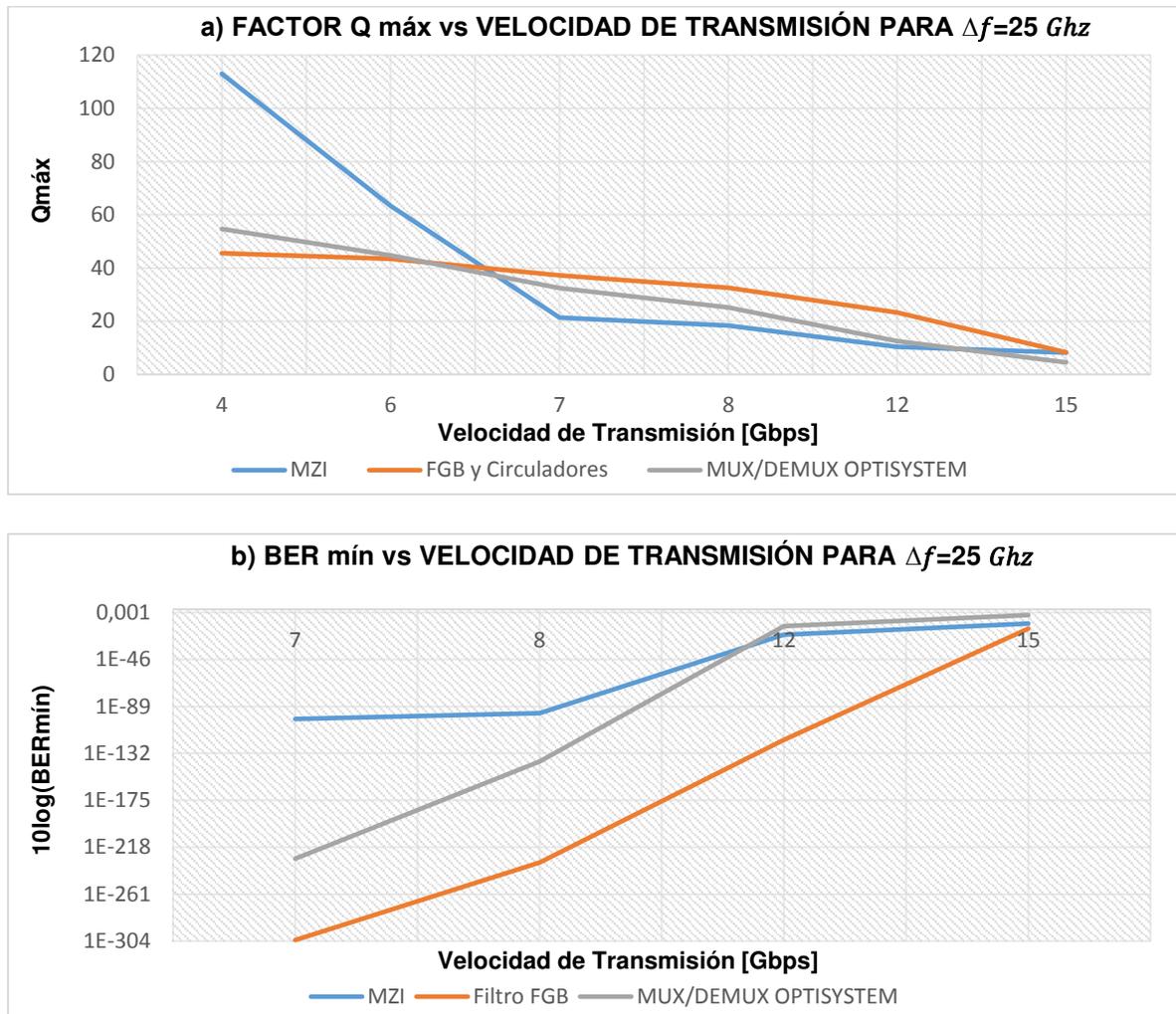


FIGURA 3.95. a) Q máximo y b) BER mínimo vs velocidad de transmisión para 8 canales con espaciamiento de 25 GHz.

Tras el análisis realizado para cada caso de simulación de los distintos tipos de MUX/DEMUX WDM, se puede decir lo siguiente:

Con respecto al OSNR en todas las tecnologías presentan valores buenos, pero en el caso del MUX/DEMUX basado en MZI muestra valores de OSNR mayores con respecto al MUX/DEMUX basado en FBG y circuladores, aunque de forma general estos valores son aceptables con respecto a la potencia y el ruido.

