

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

SISTEMAS ÓPTICOS: ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS ÓPTICOS DE ALTAS VELOCIDADES

ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE OTDM (OPTICAL TIME DIVISION MULTIPLEXING)

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

HUGO DAVID PAUCAR HIDALGO

hugo.paucar@epn.edu.ec

DIRECTORA: ING. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ JIMÉNEZ, M.Sc.

maria.jimenez@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, HUGO DAVID PAUCAR HIDALGO declaro que el Trabajo de Integración Curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

HUGO DAVID PAUCAR HIDALGO

Certifico que el presente Trabajo de Integración Curricular fue desarrollado por HUGO DAVID PAUCAR HIDALGO, bajo mi supervisión.

ING. MARIA SOLEDAD JIMÉNEZ JIMÉNEZ, M.Sc.
DIRECTORA

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el Trabajo de Integración Curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

HUGO DAVID PAUCAR HIDALGO

ING. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ JIMÉNEZ, M.Sc.

DEDICATORIA

A mis padres, Marcelo Paucar y Angelita Hidalgo.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, Marcelo y Angelita, han sido mi soporte en cada etapa de mi vida, he aprendido mucho de cada uno de ustedes, su trabajo y esfuerzo hoy día dan sus frutos. Les agradezco por cada palabra de aliento, por cada consejo y sobre todo por su inmenso amor, este logro es de ustedes.

A mis hermanas, Diana y Lizbeth, por los momentos compartidos, por su cariño y apoyo, ustedes me ayudan a ser mejor cada día.

A Josselyn, llevo siempre en mi corazón todo el amor y alegría que transmites a quienes te conocemos, gracias por tener las palabras correctas en momentos difíciles.

A mis amigos Diego, Italo y Jonathan, a quiénes conozco desde el colegio y también en la universidad tuvimos la fortuna de compartir valiosos momentos. Les agradezco sobre todo por su amistad y apoyo en esta última etapa de la carrera.

A todos los amigos que la poli me permitió conocer, hicieron que este difícil camino sea más agradable.

A la Ingeniera María Soledad Jiménez M.Sc. por su tiempo y paciencia para desarrollar este trabajo, su guía oportuna y conocimientos hicieron posible culminar este trabajo.

Finalmente, agradezco a la Escuela Politécnica Nacional y a los profesores que me impartieron su conocimiento.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	1
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE	2
1.4 MARCO TEÓRICO.....	3
1.4.1 FIBRA ÓPTICA.....	3
1.4.2 FUENTES Y DETECTORES DE LUZ.....	4
1.4.3 MODULACIÓN EN SISTEMAS DE COMUNICACIÓN ÓPTICOS.....	5
1.4.4 PRINCIPIOS DE TDM (<i>TIME DIVISION MULTIPLEXING</i>).....	6
1.4.5 PRINCIPIOS DE OTDM	7
1.4.6 ENTRELAZADO DE BITS EN OTDM.....	8
2 METODOLOGÍA.....	10
2.1 ETAPAS DEL SISTEMA OTDM A SIMULARSE.....	10
2.1.1 GENERADOR DE SEÑALES.....	10
2.1.2 MULTIPLEXOR.....	11
2.1.3 DEMULTIPLEXOR.....	13
2.2 SIMULACIÓN EN OPTISYSTEM DEL SISTEMA OTDM.....	13
2.2.1 SOFTWARE OPTISYSTEM	13
2.2.2 SIMULACIÓN DEL GENERADOR DE SEÑALES	16
2.2.3 SIMULACIÓN DEL MULTIPLEXOR	19
2.2.4 SIMULACIÓN DEL DEMULTIPLEXOR	20
2.2.5 CONVERSIÓN O/E DE LA SEÑAL DEMULTIPLEXADA.....	23
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	25
3.1 RESULTADOS	25
3.1.1 GENERACIÓN DE BITS.....	25
3.1.2 ENTRELAZADO DE BITS.....	28
3.1.3 RECUPERACIÓN (DEMULTIPLEXACIÓN) DE LA SEÑAL.....	29

3.1.4	SIMULACIONES OTDM CON DIFERENTES VELOCIDADES DE TRANSMISIÓN	30
3.1.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
3.2	CONCLUSIONES	45
3.3	RECOMENDACIONES	46
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
5	ANEXOS	49
	ANEXO I.....	50
	ANEXO II.....	51

RESUMEN

En el presente Trabajo de Integración de Curricular se realiza un estudio y simulación de la técnica de multiplexación OTDM (*Optical Time Division Multiplexing*) utilizando el software de simulación OptiSystem.

El Trabajo de Integración Curricular consta de tres capítulos; en el primer capítulo se definen conceptos básicos de la fibra óptica y también el principio de funcionamiento de la técnica de multiplexación OTDM.

El segundo capítulo presenta los diagramas de bloques de las etapas necesarias para realizar la simulación del sistema OTDM, con cuatro canales multiplexados en transmisión y la recuperación de la señal de un canal en recepción. Además, se brinda una breve explicación del software OptiSystem, así también se explica cada uno de los bloques de las librerías del software utilizados para la simulación con su respectiva simbología, configuración y ubicación en el simulador.

En el tercer capítulo se muestran los resultados obtenidos al realizar las simulaciones del sistema OTDM implementado con diferentes velocidades de transmisión y conexión *back-to-back*, manteniendo fijos los valores de la potencia de transmisión y la longitud de onda de trabajo; se hace uso de los visualizadores propios del software y se analizan los resultados arrojados. Finalmente, en este capítulo también se exponen las conclusiones y recomendaciones obtenidas de la realización del Trabajo de Integración Curricular.

PALABRAS CLAVE: multiplexación, OTDM, OptiSystem.

ABSTRACT

This written work is a study and simulation of the OTDM (Optical Time Division Multiplexing) multiplexing technique using OptiSystem as simulation software.

This work consists of three chapters; the first chapter defines basic concepts of fiber optics and the principle of operation of the OTDM multiplexing technique.

The second chapter presents the block diagrams of the necessary stages to perform the simulation of the OTDM system, with four multiplexed channels in transmission and the recovery of the signal of one channel in reception. In addition, a brief explanation of the OptiSystem software is given, as well as an explanation of each of the blocks of the software libraries used for the simulation with their respective symbology, configuration and location in the simulator.

The third chapter shows the results obtained when performing the simulations of the OTDM system implemented with different transmission speeds and back-to-back connection, but the values of transmission power and wavelength are kept fixed; the software's own visualizers are used and the results are analyzed. Finally, this chapter also presents the conclusions and recommendations obtained from the realization of this work.

KEYWORDS: multiplexing, OTDM, OptiSystem.

1 INTRODUCCIÓN

La multiplexación en los sistemas ópticos permite que dos o más señales puedan ser transmitidas por una única fibra, esto incrementa la capacidad del sistema de comunicaciones y reduce sus costos [1], existen varias técnicas de multiplexación para transportar datos en sistemas de fibra óptica. Una de tales técnicas es TDM (*Time Division Multiplexing*) que tiene dos variantes: la primera que trabaja en el dominio eléctrico y la otra en el dominio óptico OTDM (*Optical Time Division Multiplexing*). OTDM es una técnica de multiplexación muy potente que ofrece una capacidad de datos muy alta y confiable a través de una fibra óptica [2].

Con el fin de conocer el funcionamiento, las ventajas y limitaciones que pueda presentar OTDM, se propone en este Trabajo de Integración Curricular un estudio, basado en simulación, que permitirá comprobar los fundamentos teóricos de esta técnica de multiplexación. Se trabajará con el software OptiSystem que posee las características y herramientas necesarias para el estudio.

Se simularán 4 canales en transmisión para realizar la multiplexación OTDM, para ello se hará uso de los bloques que son parte de las librerías del software OptiSystem. De igual manera, en el receptor, se utilizará bloques propios del software para poder recuperar la señal del canal deseado.

Finalmente se hará uso de visualizadores propios del software OptiSystem como por ejemplo *Oscilloscope Visualizer*, *Eye Diagram Analyzer* y *Optical Spectrum Analyzer*, de tal manera que se pueda obtener datos para el análisis de esta técnica de multiplexación según los escenarios de simulación que sean determinados, teniendo en cuenta que se variará la velocidad de transmisión y se mantendrán fijos los valores de la potencia de transmisión y la longitud de onda de trabajo, para el presente estudio se ha determinado que se trabajará en banda C con una longitud de onda de 1550 nm. Así mismo se tendrá una conexión *back-to-back*; considerando que el estudio está enfocado únicamente en la multiplexación.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio teórico de OTDM (*Optical Time Division Multiplexing*) respaldado con simulación.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Revisar los conceptos básicos de fibra óptica y describir el fundamento teórico de OTDM.
2. Simular un sistema OTDM de 4 canales y ver su comportamiento variando la velocidad de transmisión.
3. Analizar los resultados de las simulaciones.

1.3 ALCANCE

En este Trabajo de Integración Curricular se implementa un sistema OTDM básico de 4 canales en transmisión y se recupera la señal de un canal en recepción, para poder estudiarlo y ver el comportamiento que presente dicho sistema con diferentes velocidades de transmisión. Para ello el sistema consta de las correspondientes etapas de transmisión y recepción.

Se consideran 4 canales en transmisión ya que para fines prácticos y demostrativos de la simulación son los suficientes para poder visualizar cómo se realiza el entrelazado de bits y se obtiene la señal multiplexada, así también la recuperación de una de esas señales luego de la demultiplexación.

En el transmisor a simular con OptiSystem cada canal estará conformado por: un generador de bits aleatorios, un codificador, una fuente de luz láser, un modulador externo y retardos de tiempo que permitan asignar un slot de tiempo determinado a la señal de cada canal; y finalmente un combinador de potencia óptica que multiplexa en tiempo a las señales de los cuatro canales.

Para la parte del receptor a simular son necesarios los siguientes elementos: un splitter de potencia, retardos de tiempo, una señal de reloj para cada canal y un modulador externo. La señal obtenida a la salida del modulador se envía a un detector de luz, mismo que se encarga de convertir en señal eléctrica los pulsos de luz modulados recibidos, para así poder estudiar el comportamiento del sistema OTDM. En esta etapa también se hace uso de visualizadores disponibles en OptiSystem para posteriormente interpretar y analizar los resultados que estos arrojen.

En los escenarios a simularse los parámetros que se mantienen fijos son: la potencia de transmisión y la longitud de onda; además, se trabajará con en una conexión *back-to-back*. Únicamente se variará la velocidad de transmisión, pero manteniéndose la misma velocidad para todos los canales.

En este Trabajo de Integración Curricular no se generará un producto final demostrable.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es un hilo muy delgado de vidrio de sílice del grosor de un cabello humano. En la Figura 1.1 se puede observar que la fibra óptica consta de dos partes que son el núcleo (*core*) y el revestimiento (*cladding*). El núcleo tiene un índice de refracción más alto que el revestimiento [3].

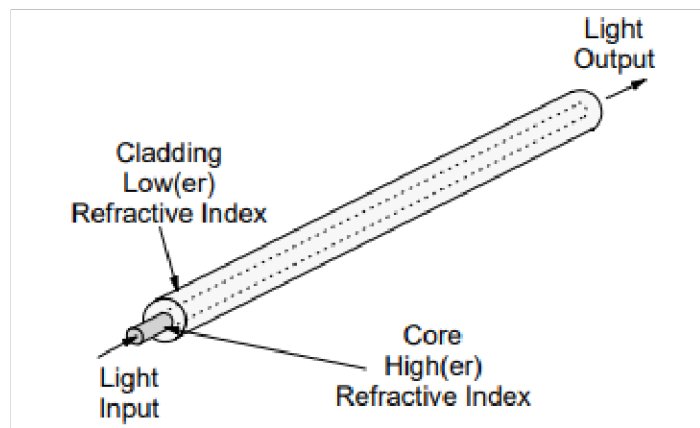


Figura 1.1. Principio básico de transmisión de luz en una fibra óptica [3].

Existen dos tipos de fibra óptica que son monomodo y multimodo, para el presente estudio es necesario enfocarse únicamente en la fibra monomodo que es la utilizada para enlaces de largas distancias.

1.4.1.1 Fibra monomodo

En la fibra monomodo de índice escalonado, se transmite un único modo. Dentro de las ventajas esta fibra presenta menor dispersión en los pulsos que propaga y por ende ofrece mayor ancho de banda para la transmisión permitiendo alcanzar mayores velocidades de transmisión. Como desventajas se puede indicar que es difícil acoplar la luz y se necesitan fuentes lumínicas direccionales como el láser [4]. A continuación, se presentan algunos tipos de fibras monomodo normalizadas en la ITU-T:

- Fibra monomodo estándar (*Standar Single Mode Fiber, SSMF*) ITU-T-G.652: en esta fibra monomodo de índice escalonado a la longitud de onda de 1310 nm (segunda ventana) la dispersión cromática es nula [1] [5].

- Fibra monomodo de dispersión desplazada nula (*Zero Dispersion Shifted Fiber, ZDSF*) ITU-T G.653 y G.654: diseñada para tener dispersión cromática cero a una longitud de onda de 1550 nm [5].
- Fibra monomodo de dispersión desplazada no nula (*Non Zero Dispersion Shifted Fiber, NZDSF*) ITU-T G.655: esta fibra fue diseñada para que la dispersión cromática nula se logre en longitudes de onda superiores o inferiores a 1550 nm para evitar inconvenientes con efectos no lineales [5].

1.4.2 FUENTES Y DETECTORES DE LUZ

Esencialmente se usan dos dispositivos para generar luz en los sistemas de comunicación con fibra óptica: LEDs (*Light Emitting Diode*) o LASERs (*Light Amplification by Stimulated of Radiation*). Una fuente láser tiene un mayor costo, pero se compensa al ser más eficiente [4]. Se da una breve explicación de la fuente láser que será la utilizada en el presente trabajo.