El MUX/DEMUX basado en MZI es el que peor desempeño tiene. Si bien es cierto que a bajas velocidades es el que mejor factor Q presenta de los tres, a medida que se aumenta la velocidad su rendimiento se degrada drásticamente, lo mismo sucede para 4 y 8 canales.

Esto se debe a que en este MUX/DEMUX WDM se tiene dos y tres etapas de demultiplexación dependiendo del número de canales y cada una de estas sufren un retardo diferente que permanecerá constante ya que se calcula el retardo en función del espaciamiento de canal. De manera que al incrementar la velocidad y al tener retardos presentes en cada etapa, provocará que los pulsos comiencen a ensancharse y por ende el rendimiento será regular a altas velocidades. Esto se puede evidenciar en las gráficas presentadas anteriormente, donde el factor Q decae drásticamente, lo que provoca que su BER también sea afectado negativamente con la misma intensidad. Por lo tanto, se puede evidenciar que al incrementar el espaciamiento de canal, el rendimiento de este MUX/DEMUX WDM no mejora notablemente como con los otros dos tipos.

Por otro lado, el que mejor rendimiento tiene es el MUX/DEMUX basado en FBG y circuladores, pues a pesar de que sufre diafonía y dispersión debido al proceso de reflexión en las FBG, estos efectos pueden ser mitigados mediante la configuración del parámetro *Bandwidth* tomando en cuenta los valores de la hoja técnica presentada y el parámetro *Reflectivity* que fue configurando al 99% que es muy cercano a ser una reflexión ideal. Esto se afirma ya que a diferencia del MUX/DEMUX basado MZI no se tiene una degradación de los canales tan drástica con el aumento de la velocidad. Por otro lado, al aumentar el espaciamiento de canal este MUX/DEMUX WDM si tiene mejoras notables en su rendimiento, por lo que a 100 GHz su velocidad máxima de operación (capacidad) es el doble a la del MUX/DEMUX con MZI.

Por último, el MUX/DEMUX WDM de OptiSystem ocupa el segundo lugar de rendimiento. Sin embargo, al no estar construido en base a algún tipo de tecnología específica no se puede hacer un análisis más detallado. Al observar los resultados obtenidos de todas las simulaciones, se puede concluir que su comportamiento es comparable al del MUX/DEMUX basado en FBG y circuladores. Esto debido a que en este componente su parámetro principal a configurar fue el *Bandwidth*, que es el mismo que se usó para configuración de las FBG del MUX/DEMUX WDM basado en FBG y circuladores, adicionalmente se usó la misma tabla de valores de *Bandwidth* para ambos MUX/DEMUX WDM. En síntesis, el MUX/DEMUX WDM de OptiSystem se puede usar como una referencia general para demostrar el comportamiento de un MUX/DEMUX WDM.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

En el presente proyecto de titulación se ha analizado los MUX/DEMUX WDM ya sea con MZI y FBG con circuladores en conjunto con aquel disponible en OptiSystem, de manera teórica y mediante simulación en el software OptiSystem de OptiWave.

Analizando el comportamiento de cada MUX/DEMUX WDM se encuentran ciertas diferencias, de lo que se puede concluir:

- En los diferentes escenarios de simulación se pudo observar que el MUX/DEMUX WDM basado en FBG con circuladores presenta un comportamiento similar al de OptiSystem. Sin embargo, el MUX/DEMUX WDM que marcó diferencia en todas las simulaciones es el basado en MZI, ya que presentó ciertas características notorias, como la degradación similar en canales adyacentes. Por ejemplo, a bajas velocidades es el que en la mayoría de los casos presenta mejor calidad en el sistema y menor tasa de bits errados con respecto a los otros dos MUX/DEMUX WDM. Al aumentar la velocidad su comportamiento se degrada abruptamente provocando que no alcance a operar a las mismas velocidades que logran los otros MUX/DEMUX WDM.

Este comportamiento se debe principalmente a la limitante de la tecnología como tal. En primer lugar, la pérdida de potencia en cada etapa impide la escalabilidad del multiplexor. En segundo lugar, la forma en que la tecnología trabaja, ya que, con el aumento de velocidad los retardos de las múltiples etapas provocan que el pulso de la señal empiece a ensancharse lo que causa que la calidad decaiga de manera drástica.

- Se pudo observar mediante las simulaciones realizadas que los parámetros *Bandwidth* y *Reflectivity* pueden ser configurados para mitigar efectos de diafonía y dispersión en el MUX/DEMUX WDM basado en FBG con circuladores. En este tipo de tecnología siempre se presentan problemas de dispersión y diafonía debido al proceso de reflexión en las FBG, que no pueden ser eliminados, pero se puede reducir su impacto. Durante las simulaciones se trabajó con una reflectividad del 99% y valores de *Bandwidth* basados en una hoja técnica, la cual permitió reducir en mayor proporción el impacto de la dispersión y diafonía. A causa de esto, se tuvo un mejor desempeño a altas velocidades de transmisión en comparación al MUX/DEMUX WDM basado en MZI.

Con respecto al parámetro *Bandwidth* en la configuración del MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem, este presenta un comportamiento similar al basado en FBG y circuladores, esto se debe a que se utilizó la misma tabla de valores de *Bandwidth* para configurar este parámetro.

- El efecto de aumentar el número de canales en las tres tecnologías de MUX/DEMUX WDM afectó en gran impacto al basado en MZI, ya que, llegó a disminuir su capacidad significativamente con respecto a la que se obtuvo con menos canales. Esta reducción de capacidad principalmente se debe al incremento de las etapas de multiplexación y demultiplexación. A causa de esto, se presenta mayores pérdidas en potencia y reducción en la calidad de los canales. Al multiplexar más de 8 longitudes de onda con esta tecnología, la calidad ya no es adecuada para enlaces de alta velocidad.

Por otro lado, el MUX/DEMUX WDM basado en FBG y circuladores no sufrió gran impacto al aumentar a 8 el número de canales, ya que, se llegó a tener capacidades muy cercanas a las que se obtuvo con 4 canales. Sin embargo, la calidad de cada canal si presenta una pequeña reducción en determinadas velocidades con el aumento de canales. Debido a este comportamiento, la escalabilidad de este MUX/DEMUX WDM es mayor a la del basado en MZI y puede llegar a un número mayor de canales y por ende, mayor capacidad.

En el presente trabajo se simuló los MUX/DEMUX WDM para 4 y 8 canales debido a la limitante de escalabilidad que se presentó el MUX/DEMUX basado en MZI.

- Al variar el espaciamiento de canal de las tres tecnologías de MUX/DEMUX WDM, estas cambian sus características de calidad y tasa de bits errados. Al reducir el espaciamiento de canal se pudo observar que para las tres tecnologías su capacidad por canal disminuye, ya que, la calidad y tasa de bits errados para una velocidad determinada empeoran. Este comportamiento es evidente y esperado ya que al reducir el espaciamiento se tiene menor ancho de banda y por ende, menor capacidad.

El comportamiento es similar al aumentar la velocidad de transmisión en las tres tecnologías. Esto se pudo observar durante las simulaciones y a medida que se aumentó la velocidad de transmisión la calidad del sistema decayó gradualmente.

- De las simulaciones realizadas con el MUX/DEMUX WDM basado en FBG y circuladores, se pudo observar que el último canal demultiplexado presentó mejor

comportamiento. Sin embargo, el resto de los canales demultiplexados presentaron un desempeño similar entre ellos y no tan bueno como en el último canal, debido a que los mismos son recuperados mediante el proceso de reflexión de las FGB que conforman el MUX/DEMUX WDM basado en FGB y circuladores. Esto provocó que al demultiplexar las longitudes de onda se presenten problemas de dispersión y diafonía que afectaron a la calidad y tasa de bits errados en todos los canales exceptuando al canal que se demultiplexa a final.

El comportamiento que se obtuvo con el último canal demultiplexado se debe a que este canal únicamente se transmite a través de todos los componentes que conforman el MUX/DEMUX WDM hasta ser demultiplexado y nunca es reflejado. Debido a esto el último canal no sufrió problemas de dispersión o diafonía por reflexión de las FGB y únicamente fue afectado por componentes no deseadas junto a su longitud de onda central.

Tomando en cuenta estos aspectos, se evidencia una ventaja en el último canal demultiplexado, ya que, al no tener dispersión y diafonía por reflexión como en el resto de los canales, lógicamente su desempeño fue superior al resto de canales.

- Tras realizar las simulaciones de las distintas tecnologías de MUX/DEMUX WDM implementadas, se pudo observar que no se presentó uniformidad en los canales para ambas tecnologías. Este resultado se debe a que en los escenarios de implementación únicamente se usó la configuración necesaria para dividir o combinar longitudes de onda. No se realizó ningún tipo de compensación de dispersión o filtrado a la salida de los MUX/DEMUX WDM implementados que permitan tener una uniformidad en los canales.