1.4.2.1 LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Un láser es esencialmente un amplificador óptico encerrado dentro de una cavidad reflectante que hace que oscile mediante retroalimentación positiva. Los láseres semiconductores son los más populares en sistemas de comunicación óptica ya que son muy eficientes al momento de convertir la energía eléctrica de entrada en energía óptica de salida. Los láseres semiconductores son capaces de alcanzar potencias de salida elevadas, normalmente entre 0 y 20 dBm, aunque los láseres semiconductores utilizados como fuentes WDM suelen tener potencias de salida entre 0 y 10 dBm [6]. Adicionalmente, un láser común tiene una anchura espectral que va usualmente de 1 a 3 nm, esta anchura es menor a la que presentan los LEDs que típicamente están entre 30 a 50 nm [4].

1.4.2.2 DETECTORES PIN

En los sistemas de comunicaciones ópticos se usan dos dispositivos para la detección de energía luminosa en los receptores, estos son los diodos PIN (Positivo-Intrínseco-Negativo) y los APD (fotodiodos de avalancha). El detector utilizado en el presente trabajo es el diodo PIN que será explicado a continuación.

Un detector PIN es un fotodiodo semiconductor muy usado como detector de energía luminosa en los sistemas de comunicación con fibra óptica. La luz ingresa al dispositivo a través de una ventana muy pequeña y cae sobre el semiconductor intrínseco carente de portadores, este material se hace lo suficientemente grueso para que de esta forma la

mayoría de fotones que entren al dispositivo sean absorbidos por esta capa. Al ser absorbidos los fotones agregan energía suficiente para generar portadores en la región de agotamiento. Con lo que se permite el paso de corriente por el dispositivo [4] [6].

Este detector puede trabajar a alta velocidad y tiene una moderada sensibilidad lo que lo hace adecuado para algunos sistemas de comunicación con fibra óptica, por lo que puede ser usado en sistemas que necesiten un gran desempeño [1]. Este detector es suficiente para los fines del presente trabajo.

1.4.3 MODULACIÓN EN SISTEMAS DE COMUNICACIÓN ÓPTICOS

El proceso de enviar datos mediante una portadora de luz se llama modulación. Se realiza de dos maneras: por modulación directa de un láser o usando un modulador externo a la fuente de luz [6].

1.4.3.1 Modulación directa

La modulación directa es simple y económica, ya que no se requieren otros componentes para la modulación aparte de la fuente de luz láser. Se la obtiene al variar la corriente que pasa a través de la fuente, pudiendo ser la señal moduladora analógica o digital [1] [6].

La desventaja de la modulación directa es que los pulsos resultantes tienen un *chirp*¹ considerable [6], por lo que queda confinada para bajas velocidades.

1.4.3.2 Modulación externa

Esta modulación tiene la ventaja de minimizar los efectos indeseables, particularmente el *chirp*. Actualmente se utilizan ampliamente dos tipos de moduladores externos: moduladores electroópticos (EO, *Electro-Optic*) de niobato de litio y moduladores de electroabsorción (EA, *Electro-Absorption*) de semiconductores [6].

El modulador de niobato de litio hace uso del efecto electroóptico, donde un voltaje aplicado induce un cambio en el índice de refracción del material. El dispositivo en sí está configurado como acoplador direccional o como interferómetro Mach Zehnder (MZI), este último ofrece una mayor velocidad de modulación. Los interferómetros Mach Zehnder típicamente constan de dos acopladores direccionales de 3 dB interconectados a través de dos brazos de diferentes longitudes siendo una de ellas variable, la que se aprovecha para modular la luz [6].

¹ *Chirp* es un fenómeno en el que la frecuencia portadora del pulso transmitido varía con el tiempo y provoca una ampliación del espectro transmitido [6].

En un modulador MZI se usan los pequeños cambios en el índice de refracción inducidos por un campo eléctrico que puede causar grandes cambios en la amplitud de la señal en la salida, en un brazo aumentará el índice de refracción y en el otro disminuirá, esto hace que la señal en un brazo se retrase en fase y que la señal en el otro brazo avance. Cuando la señal se recombina, los cambios de fase causarán efectos de interferencia y estos efectos son los que provocan variaciones muy grandes en la amplitud de la señal de salida [3].

En el modulador de electroabsorción, la aplicación de un campo eléctrico al modulador da como resultado la reducción de la banda prohibida del material semiconductor (unión P-N con polarización inversa), lo que hace que los fotones sean absorbidos por el material y sean convertidos en electrones. Aunque el *chirp* en el modulador de electroabsorción es mucho menor que en la modulación directa, no es tan bueno como el de los moduladores electroópticos MZI de niobato de litio, ya que con este último el *chirp* puede ser controlado con precisión [6].

El modulador utilizado en el presente trabajo es el modulador externo MZ que corresponde a un modulador electroóptico MZI, ya que por lo descrito en los párrafos anteriores es el que mejores prestaciones tiene para trabajar a altas velocidades.

1.4.4 PRINCIPIOS DE TDM (*TIME DIVISION MULTIPLEXING*)

En la Figura 1.2 se muestra un TDM eléctrico utilizado en los sistemas de comunicación óptica estándar, donde las señales eléctricas (en este caso una señal SDH correspondiente a STM-1 de velocidad 155.52 Mbps) se multiplexan en tiempo en el dominio eléctrico, asignándole a cada señal tributaria STM-1 un slot de tiempo distinto, y la señal multiplexada resultante (en este caso una señal STM-16) ingresa a una fuente láser para su conversión en luz y su posterior transmisión a través de fibra óptica. La velocidad de la señal multiplexada TDM es igual a la de velocidad de cada señal tributaria multiplicada por el número de señales que se multiplexan, con lo que la capacidad del sistema multiplexado se incrementa [7].

A medida que se tienen velocidades altas se requiere aumentar la complejidad de los equipos eléctricos tanto en el transmisor como en el receptor, lo que impone un límite de máxima velocidad alcanzada de 40 Gbps (STM-256) para los sistemas de comunicación multiplexados en tiempo eléctricamente [7].

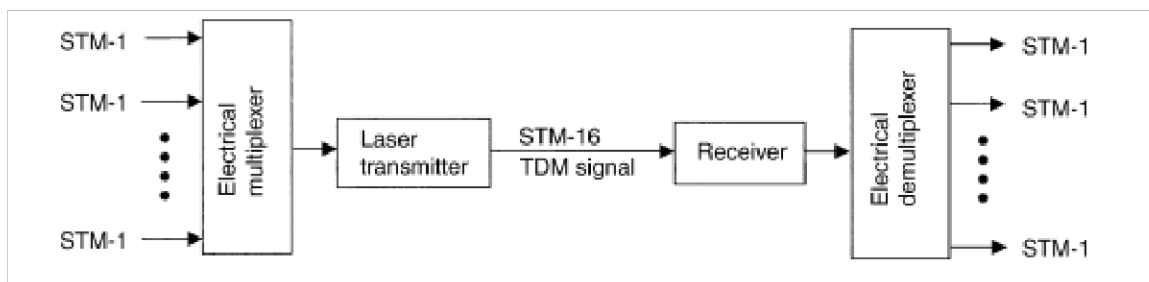


Figura 1.2. Multiplexación por división de tiempo eléctrica en un sistema de comunicación óptico [7].

Teniendo en cuenta que el tráfico de comunicaciones ha crecido considerablemente y continuará haciéndolo, para lograr satisfacer la demanda de estas capacidades superiores y con ello aprovechar de mejor manera el ancho de banda disponible en una fibra óptica, es necesario que se utilicen técnicas de multiplexación óptica para los sistemas de comunicaciones. Las dos técnicas principales de multiplexación óptica que se disponen son la multiplexación por división de longitud de onda (*WDM, Wavelength Division Multiplexing*) y la multiplexación por división de tiempo óptica (*OTDM*) [7].

1.4.5 PRINCIPIOS DE OTDM

En la Figura 1.3 se muestra el diagrama de bloques genérico de un sistema de transmisión OTDM punto a punto, donde N canales de datos ópticos, cada uno de capacidad M Gbps, se multiplexan en tiempo para dar una tasa agregada de $N \cdot M$ Gbps. Los componentes fundamentales del sistema son: la fuente de luz, el modulador óptico, líneas de retardo, un multiplexor, y un demultiplexor; también puede ser necesario el uso de amplificadores en caso de que se tengan enlaces a largas distancias de tal manera que la señal llegue con una potencia adecuada al receptor [8].

La fuente de luz debe tener una buena estabilidad y ser capaz de generar pulsos ultracortos así también el detector debe tener una responsividad y tiempo de respuesta adecuados para altas velocidades de transmisión. Es posible la modulación directa de la fuente láser, pero el método preferido se basa en la modulación externa dadas las limitaciones de la modulación directa a altas velocidades. La modulación externa resulta adecuada para altas velocidades y consiste en que el láser genera una señal con potencia óptica constante que actúa como portadora óptica y esta señal ingresa a un modulador externo al láser, al cual también ingresan los datos eléctricos a modularse [8].

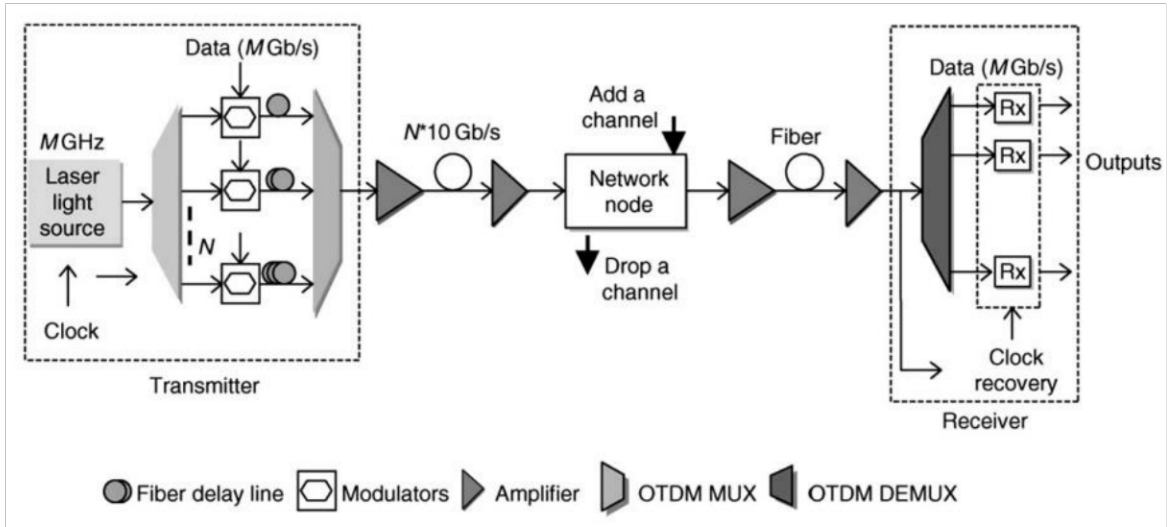


Figura 1.3. Diagrama de bloques de un sistema de transmisión OTDM [8].

1.4.6 ENTRELAZADO DE BITS EN OTDM

A continuación, en la Figura 1.4 se puede observar una descripción simple del entrelazado de bits que debe llevarse a cabo en el multiplexor OTDM. Para conseguir el entrelazado se utilizan varias líneas de retardo de fibra óptica, este retardo se lo calcula y asigna de acuerdo al intervalo de tiempo que le corresponda al canal en la señal OTDM multiplexada. Previo a ello, cada señal óptica es modulada por un flujo de datos y agregando el retardo asignado estas señales se envían a un combinador de potencia, que es un elemento pasivo que permite formar la señal de datos OTDM con una mayor tasa de bits. El número de puertos de entrada del combinador de potencia depende de la cantidad de señales que se multiplexen ya que el número de puertos debe ser igual a la cantidad de señales que se multiplexan [8].

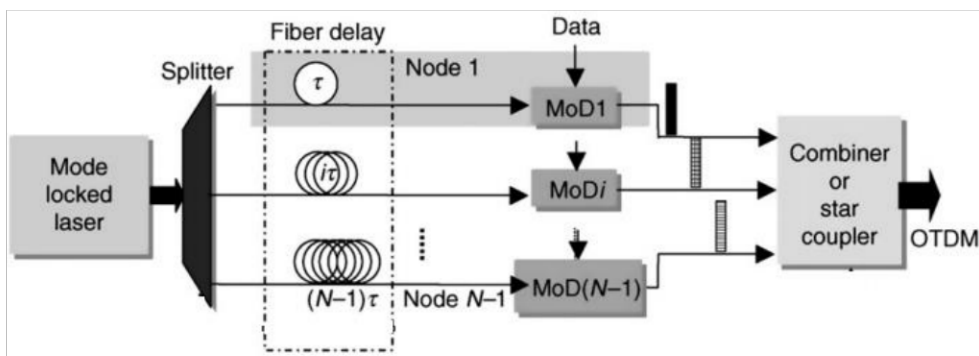


Figura 1.4. Diagrama de bloques para el entrelazado de bits OTDM [8].

Las líneas de retardo óptico se pueden implementar utilizando segmentos de fibra de longitudes controladas relativamente largas, donde la señal se mantiene circulando en la fibra para obtener los retardos que se deseen [6]. Las líneas de retardo de fibra óptica cuentan con un gran ancho de banda, una gran capacidad anti-interferencia y también alta precisión de retardo. Cuando una señal óptica circula por la línea de retardo su amplitud, polarización y frecuencia no cambian, únicamente la transmisión se retrasa por un tiempo determinado y este tiempo es proporcional a la longitud de la fibra óptica [9], por ejemplo, se requieren alrededor de 200 m de fibra para obtener un retraso de 1 μ s [6].

2 METODOLOGÍA

En este Trabajo de Integración Curricular se hace uso de la investigación cuantitativa de tipo experimental ya que se modifica el valor de una variable (independiente) mientras que los valores de otras variables se mantienen fijos, para con ello analizar el funcionamiento del sistema. Si bien el trabajo es de tipo experimental, se lo hace a través de una herramienta de simulación como es el software OptiSystem, los resultados de las simulaciones con este software permiten validar los datos teóricos y de igual manera permiten predecir el comportamiento del sistema en caso de una implementación en laboratorio.