En el caso del MUX/DEMUX WDM basado en FGB con circuladores los canales no presentan uniformidad por la naturaleza de su construcción. Debido a que todos los canales pasan por un número diferente de componentes hasta ser demultiplexados. Además, de que algunos canales sufren el proceso de reflexión y otros no dentro de la configuración, como es el caso del último canal que presenta mejores características que el resto.

Por otro lado en el MUX/DEMUX basado en MZI tampoco presenta alto grado de uniformidad en sus canales debido a su principio de funcionamiento, ya que, ciertos canales sufren un número mayor de retardos que otros, provocando que tengan comportamientos diferentes.

- Al simular el componente MUX/DEMUX WDM disponible en OptiSystem, se obtuvieron resultados similares a los obtenidos con la tecnología basada en FBG con circuladores. Esto es debido a que se configuró un parámetro en común entre los dos MUX/DEMUX WDM. Por otra parte, en este componente se observó que no trabaja con una tecnología en específico, sino que dentro de su configuración presentó varios parámetros para hacerlo trabajar como distintas tecnologías, dependiendo de su configuración.

De lo obtenido se puede decir que este bloque MUX/DEMUX WDM, funciona como un componente que puede ser configurado de varias maneras para analizar las características de un MUX/DEMUX WDM en general.

4.2. RECOMENDACIONES

- En el presente trabajo de titulación se pudo evidenciar las limitantes de escalabilidad que presenta el MUX/DEMUX WDM basado en MZI, por lo que un posible trabajo de titulación podría centrarse en simular el comportamiento de otros multiplexores y demultiplexores WDM como el AWG y realizar las pruebas necesarias para determinar su comportamiento. Esta tecnología basa su estructura en el método de interferencia, lo que lo hace una generalización del MZI. El filtro AWG presenta mejores características con respecto al MZI ya que alcanza mayores velocidades, mayor número de canales y una alta selectividad, lo que puede resultar interesante ya que es un dispositivo muy usado en la actualidad en enlaces de alta velocidad y otras aplicaciones.
- En el presente trabajo de titulación se realizaron diferentes simulaciones con el fin de analizar el factor Q y BER de cada espaciamiento de canal, para concluir cuál tiene un mejor comportamiento. Para complementar de mejor manera el estudio, se sugiere realizar simulaciones basadas en potencia, tales como: transmitividad, finura y Extinction Ration.
- En el trabajo actual se implementó una tecnología MUX/DEMUX WDM basada en FBG. Una extensión y complementación de este trabajo, se puede basar en realizar la construcción de un MUX/DEMUX WDM a partir de filtros Thin-Film Filters (TFF).
- El análisis de este trabajo se realizó únicamente en la banda C del espectro con una longitud de onda inicial de 193.1 THz. Una posible extensión de este trabajo sería realizar el mismo análisis, pero para diferentes bandas del espectro como la banda S o L.

- El en el presente trabajo se utilizó FBG con variación uniforme de índice de refracción, la misma que es afectada por lóbulos laterales junto a la longitud de onda reflejada. Sin embargo, existen FBG apodizadas que se pueden utilizar para reducir estos lóbulos laterales y obtener mejores resultados de BER y factor Q. Por lo que resultaría interesante complementar este trabajo con la utilización de las FBG apodizadas.
- Una limitación del software de simulación OptiSystem, es que ya tenía los componentes modelados y únicamente se configuró ciertos parámetros que limitaron el análisis de otros fenómenos en cada tecnología simulada. El uso de otros softwares de simulación tales como OptiBPM Designer, posibilita diseñar al usuario cada uno de los componentes y puede ampliar la investigación al permitir analizar los MUX/DEMUX WDM de acuerdo con las necesidades.
- Debido a que el presente trabajo es extenso, se recomienda adquirir la licencia del software de simulación OptiSystem. Al cambiar de versión de software ciertos valores obtenidos por los elementos de medición varían y dificulta su análisis.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Biswanath, *Optical WDM Networks*. California, 2006.
- [2] R. Ramaswami, K. Sivarajan, and G. Sasaki, *Optical Networks*. 2010.
- [3] A. Talukder, "Dense Wavelength Division Multiplexing (Dwdm) Transmission System With Optical Amplifiers in Cascade," no. August, pp. 1–54, 2009.
- [4] D. Buevas, I. Téllez, and E. Amado, "Redes ópticas DWDM: diseño e implementación," *Redes ópticas DWDM diseño e implementación*, vol. 4, no. 1, pp. 70–80, 2010, doi: 10.14483/22484728.272.
- [5] C. DeCusatis, *Handbook of Fiber Optic Data Communication*. Poughkeepsie, New York, 2007.
- [6] L. Singal, *Optical Fiber Communications Principles and Applications*, vol. 1. 2011.
- [7] J. Crisp, "Introduction to fiber optics," *Introd. to fiber Opt.*, 1996, doi: 10.1017/cbo9781139174770.
- [8] H. Jeff, *City of Light: The Story of Fiber Optics*, vol. 43, no. 1. New York: Oxford University Press, Inc., 2004.
- [9] A. Govind, *Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition.*, vol. 6. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [10] S. Rivadeneira, "Análisis técnico comparativo mediante simulación de los moduladores ópticos externos," Escuela Politécnica nacional, 2020.
- [11] J. Senior and Y. Jamro, *Optical Fiber Communications*, vol. 3, no. 2. 2009.
- [12] K. Shiva and J. Deen, *Fiber Optic Communications Fundamentals and Applications*. 2014.
- [13] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, Fourth Edi. New York: Mc Graw Hill, 2011.
- [14] B. Chomycz, *Planning Fiber Optic Networks*. New York: Mc Graw Hill.
- [15] ITU-T, "Itu-T G.694.1 'Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de frecuencias con multiplexación por división de longitud de onda densa Resumen,'" *Ser. G.694.1*, p. 14, 2012, [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en%5Cnhttp://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-l/en>.