Las variables fijas son los valores de la potencia de transmisión y de la longitud de onda de trabajo, por otro lado, la variable independiente que se modificará para analizar los resultados es la velocidad de transmisión de cada canal, a fin de poder determinar cómo se degrada el comportamiento del sistema al aumentar este parámetro e identificar la velocidad de transmisión máxima alcanzada por el sistema multiplexado.

Para ello se debe simular un sistema MUX/DEMUX OTDM y en este capítulo se presenta los elementos necesarios para llevar a cabo la simulación. En primer lugar, se definen las etapas de la simulación que son: generador de señales, multiplexor y demultiplexor. Para cada una de las etapas se define un diagrama de bloques el cual permite comprender qué bloques serán necesarios para poder simular cada etapa.

Posteriormente, una vez que se determinan los bloques necesarios y haciendo uso de las librerías del software OptiSystem, se seleccionan los bloques del software OptiSystem que serán de utilidad para la simulación; en cada uno de estos bloques se detalla su simbología, su función dentro del sistema y también la configuración necesaria para los fines del estudio.

2.1 ETAPAS DEL SISTEMA OTDM A SIMULARSE

2.1.1 GENERADOR DE SEÑALES

Para el transmisor es necesario simular los cuatro canales a multiplexarse. A continuación, en la Figura 2.1 se muestra el diagrama de bloques de cómo está conformada la señal de cada canal, en la que se observa un generador de bits aleatorios y un codificador con retorno a cero (RZ, *Return to Zero*), cuya salida constituye la señal eléctrica modulante que ingresará al modulador externo MZ conjuntamente con la portadora óptica que entrega la fuente láser, y a la salida de este modulador se tiene la señal óptica que se multiplexará.

De igual manera se conforman las otras 3 señales correspondientes a los otros canales a ser multiplexados.

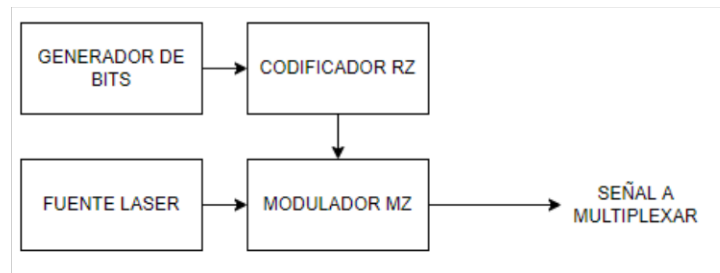


Figura 2.1. Diagrama de bloques para la generación de señales de cada canal.

Los bloques de la Figura 2.1 y su configuración son explicados en la sección 2.2.2.

2.1.2 MULTIPLEXOR

Para conformar el multiplexor OTDM es necesario utilizar retardos de tiempo y un combinador de potencia, este último es el encargado de intercalar en el tiempo las señales de los 4 canales a multiplexarse, por tanto, el número de puertos de entrada del combinador de potencia debe ser igual al número de señales a multiplexarse. El diagrama de bloques del multiplexor OTDM se puede apreciar en la Figura 2.2.

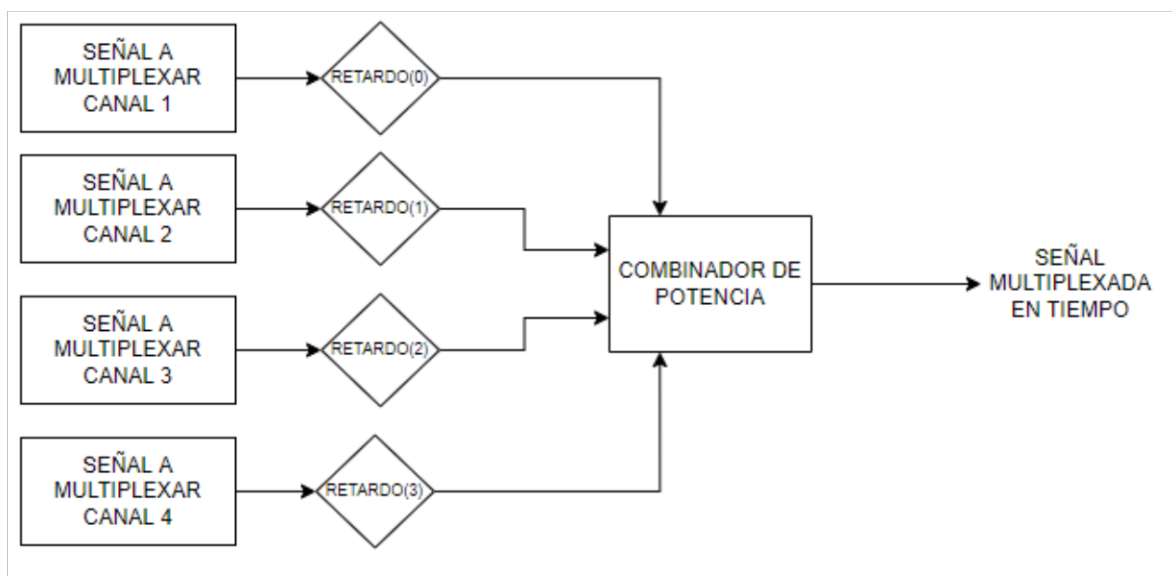


Figura 2.2. Diagrama de bloques del multiplexor OTDM.

El retardo de tiempo es la parte fundamental para multiplexar las 4 señales en tiempo asignándoles a cada una de ellas un intervalo (*slot*) de tiempo distinto y dependerá del número de canales totales a multiplexar que se tenga en transmisión, ya que es necesario

dividir el tiempo de bit del sistema (inverso de la velocidad de transmisión) para el número de canales totales, que para el presente estudio es 4, y luego multiplicar por el *slot* de tiempo empezando desde el 0 para el primer retardo, 1 para el segundo retardo y así sucesivamente para los siguientes retardos de tiempo. La expresión para asignar cada retardo de tiempo viene dada por la Ecuación (2.1).

$$retardo(i) = \frac{1}{V_{TX}} * \frac{i}{N} \quad (2.1)$$

Donde:

$i=0,1,2, N-1$

N = Número de canales a multiplexar.

V_{TX} = Velocidad de transmisión del sistema.

Para entender de mejor manera, se presenta un ejemplo práctico con las siguientes condiciones: $V_{TX} = 10 \text{ Gbps}$ y, tomando en cuenta que para este estudio se multiplexan 4 canales, $N = 4$. Se obtienen los siguientes resultados de retardos de tiempo para cada canal:

- Para el primer canal: $retardo(0) = \frac{1}{10\text{Gbps}} * \frac{0}{4} = 0 \text{ ps}$
- Para el segundo canal: $retardo(1) = \frac{1}{10\text{Gbps}} * \frac{1}{4} = 25 \text{ ps}$
- Para el tercer canal: $retardo(2) = \frac{1}{10\text{Gbps}} * \frac{2}{4} = 50 \text{ ps}$
- Para el cuarto canal: $retardo(3) = \frac{1}{10\text{Gbps}} * \frac{3}{4} = 75 \text{ ps}$

Para este ejemplo práctico se tiene un tiempo de bit de 100 ps , con los resultados se puede determinar que, los bits del primer canal no sufren un retardo al ingresar al combinador, por otro lado los bits del segundo, tercero y cuarto canal, tienen retardos de 25 ps , 50 ps y 75 ps respectivamente, permitiendo así que los bits de cada canal tengan su *slot* de tiempo correspondiente en la señal multiplexada.

Es conveniente precisar que se hace un entrelazado bit a bit, esto se aprecia al momento de analizar los resultados de la simulación.

Los bloques de la Figura 2.2 y su configuración son explicados en la sección 2.2.3.

2.1.3 DEMULTIPLEXOR

En el demultiplexor es necesario un splitter de potencia con 4 puertos de salida, mismo que recibe la señal multiplexada y la dividirá (separará) para cada canal; en cada puerto de salida del splitter se utiliza nuevamente un retardo de tiempo cuyo valor será el mismo presentado en la Ecuación (2.1, pero con signo negativo ya que esto permite recuperar la señal del canal deseado. Adicionalmente, es necesario utilizar una señal de reloj (tren de pulsos) a la misma velocidad de transmisión del sistema con codificación RZ, estos elementos sirven para el sincronismo del sistema y la recuperación de la señal. Finalmente, la señal de reloj codificada y la señal obtenida luego del retardo ingresan al modulador externo MZ para así poder obtener la señal demultiplexada del canal deseado. El diagrama de bloques, para la demultiplexación del canal tres, se puede apreciar en la Figura 2.3.

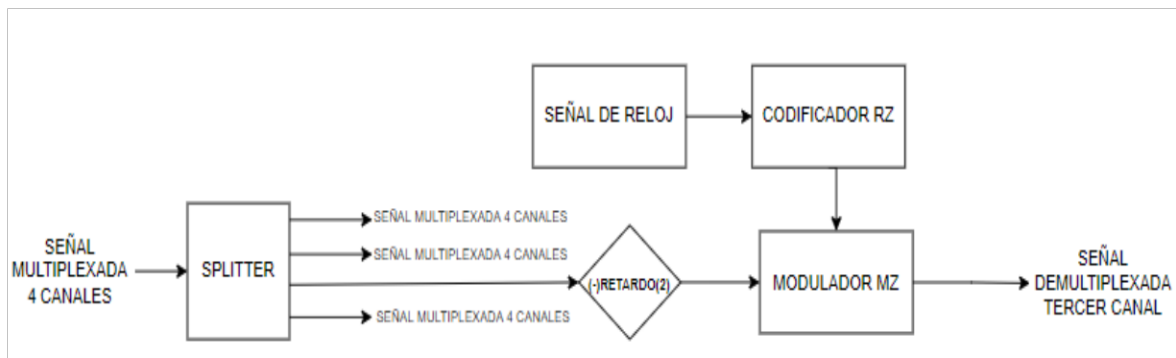


Figura 2.3. Diagrama de bloques demultiplexor.

Una vez que se haya demultiplexado y obtenido la señal del canal deseado, se recupera la señal eléctrica para poder utilizar los visualizadores de OptiSystem, el software cuenta con visualizadores para el dominio eléctrico y óptico que son utilizados en la simulación según sean necesarios. Para obtener la señal eléctrica se ha decidido utilizar el detector de luz PIN ya que su responsividad y tiempo de respuesta son adecuados para los propósitos de este estudio [1].

Los bloques de la Figura 2.3 y su configuración son explicados en la sección 2.2.4.

2.2 SIMULACIÓN EN OPTISYSTEM DEL SISTEMA OTDM

2.2.1 SOFTWARE OPTISYSTEM

Para el presente Trabajo de Integración Curricular se hace uso de la versión demo del Software OptiSystem, ya que cuenta con las herramientas necesarias para poder realizar el estudio propuesto. Este software presenta los siguientes beneficios:

- Proporciona información global sobre el rendimiento del sistema [10].
- Evalúa las sensibilidades de los parámetros ayudando a las especificaciones de tolerancia de diseño [10].
- Ofrece acceso directo a amplios conjuntos de datos de caracterización del sistema [10].

2.2.1.1 Requerimientos de hardware y software

OptiSystem requiere la siguiente configuración de sistema mínima/recomendada:

- Configuración mínima de PC: PC con procesador Pentium (E6, Serie G) o equivalente [10].
- 8G GB de RAM [10].
- Configuración de PC recomendada: PC con una velocidad de reloj mayor a 2 GHz con 2-4 núcleos (p. Ej., Intel i7 3rd / 4th Gen, AMD Athlon / Athlon II) y 8 GB de RAM [10].
- Sistemas operativos: Microsoft Windows 8.1 / 10 (64 bits) [10].
- 1,5 GB de espacio libre en el disco duro [10].
- Resolución gráfica de 1024 x 1024 [10].

2.2.1.2 Interfaz gráfica de usuario OptiSystem

El software OptiSystem tiene la interfaz de gráfica de usuario que se presenta a continuación en la Figura 2.4.

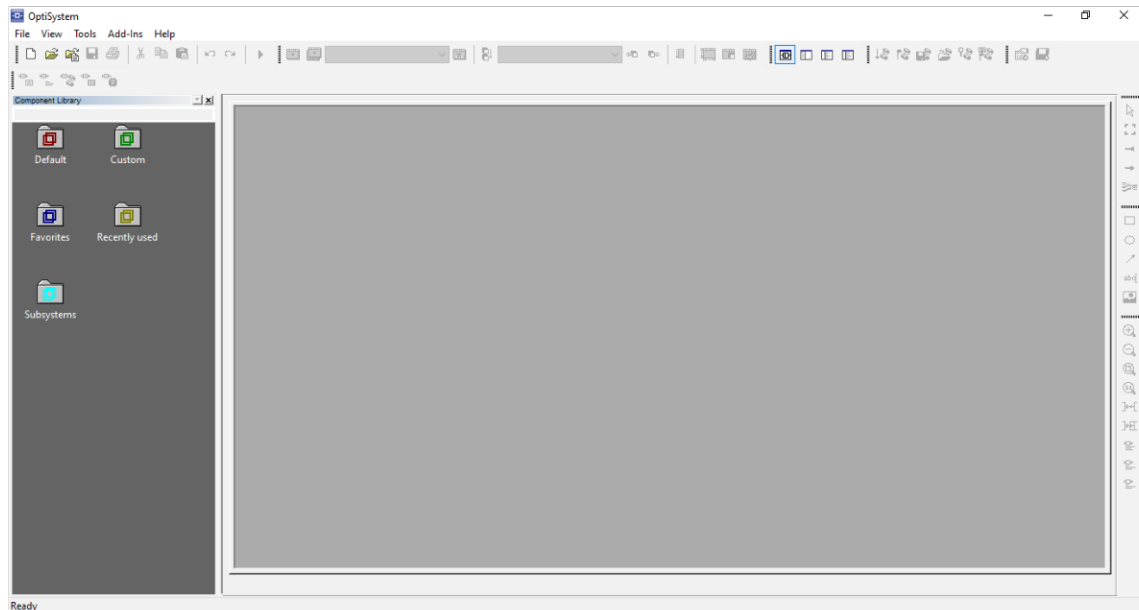


Figura 2.4. Interfaz gráfica de usuario de OptiSystem

2.2.1.3 Principales componentes de la interfaz gráfica de usuario de OptiSystem

Project Layout. – Es el área de trabajo donde se puede agregar los bloques necesarios para el diseño que se desee realizar y también para editar los mismos, ver Figura 2.5.

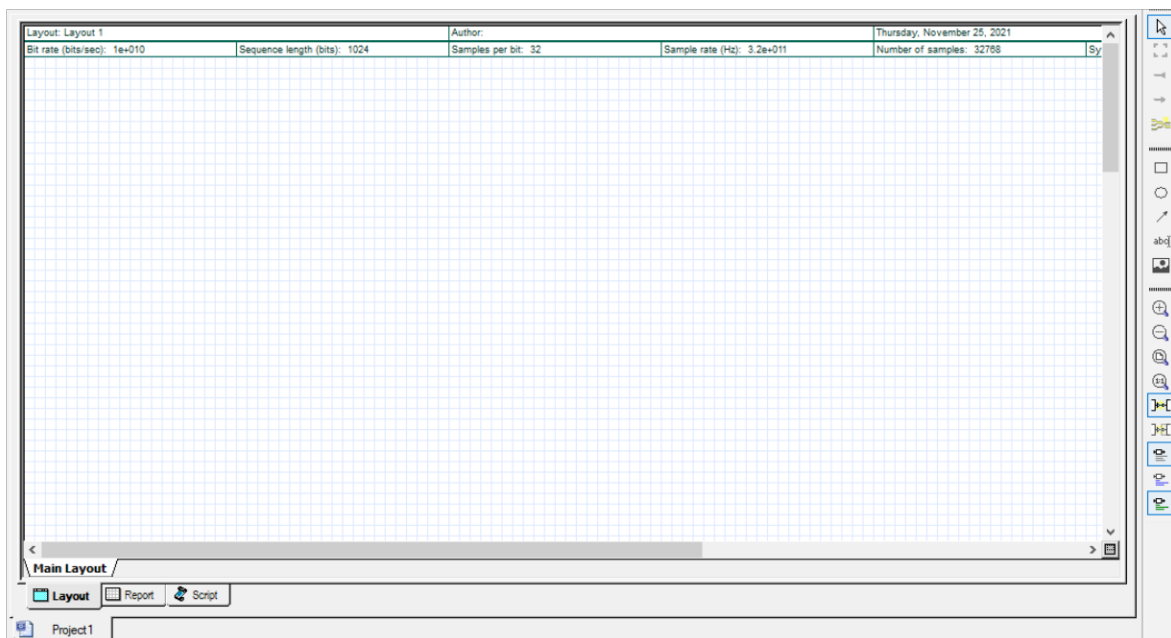


Figura 2.5. Project Layout.

Component library. – Contiene las librerías con los componentes necesarios para el diseño de sistemas, ver Figura 2.6.

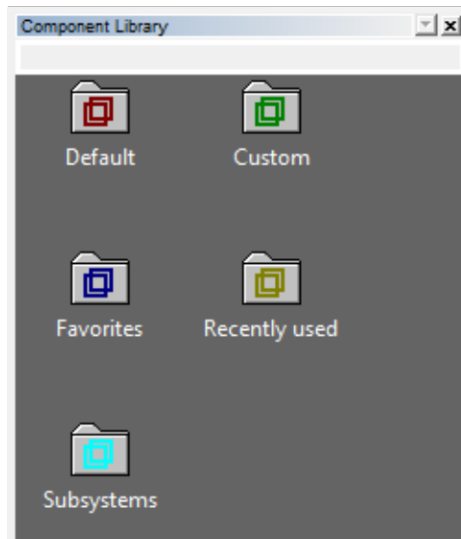


Figura 2.6. *Component Library.*

2.2.2 SIMULACIÓN DEL GENERADOR DE SEÑALES

Para la simulación de la generación de señales se hace uso de los siguientes bloques de las librerías de OptiSystem:

- Fuente láser. – Se utiliza el bloque *CW Laser* (ver Figura 2.7), este bloque genera una señal óptica de onda continua. Para el presente estudio se ha determinado que se trabajará en banda C con una longitud de onda de 1550 nm, ya que es una de las bandas más usadas en las comunicaciones ópticas, y con una potencia de 0 dBm, el cual es un valor típico con el que se trabaja en los sistemas de comunicación ópticos. Estos son los parámetros principales a configurarse, los demás parámetros se los dejan en sus valores por *default* para fines de la simulación; en la Figura 2.8 se visualiza los parámetros configurados.



Figura 2.7. *CW Laser.*

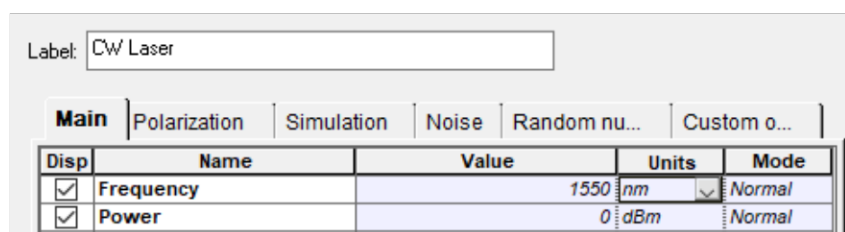


Figura 2.8. Parámetros configurados de CW Laser.

- Generador de bits. – Para generar los bits a transmitirse se utiliza el bloque *Pseudo-Random Bit Sequence Generator* (ver Figura 2.9), este genera bits aleatoriamente a la velocidad de transmisión que esté configurada en el sistema. A este bloque se le dejan los valores por *default* del simulador.

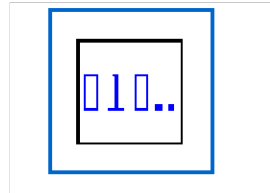


Figura 2.9. *Pseudo-Random Bit Sequence Generator.*

- Codificador RZ. – Para la codificación de la señal se utiliza el bloque *RZ Pulse Generator* (ver Figura 2.10), este formato se lo escoge debido a que se hace un entrelazado bit a bit y en OTDM es necesario tener pulsos pequeños de tal manera que los bits no se interfieran entre sí. Se configura el bloque para que entregue una señal unipolar cuyo valor máximo de amplitud es 1 y el mínimo es 0. El ciclo de trabajo o *duty cycle* se lo configura con un valor de 0.2, es decir el 20% del tiempo de bit. Esto debido a que todo el tiempo de bit está dividido para los 4 canales, es decir, que para este caso cada canal puede ocupar hasta el 25% del tiempo de bit, pero para que el entrelazado de bits se aprecie de mejor manera se ha decidido dejarlo en 20%. Los parámetros configurados se muestran en la Figura 2.11.

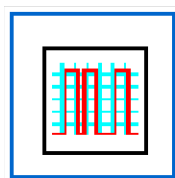


Figura 2.10. *RZ Pulse Generator.*

Label: RZ Pulse Generator

Main | Simulation | Custom order

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Rectangle shape	Exponential		Normal
<input type="checkbox"/>	Format for pulse range	Min/Max		Normal
<input type="checkbox"/>	Maximum		1 a.u.	Normal
<input type="checkbox"/>	Minimum		0 a.u.	Normal
<input type="checkbox"/>	Amplitude (wrt DC)		1 a.u.	Normal
<input type="checkbox"/>	DC bias		0 a.u.	Normal
<input type="checkbox"/>	Duty cycle		0.2 bit	Normal

Figura 2.11. Parámetros configurados en el codificador RZ.

- Modulador MZ. – Se utiliza modulación externa y para ello se hace uso del bloque *MZ Modulator Analytical* (ver Figura 2.12), este bloque es el encargado de recibir la señal eléctrica modulante del codificador RZ y la portadora óptica del láser, para generar la señal óptica modulada que se multiplexará posteriormente. Este bloque tiene su configuración por *default*.



Figura 2.12. *MZ Modulator Analytical*.

Para finalizar esta sección se presenta en la Figura 2.13 la disposición de los bloques para simular la generación de las 4 señales necesarias para el estudio.

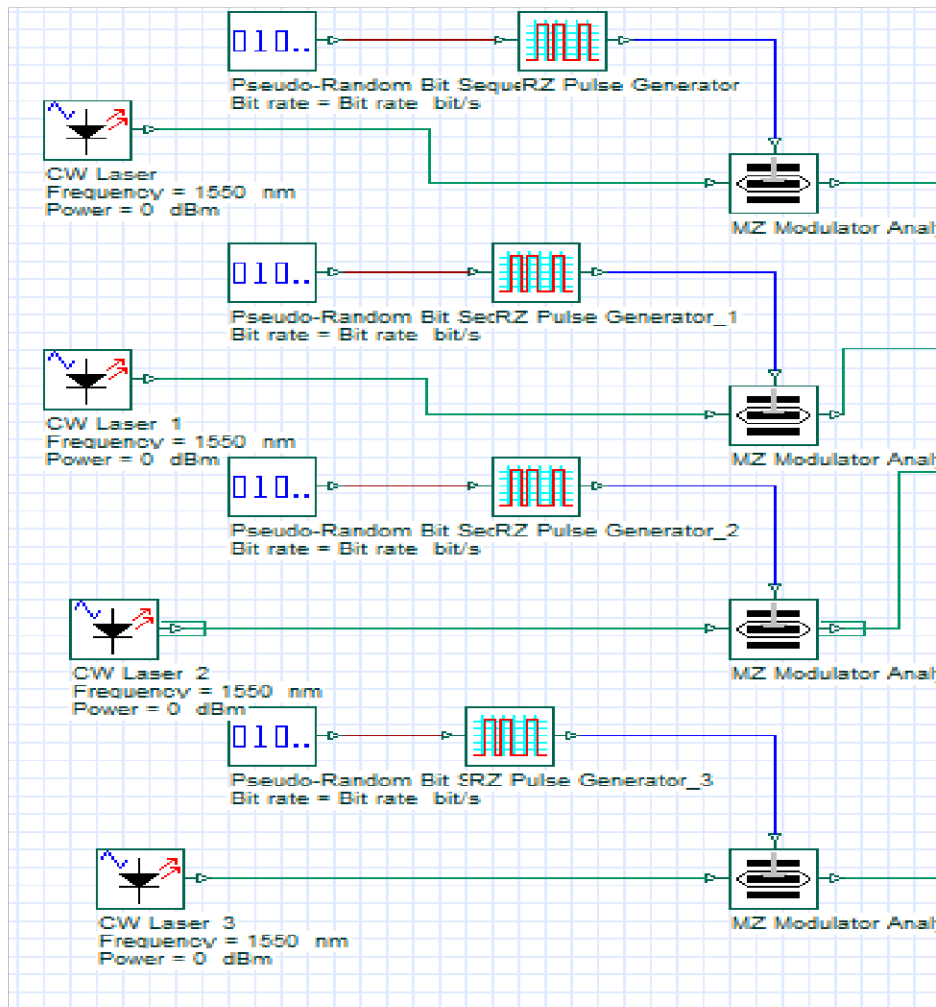


Figura 2.13. Bloques para generar 4 señales.

2.2.3 SIMULACIÓN DEL MULTIPLEXOR

A continuación, se describen los bloques de OptiSystem utilizados para simular el multiplexor y los parámetros que se configuraron.

- Retardo de tiempo. – Se usa el bloque *Time Delay* (ver Figura 2.14) que es el encargado de agregar un retardo de tiempo a la señal óptica de cada canal, este bloque debe configurarse de acuerdo a lo explicado anteriormente en la sección 2.1.2, en la Figura 2.15 se puede visualizar la configuración del valor de retardo de tiempo para el segundo canal.



Figura 2.14. *Time Delay*.

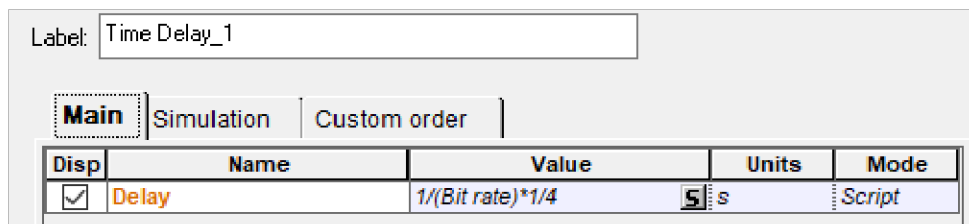


Figura 2.15. Parámetros configurados en el bloque *Time Delay* para el segundo canal.

- Combinador de potencia. – Se utiliza el bloque *Power Combiner 4x1* (ver Figura 2.16), mismo que permite unir las señales de los cuatro canales, para realizar el multiplexado temporal. A este bloque no se le cambia ningún parámetro y se lo deja con su configuración por *default*.

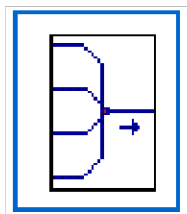


Figura 2.16. *Power Combiner 4x1*.

Finalmente, se presenta en la Figura 2.17 los bloques para multiplexar la señal de los 4 canales generados en la sección 2.2.2.