- [16] ITU-T Rec. G.694.2, "Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de multiplexación por división aproximada de longitud de onda," *Ser. G.694.1*, pp. 2–7, 2004, [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/es%0Ahttp://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en%5Cnhttp://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-I/en>.
- [17] S. Pratim, *Advances in Optical Networks and components*, First edit. New York: CRC, 2020.
- [18] D. Chadha, *Optical WDM networks: From static to elastic networks*, First. 2019.
- [19] R. Hui and M. O'Sullivan, *Fiber Optic Measurement Techniques*. 2009.
- [20] D. Achyut K., D. Niloy K., and M. Fujiwara, *WDM Technologies: Passive Optical Components*. 2003.
- [21] K. Datta and I. Sengupta, "All optical reversible multiplexer design using mach-zehnder interferometer," *Proc. IEEE Int. Conf. VLSI Des.*, pp. 539–544, 2014, doi: 10.1109/VLSID.2014.100.
- [22] H. Saghaei, P. Elyasi, and R. Karimzadeh, "Design, fabrication, and characterization of Mach–Zehnder interferometers," *Photonics Nanostructures - Fundam. Appl.*, vol. 37, no. August, p. 100733, 2019, doi: 10.1016/j.photonics.2019.100733.
- [23] I. Ashry, A. Elrashidi, A. Mahros, M. Alhaddad, and K. Elleithy, "Investigating the performance of apodized Fiber Bragg gratings for sensing applications," *Proc. 2014 Zo. 1 Conf. Am. Soc. Eng. Educ. - "Engineering Educ. Ind. Invol. Interdiscip. Trends"*, *ASEE Zo. 1 2014*, no. April, pp. 1–6, 2014, doi: 10.1109/ASEEZone1.2014.6820640.
- [24] E. Gemzický and J. Müllerová, "Apodized and chirped fiber Bragg gratings for optical communication systems: influence of grating profile on spectral reflectance," *Photonics, Devices, Syst. IV*, vol. 7138, no. November 2008, p. 71380X, 2008, doi: 10.1117/12.817998.
- [25] N. A. Mohammed, T. A. Ali, and M. H. Aly, "Performance optimization of apodized FBG-based temperature sensors in single and quasi-distributed DWDM systems with new and different apodization profiles," *AIP Adv.*, vol. 3, no. 12, pp. 0–21, 2013, doi: 10.1063/1.4859115.
- [26] F. J. Madruga, A. Quintela, and O. M. Conde, "Red de difracción optimizada para

aplicaciones en redes de interferómetros,” no. 1.

- [27] Optiwave, “OptiSystem Getting Started.”
- [28] Optiwave, “OptiSystem Tutorial - Volume 1 Communication System Design Software,” *OptiSystem*, vol. 500, pp. 1–500, 2014.
- [29] UIT-T, “SERIE O: ESPECIFICACIONES DE LOS APARATOS DE MEDIDA Aparatos de medida para parámetros de canales ópticos,” 2003.
- [30] S. Abdul-majid, S. A. L. Qaraawy, and Y. Abdul-sahib, “Software Simulation of Fiber Bragg Grating In WDM,” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 6, no. 2, pp. 70–80, 2006.