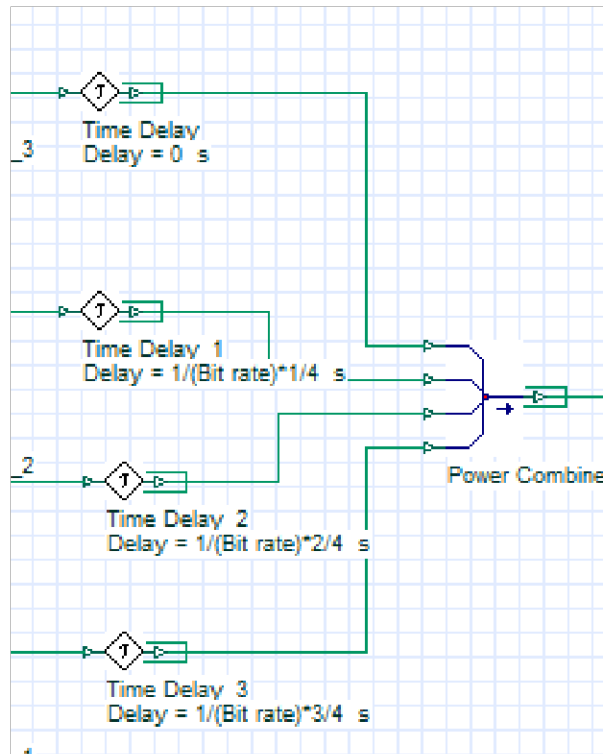


Figura 2.17. Multiplexor de 4 señales.

2.2.4 SIMULACIÓN DEL DEMULTIPLEXOR

Es necesario aclarar que no se incluye un canal de transmisión en las simulaciones debido a que este trabajo se enfoca en la multiplexación y demultiplexación de las señales OTDM. Sin embargo, se hicieron simulaciones para comparar los resultados y verificar si existe una diferencia significativa entre simular un canal de transmisión ideal y una conexión *back-to-back*, los resultados se presentan en la sección 3.1.4.

Finalmente, en la etapa del receptor se utilizan los bloques de OptiSystem descritos a continuación.

- Splitter. – Para simular el *splitter* se utiliza el bloque *Power Splitter 1x4* (ver Figura 2.18), que se encarga de dividir la señal de entrada óptica (señal multiplexada) en cuatro señales de salida. La potencia de cada señal de salida está determinada por el parámetro *Power ratio array* (ver Figura 2.19) que se lo deja en su configuración por *default* (1 1 1 1), esto quiere decir que cada puerto de salida tiene el 25% de potencia con respecto a la de la señal de entrada.

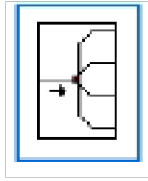


Figura 2.18. *Power Splitter 1x4.*

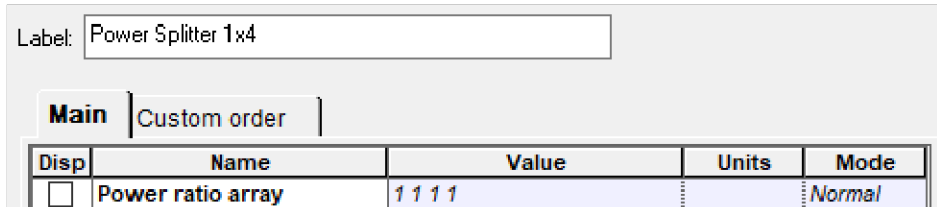


Figura 2.19. Configuración por *default* del bloque *Power Splitter 1x4*.

- Retardos de tiempo. – Este bloque es igual al de la etapa del multiplexor y tiene el mismo funcionamiento, con la diferencia de que es necesario incluir el signo menos en el valor del retardo para poder recuperar la señal del canal deseado, en la Figura 2.20 se puede observar cómo se lo configura para recuperar la señal del segundo canal.

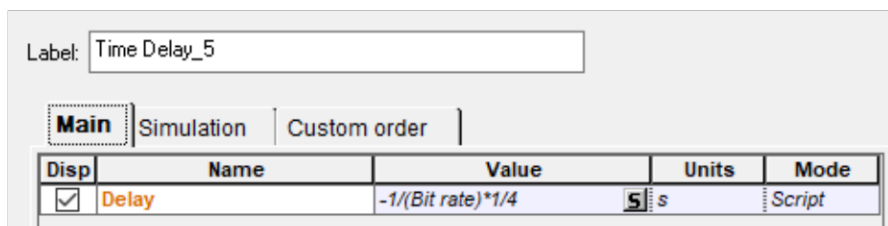


Figura 2.20. Configuración del retardo de tiempo en el demultiplexor para el segundo canal.

- Señal de reloj. – Para la señal de reloj es necesario ocupar el bloque *Pseudo-Random Bit Sequence Generator* explicado anteriormente, para poder utilizarlo como señal de reloj es necesario modificar la configuración del modo de operación (*Operation Mode*) y configurarlo como *ONES*, lo que permite tener la señal de reloj deseada a la misma velocidad de transmisión que el sistema. La configuración de este bloque se puede apreciar en Figura 2.21.

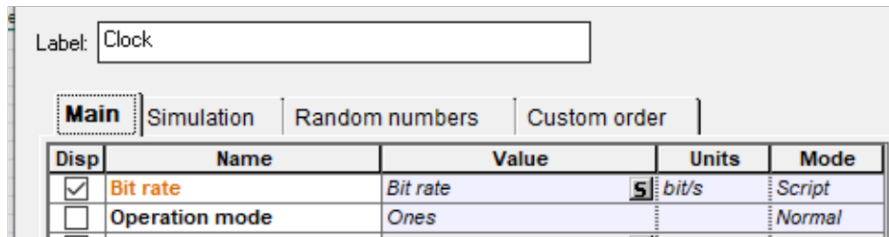


Figura 2.21. Configuración de la señal de reloj.

- Codificador RZ. – Se hace uso del mismo bloque y configuración que fue explicado en la sección 2.2.2.
- Modulador MZ. – Se utilizará modulación externa y para ello se usa el bloque *MZ Modulator Analytical* (ver Figura 2.12), este bloque es el encargado de recibir la señal de reloj codificada en RZ y la señal óptica a la salida del retardador, con ello a la salida de este modulador se recupera la señal del canal deseado. Este bloque tiene su configuración por *default*.

De igual manera en esta sección se muestra en la Figura 2.22 cómo fueron ubicados los bloques en el simulador para obtener la señal demultiplexada, teniendo en cuenta que únicamente se recuperará la señal del tercer canal.

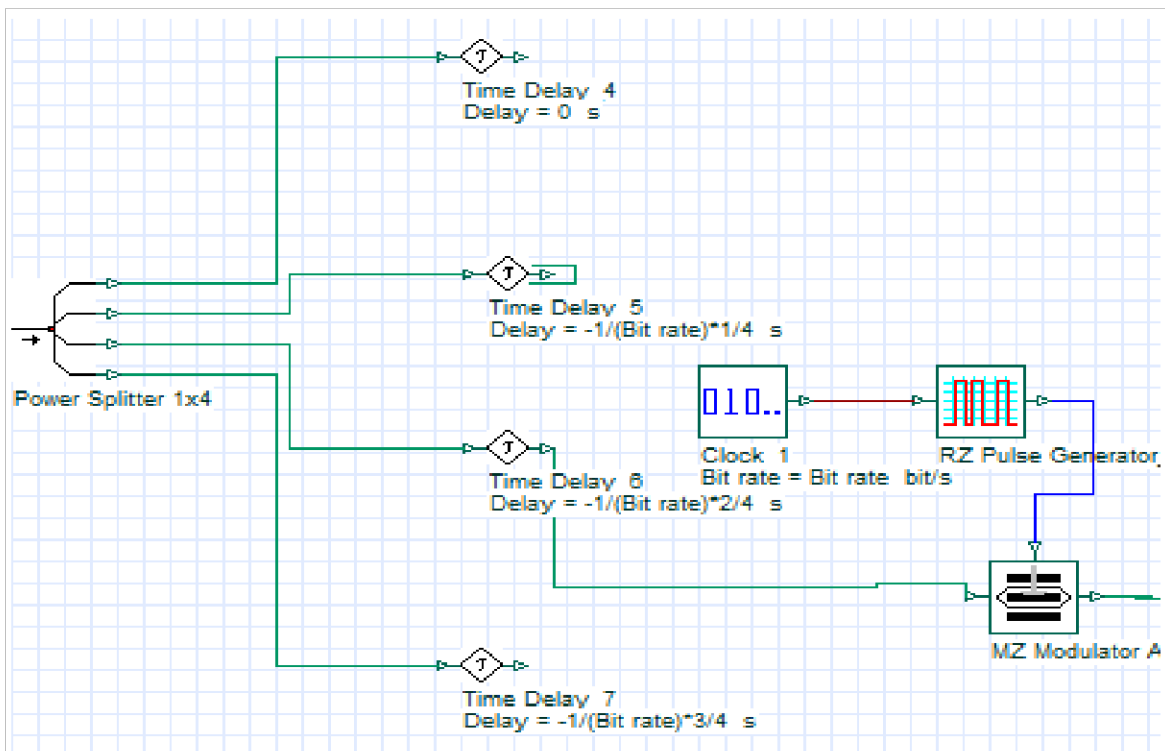


Figura 2.22. Bloques utilizados para demultiplexar y recuperar la señal del tercer canal.

2.2.5 CONVERSIÓN O/E DE LA SEÑAL DEMULTIPLEXADA

Con el fin de poder obtener los valores del BER con las distintas velocidades de transmisión, es necesario que la señal demultiplexada que está en el dominio óptico sea convertida a una señal eléctrica (conversión O/E). Con este propósito se utilizan los bloques detallados a continuación.

- Fotodetector. – Se usa el bloque *Photodiode PIN* (ver Figura 2.23), que corresponde a un detector PIN que tiene la función de convertir una señal óptica de entrada en una corriente eléctrica de salida de acuerdo a su responsividad (conversión O/E). Este bloque tiene su configuración por *default*, en esta configuración el software determina una responsividad de 1 A/W que es un valor ideal, pero que resulta adecuado para los fines del estudio.

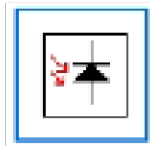


Figura 2.23. *Photodiode PIN*.

- Filtro pasa-bajos. – Se utiliza el bloque *Low Pass Bessel Filter* (ver Figura 2.24), para eliminar las componentes no deseadas de la señal eléctrica y su frecuencia de corte se escoge igual a $\frac{3}{4}$ la velocidad de transmisión, que para fines del estudio es suficiente ya que con esa configuración pasa $\frac{3}{2}$ del ancho de banda de la señal original. La configuración se puede apreciar en la Figura 2.25.

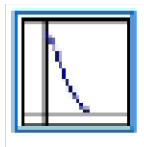


Figura 2.24. *Low Pass Bessel Filter*.

Label:

Main | Simulation | Custom order

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff frequency	0.75 * Bit rate	5 Hz	Script

Figura 2.25. Configuración del filtro pasa-bajos.

- Regenerador de señal. – El bloque a utilizarse es el *3R Regenerator* (ver Figura 2.26), que permite regenerar una señal eléctrica. Se encarga de generar la

secuencia de bits original (señal correspondiente a la del Generador de bits en el transmisor) y la señal eléctrica (correspondiente a la señal luego del codificador RZ en el transmisor) que se utilizará para el análisis del BER. Además, permite recuperar la señal de reloj. La configuración de este bloque se lo deja por *default*.

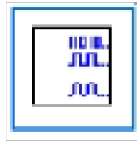


Figura 2.26. 3R Regenerator.

- Visualizador de diagrama de ojo. – El bloque de la librería es el *Eye Diagram Analyzer* (ver Figura 2.27), este visualizador calcula y muestra automáticamente el diagrama de ojo de la señal eléctrica. También calcula otros parámetros tales como: factor Q, BER, la apertura del ojo y la altura del ojo. No es necesario modificar la configuración que viene por *default*. Este visualizador se lo conecta al 3R Regenerator para analizar la señal demultiplexada del tercer canal.



Figura 2.27. Eye Diagram Analyzer.

En la Figura 2.28 se muestra cómo fueron colocados en el simulador los bloques mencionados en esta sección.

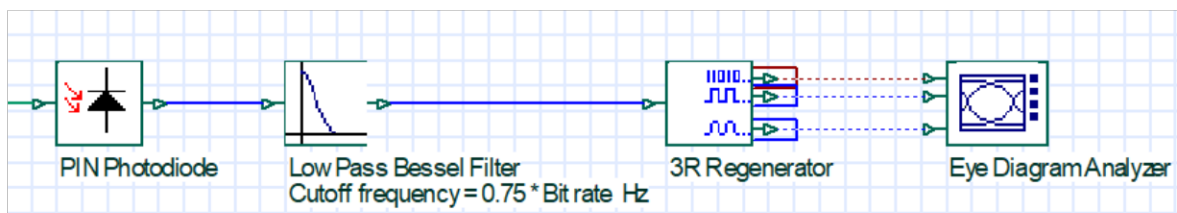


Figura 2.28. Bloques utilizados para obtener y analizar la señal eléctrica.

Por último, en la Figura I.1 del ANEXO I “Sistema MUX/DEMUX OTDM simulado”, se aprecia el diagrama completo del sistema OTDM a simularse con 4 canales en transmisión que son multiplexados en tiempo y la recuperación en recepción de la señal del tercer canal.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, en este capítulo se presentan y discuten los resultados de las simulaciones realizadas al sistema OTDM, a diferentes velocidades de transmisión y en una conexión *back-to-back*, mientras que los valores de la potencia de transmisión y la longitud de onda de operación permanecieron fijos. Por último, luego del respectivo análisis de los resultados se determinaron las conclusiones y recomendaciones para el presente Trabajo de Integración Curricular.

3.1 RESULTADOS

3.1.1 GENERACIÓN DE BITS

Para poder observar los bits de cada señal a multiplexarse, se utilizó el bloque *Oscilloscope Visualizer*, mismo que se colocó a la salida del codificador RZ en la generación de las señales. A manera de ejemplo en la Figura 3.1 se muestra el uso de este bloque para visualizar la primera señal, lo mismo se repitió para cada señal generada.

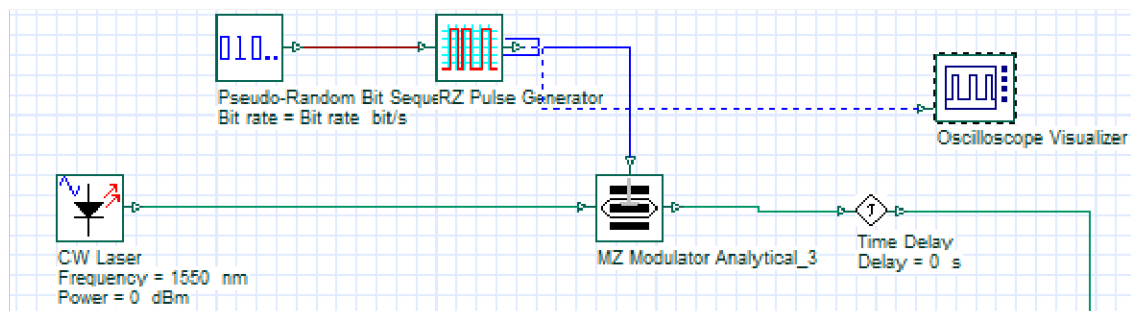


Figura 3.1. Bits generados observados con el *Oscilloscope Visualizer*.

De tal forma que se pueda luego apreciar el entrelazado de bits, se realizó una simulación con una secuencia de 4 bits para cada canal y con una velocidad de transmisión de 10 Gbps, estas condiciones fueron tomadas únicamente para esta sección ya que posteriormente para poder obtener resultados de BER fue necesario transmitir una mayor cantidad de bits.

A continuación, se presentan los resultados en los osciloscopios de cada canal, tomando en cuenta que la codificación RZ fue configurada con un ciclo de trabajo de 20% del tiempo de bit, lo que corresponde a un RZ al 20%.

- Bits en el primer canal. – Los bits que se obtuvieron en este canal fueron “0101” (ver Figura 3.2)

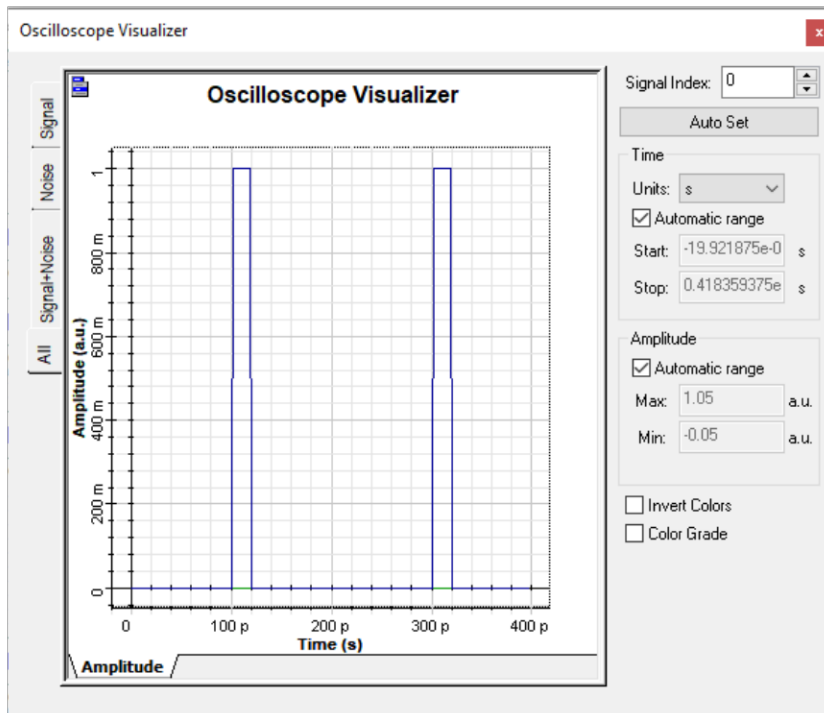


Figura 3.2. Bits transmitidos en el primer canal “0101”.

- Bits en el segundo canal. – Los bits que se obtuvieron en este canal fueron “1100” (ver Figura 3.3).

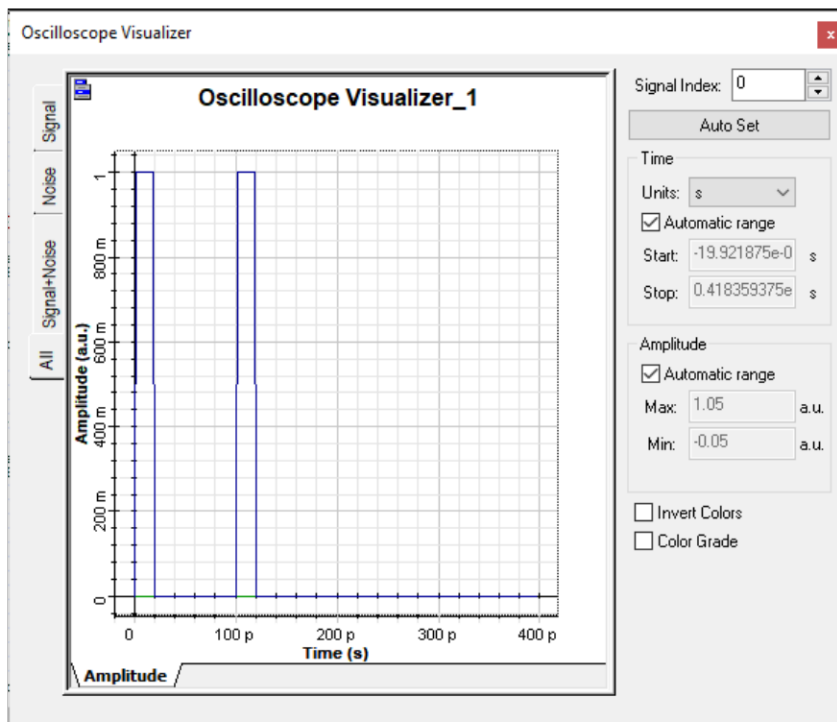


Figura 3.3. Bits transmitidos en el segundo canal “1100”.

- Bits en el tercer canal. – Los bits que se obtuvieron en este canal fueron “1011” (ver Figura 3.4).

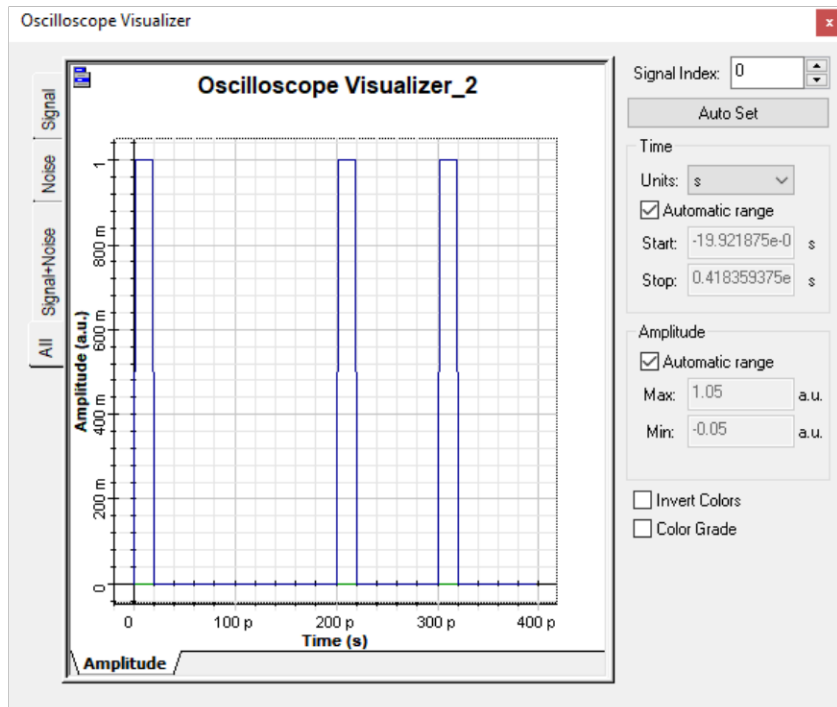


Figura 3.4. Bits transmitidos en el tercer canal “1011”.

- Bits en el cuarto canal. – Los bits que se obtuvieron en este canal fueron “1110” (ver Figura 3.5).

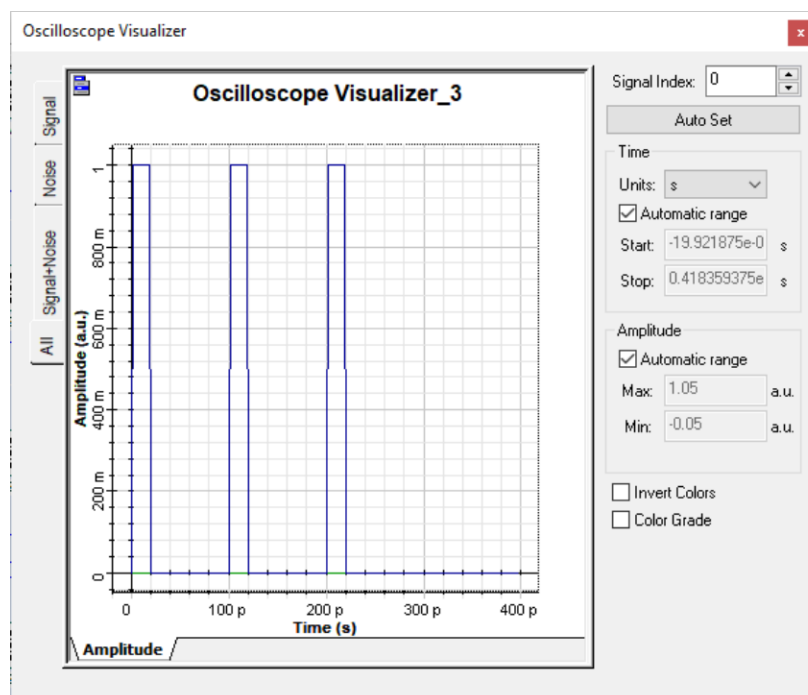


Figura 3.5. Bits transmitidos en el cuarto canal “1110”.

3.1.2 ENTRELAZADO DE BITS

Una vez que se obtuvo la señal de cada canal con su retardo correspondiente, las cuatro señales fueron enviadas al combinador de potencia y a la salida de este bloque se colocó el visualizador *Optical Time Domain Visualizer* (ver Figura 3.6), este visualizador permite observar cómo los bits de cada canal se entrelazan en tiempo para formar una sola señal óptica.

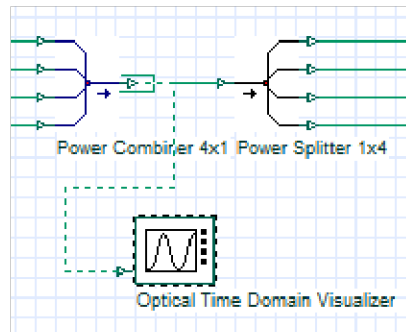


Figura 3.6. Visualizador *Optical Time Domain Visualizer*.

Al abrir el visualizador se observan los bits multiplexados en tiempo (ver Figura 3.7), analizando esta figura se determina que los bits procedentes de cada uno de los cuatro canales a multiplexarse que tienen un tiempo de bit de 100 ps, pasan a ocupar un *slot* de tiempo determinado dentro de la señal multiplexada donde cada bit de la señal multiplexada tiene un tiempo de bit de 25 ps. Obteniéndose la siguiente secuencia con 16 bits “0111110100111010”.

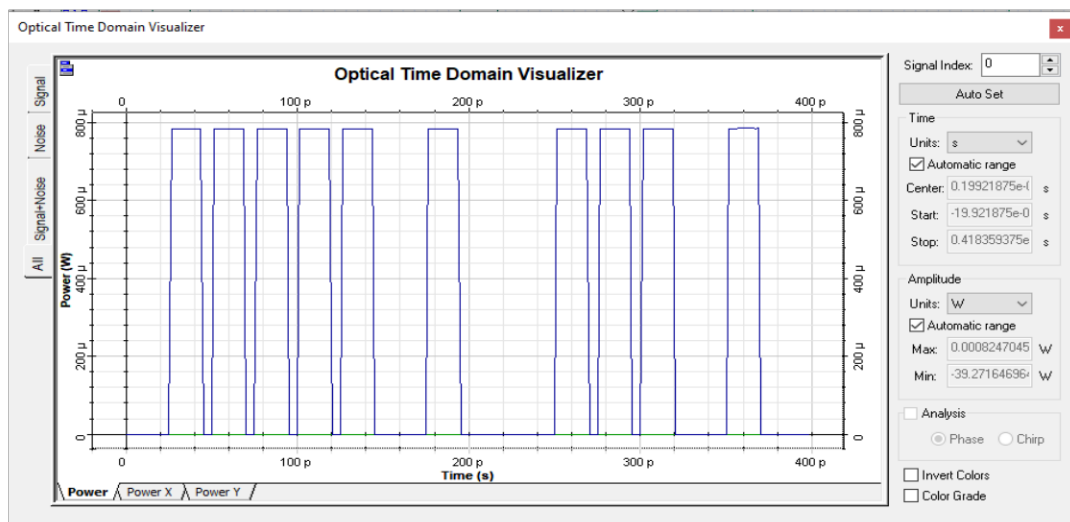


Figura 3.7. Bits de los cuatro canales multiplexados en tiempo.

Con el fin de poder identificar los bits, de forma demostrativa se ha asignado un color a los bits de cada canal, los bits del primer canal son de color amarillo, los bits del segundo canal

son de color verde, los bits del tercer canal son de color rojo y finalmente los bits del cuarto canal son de color celeste. Tomando en cuenta los bits que se transmitieron y fueron detallados en la sección 3.1.1, los bits del primer canal son “0101”, los bits del segundo canal son “1100”, los bits del tercer canal son “1011” y los bits del cuarto canal son “1110”. En la Figura 3.8 se puede observar cómo los bits ocupan su respectivo *slot* de tiempo para la multiplexación.



Figura 3.8. Bits de la señal multiplexada en tiempo “0111110100111010”.

3.1.3 RECUPERACIÓN (DEMÚLTIPLEXACIÓN) DE LA SEÑAL

Una vez obtenidos los resultados de la multiplexación, se procede a obtener los resultados para la recuperación (demultiplexación) de la señal del tercer canal, este canal fue escogido a manera de ejemplo para analizar la señal demultiplexada, debido a que la señal demultiplexada de los otros canales tiene un comportamiento similar.

Con la ayuda del bloque *Dual Port Oscilloscope Visualizer* se presenta la señal recuperada del tercer canal. Los dos puertos de este bloque fueron conectados a la salida del codificador RZ en la generación de señales en transmisión y a la salida del detector PIN en recepción para poder contrastar la señal enviada con la señal recibida. En la Figura 3.9 la señal que se observa en la parte superior es la del codificador RZ, mientras que la señal en la parte inferior es la señal recuperada a la salida del detector en donde se observa que hay un ruido agregado por el proceso de conversión O/E.

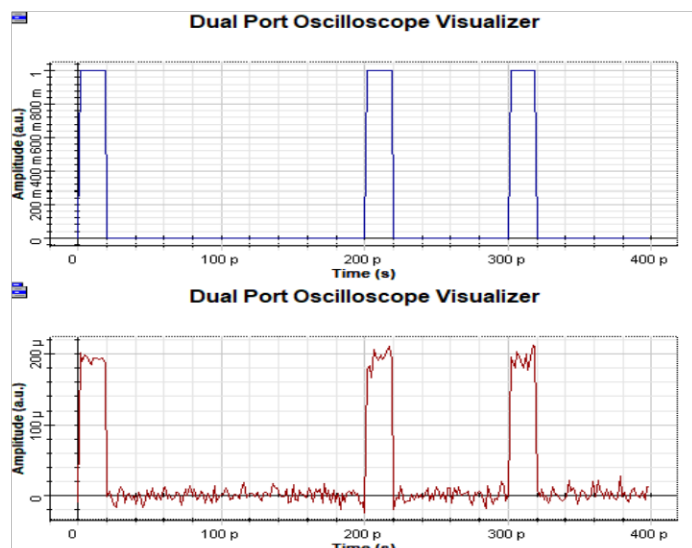


Figura 3.9. Señal original (gráfico superior) y señal recuperada (gráfico inferior) del canal tres.

Finalmente, para recuperación de la señal, se presenta en la Figura 3.10 la señal obtenida como resultado después de aplicar el filtro pasa-bajos a la señal entregada por el detector PIN del tercer canal. Esta señal es utilizada posteriormente para el análisis del BER y la obtención de los diagramas de ojo, pero considerando una secuencia de bits de mayor longitud para la señal de cada canal.

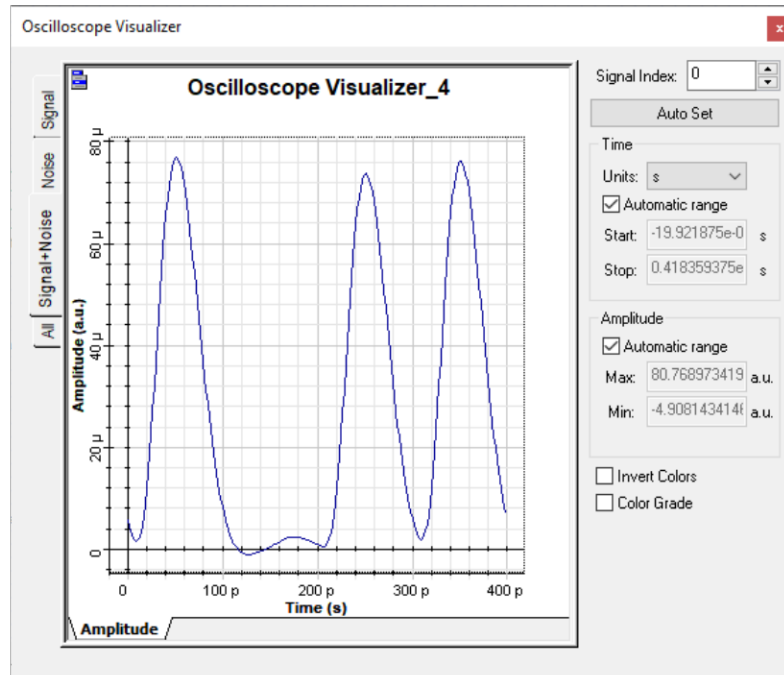


Figura 3.10. Señal del tercer canal luego de aplicar el filtro pasa-bajos.

3.1.4 SIMULACIONES OTDM CON DIFERENTES VELOCIDADES DE TRANSMISIÓN

Con el fin de obtener valores para el BER, se usó una secuencia de 8192 bits, que fueron suficientes para el estudio y para obtener resultados óptimos para el análisis posterior. A continuación, en la Figura 3.11 se puede observar la ventana *Layout Parameters*, en donde se modificaron los parámetros necesarios para esta sección, como lo son: longitud de la secuencia de bits (*sequence length*) que se utilizó y también la velocidad de transmisión (*bit rate*); en esta figura se muestra la configuración para la simulación con una velocidad de transmisión (*bit rate*) de 10 Gbps.

Cabe señalar que los parámetros de potencia y longitud de onda de operación se mantienen con los mismos valores para las diferentes velocidades de transmisión y corresponden a los indicados previamente en la sección 2.2.2.

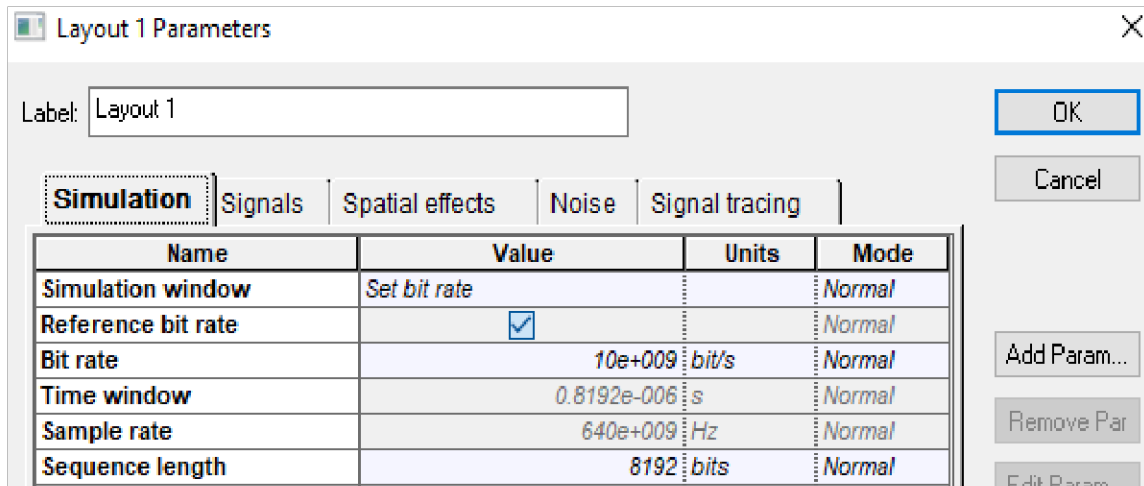


Figura 3.11. Velocidad de transmisión y secuencia de bits configurados.

Una vez que se realizó la simulación con 10 Gbps, se aumentó la velocidad de transmisión conforme se iban obteniendo datos para el análisis, de esta manera se realizaron simulaciones con las siguientes velocidades de transmisión: 30 Gbps, 50 Gbps, 100 Gbps, 150 Gbps, 200 Gbps, 250 Gbps, 300 Gbps y 350 Gbps.

Adicionalmente, para la velocidad de 10 Gbps se obtuvo el espectro óptico resultante de la señal correspondiente al tercer canal en transmisión y de la señal demultiplexada del mismo canal en recepción; lo mismo se realiza para la velocidad de 300 Gbps para la que aún se tiene un BER adecuado como se verá más adelante, posteriormente se compara con el espectro obtenido a la velocidad de 10 Gbps con el fin de asegurar que el espectro de la señal demultiplexada conserva la misma forma que el de la señal a multiplexarse a esta velocidad extrema, de tal manera que se corrobore el correcto funcionamiento del sistema. Por lo tanto, para las velocidades intermedias ya no se obtiene ni analiza el espectro óptico, tomando en cuenta que en las velocidades intermedias los resultados deberían ser similares. Además, en OTDM no es de vital importancia el análisis del espectro óptico, como sí lo es en las técnicas de multiplexación por longitud de onda.

En esta sección también se toma en cuenta que, la mayoría de los sistemas de comunicaciones ópticos especifican un BER de 10^{-9} como requisito operativo mínimo [10], lo que permitirá comparar el BER obtenido en cada caso con este valor referencial a fin de determinar si el comportamiento del sistema es adecuado en función de la velocidad de transmisión utilizada. Se hará uso del visualizador *Eye Diagram Analyzer*, para obtener el diagrama de ojo y el BER, mientras que para obtener el SNR se hará uso del bloque *Electrical Power Meter* que calcula la potencia de las señales eléctricas.

3.1.4.1 Simulación sistema OTDM para 10 Gbps

Los resultados de los visualizadores *Eye Diagram Analyzer* (BER) y *Electrical Power Meter* (SNR) al simular el sistema OTDM presentado en la Figura I.1 con una velocidad de transmisión de 10 Gbps, se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores de BER y SNR obtenidos de la simulación con $V_{TX} = 10 \text{ Gbps}$.

Parámetro	Valor
BER	3.48779×10^{-31}
SNR	27.949 dB

El valor del BER con una SNR de aproximadamente 28 dB es significativamente menor al mínimo recomendado, por lo que los resultados de BER para esa SNR son adecuados, de manera que se puede seguir incrementando la velocidad de transmisión. Además, con en el diagrama de ojo resultante en la Figura 3.12 se puede apreciar que la señal llega de buena manera al receptor ya que el ojo está bastante despejado, que se corresponde con el valor de BER obtenido; el diagrama de ojo tiene esa forma debido a que se utiliza la codificación RZ.

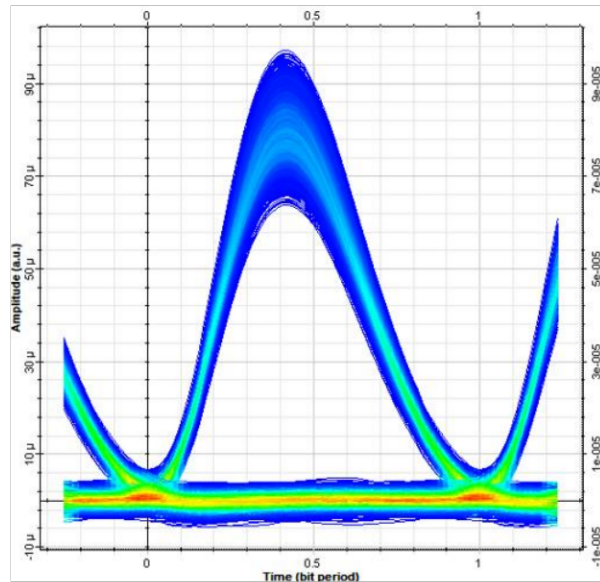


Figura 3.12. Diagrama de ojo para $V_{TX} = 10 \text{ Gbps}$.

Bajo estas condiciones y con la idea de probar el funcionamiento del sistema OTDM incluyendo un enlace de fibra entre el multiplexor y el demultiplexor, se hizo una simulación adicional agregando el bloque *Optical Fiber* (ver Figura 3.13) entre el combinador de potencia y el splitter para simular el canal de transmisión, este bloque fue configurado como

una fibra óptica ideal, es decir con un coeficiente de atenuación nulo y una dispersión nula, con una distancia de 50 km. Como resultado de la simulación se obtuvo un BER de 4.12856×10^{-31} , que corresponde a un valor muy cercano al BER obtenido conectando directamente el combinador de potencia y el splitter, es decir considerando una distancia nula para la fibra óptica, como se aprecia en la Figura I.1 del ANEXO I “Sistema MUX/DEMUX OTDM simulado”, por lo que se mantuvo la conexión *back-to-back* para el resto de las simulaciones. Todo esto con el propósito de enfocar el estudio exclusivamente en el análisis de la multiplexación y demultiplexación de la señal OTDM.

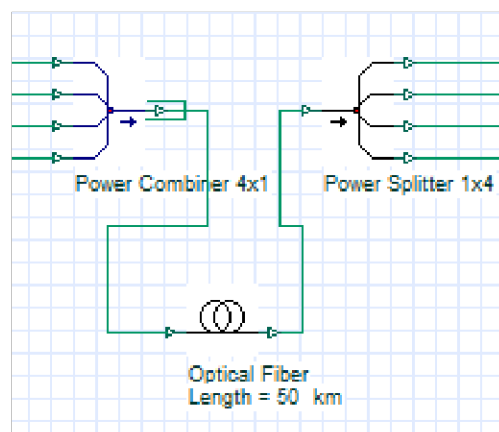


Figura 3.13. Bloque *Optical Fiber* agregado.

Por último, para esta velocidad de transmisión se analiza el espectro óptico de la señal a multiplexarse y de la señal demultiplexada, utilizando para el efecto el bloque *Dual Port Optical Spectrum Analyzer* (ver Figura 3.14); los dos puertos están conectados a la salida del modulador MZ en la etapa de generación de señales y a la salida del modulador MZ en la etapa del demultiplexor, de tal manera que se pueda comparar los espectros ópticos de la señal a ser multiplexada en transmisión y de la señal demultiplexada en recepción.

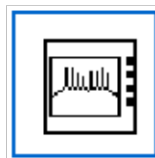


Figura 3.14. *Dual Port Optical Spectrum Analyzer*.

Este bloque arroja como resultado lo que se observa en la Figura 3.15, la señal roja corresponde a la señal generada en transmisión, mientras que la señal de color azul es la señal demultiplexada que se recupera en recepción y como se observa los espectros de ambas señales son similares con la única diferencia que la amplitud del espectro de la

señal demultiplexada es ligeramente inferior a la amplitud del espectro de la señal a multiplexarse de uno de los canales.

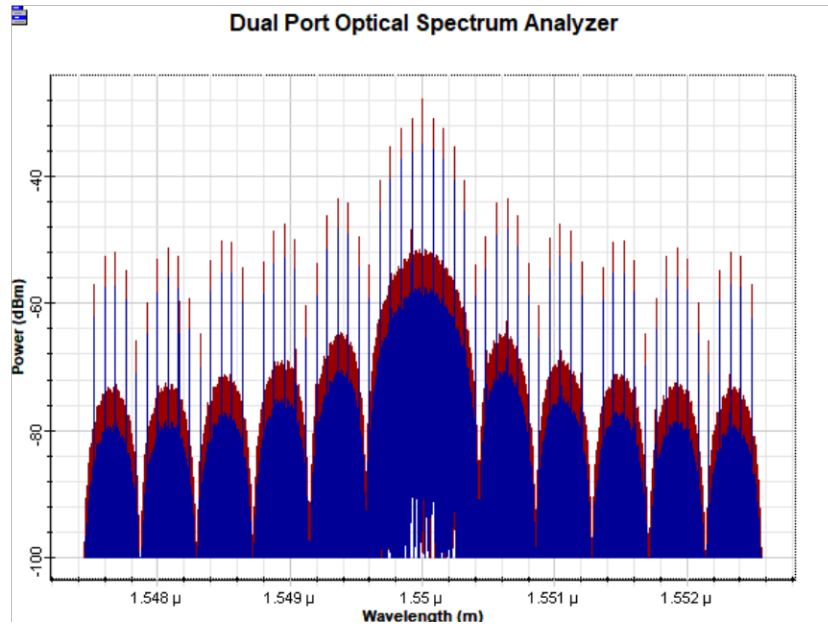


Figura 3.15. Espectro de la señal a multiplexarse (rojo) y espectro de la señal demultiplexada (azul) para $V_{TX} = 10 \text{ Gbps}$.

3.1.4.2 Simulación sistema OTDM para 30 Gbps

Al simular el sistema de la Figura I.1 aumentando la velocidad de transmisión a 30 Gbps, se obtuvieron los valores de BER y SNR presentados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Valores de BER y SNR obtenidos de la simulación con $V_{TX} = 30 \text{ Gbps}$.

Parámetro	Valor
BER	4.65751×10^{-28}
SNR	23.961 dB

Para esta velocidad de transmisión el BER sigue siendo óptimo, de igual manera el SNR, por lo que se puede continuar aumentando la velocidad de transmisión. El diagrama de ojo a esta velocidad se puede apreciar en la Figura 3.16, con un ojo bastante despejado similar al caso anterior.

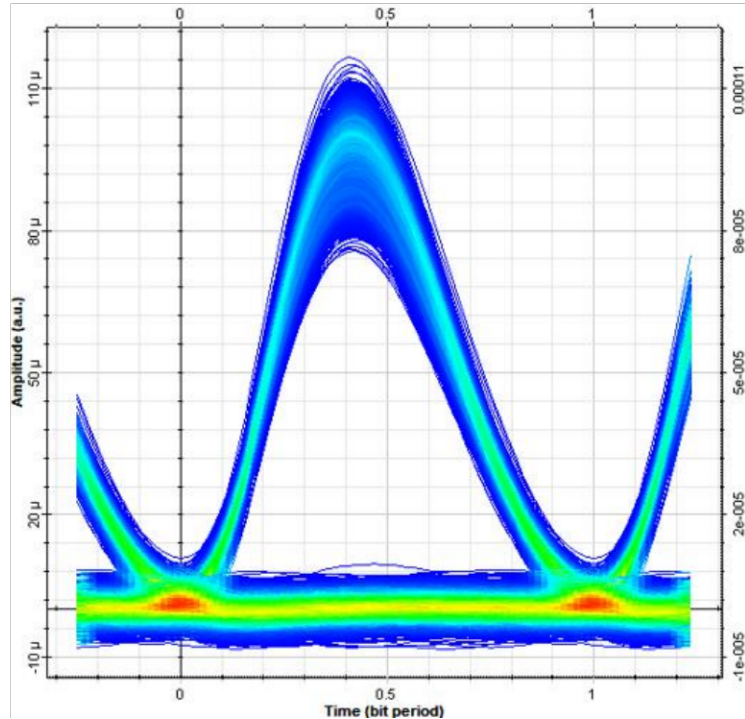


Figura 3.16. Diagrama de ojo para $V_{TX} = 30 \text{ Gbps}$.

3.1.4.3 Simulación sistema OTDM para 50 Gbps

Los valores de BER y SNR obtenidos a la velocidad de transmisión de 50 Gbps se los detalla en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Valores de BER y SNR obtenidos de la simulación con $V_{TX} = 50 \text{ Gbps}$.

Parámetro	Valor
BER	2.88564×10^{-26}
SNR	20.629 dB

Bajo estas condiciones aún se mantienen valores adecuados de BER y SNR, por lo que se duplicará esta velocidad en la próxima simulación para ver su comportamiento. En la Figura 3.17 se observa el diagrama de ojo resultante para la simulación con esta velocidad de transmisión en el que aún conserva buenas condiciones. Sin embargo, el ojo está ligeramente más cerrado en comparación con los diagramas de ojo anteriormente presentados.

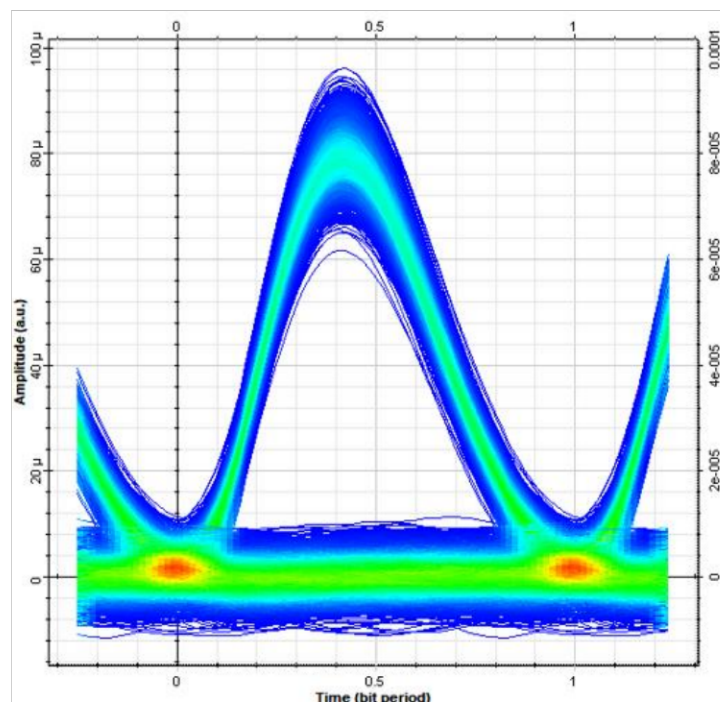


Figura 3.17. Diagrama de ojo para $V_{TX} = 50 \text{ Gbps}$.

3.1.4.4 Simulación sistema OTDM para 100 Gbps

En esta simulación los resultados que se obtuvieron para los valores de BER y SNR son aún bastante aceptables según las recomendaciones para los sistemas de comunicación ópticos, los valores obtenidos se observan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Valores de BER y SNR obtenidos de la simulación con $V_{TX} = 100 \text{ Gbps}$.

Parámetro	Valor
BER	2.30874×10^{-18}
SNR	17.819 dB

Si bien el BER es aún aceptable, el diagrama de ojo presentado en la Figura 3.18 ya no se observa muy despejado como en las simulaciones realizadas anteriormente, notándose mayor presencia de ISI² (*Intersymbol Interference*) y jitter³. Sin embargo, al tener todavía valores de BER permitidos se continuará simulando con velocidades de transmisión superiores. Cabe señalar que conforme se aumenta la velocidad se va cerrando el ojo, lo cual es de esperarse.

² La superposición de pulsos que representan bits adyacentes, lo que distorsiona la señal.

³ Es el término dado a la diferencia entre la temporización correcta de un bit recibido y la temporización detectada.

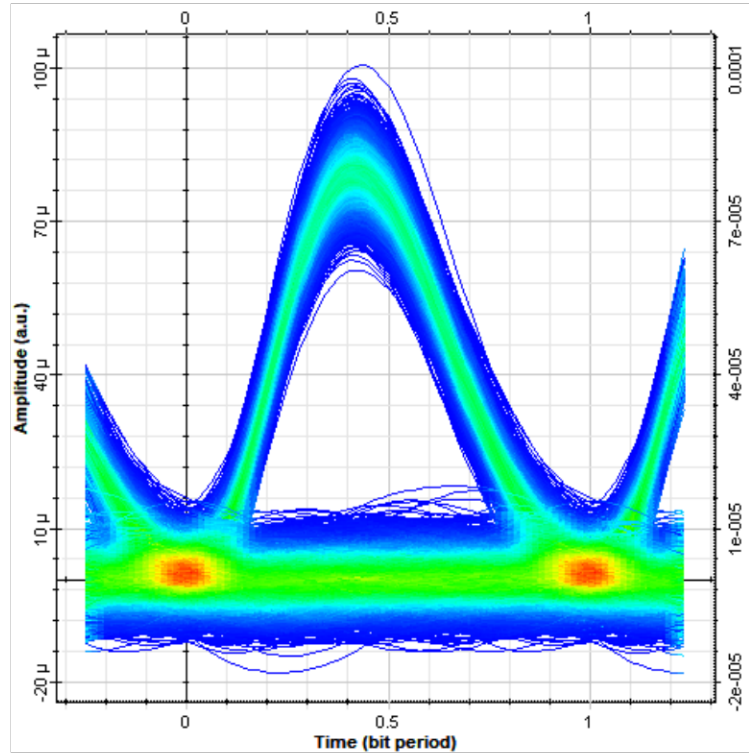


Figura 3.18. Diagrama de ojo para $V_{TX} = 100 \text{ Gbps}$.

3.1.4.5 Simulación sistema OTDM para 150 Gbps

Simulando el sistema OTDM a una velocidad de 150 Gbps se obtienen los resultados descritos en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Valores de BER y SNR obtenidos de la simulación con $V_{TX} = 150 \text{ Gbps}$.

Parámetro	Valor
BER	2.32203×10^{-16}
SNR	17.887 dB

Como se anticipó, al aumentar la velocidad de transmisión los valores del BER van aumentando y correspondientemente el SNR va disminuyendo; resultado de ello también el diagrama de ojo en la Figura 3.19 se va cerrando. A pesar de esto, el valor de BER obtenido sigue estando dentro de los valores permitidos para los sistemas de comunicaciones ópticos.

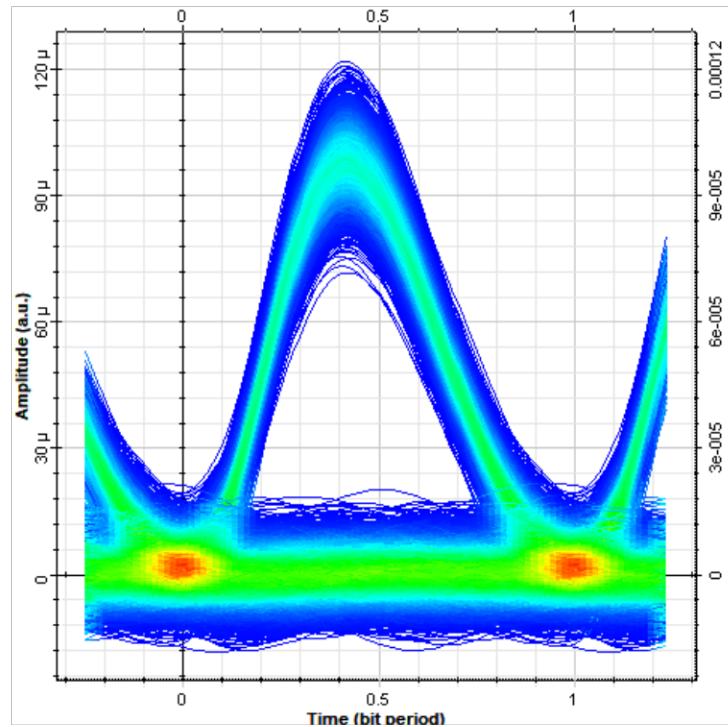


Figura 3.19. Diagrama de ojo para $V_{TX} = 150 \text{ Gbps}$.

3.1.4.6 Simulación sistema OTDM para 200 Gbps

Se procede a aumentar la velocidad de transmisión a 200 Gbps ya que los valores obtenidos previamente de BER y SNR así lo permiten. En la Tabla 3.6 se detallan los valores obtenidos para la simulación con velocidad de transmisión de 200 Gbps.

Tabla 3.6. Valores de BER y SNR obtenidos de la simulación con $V_{TX} = 200 \text{ Gbps}$.

Parámetro	Valor
BER	7.11898×10^{-13}
SNR	16.055 dB

Teniendo en cuenta que se están multiplexando cuatro canales de transmisión, para este escenario la capacidad total del sistema es de 800 Gbps, y a pesar de aquello el valor del BER está dentro de lo permitido, por tal razón se aumentará en la siguiente simulación la velocidad de transmisión para tener una capacidad total de 1 Tbps y ver su comportamiento. En la Figura 3.20 se aprecia cómo el diagrama de ojo se va cerrando conforme se aumenta la velocidad de transmisión debido a una mayor presencia de ISI y *jitter*.

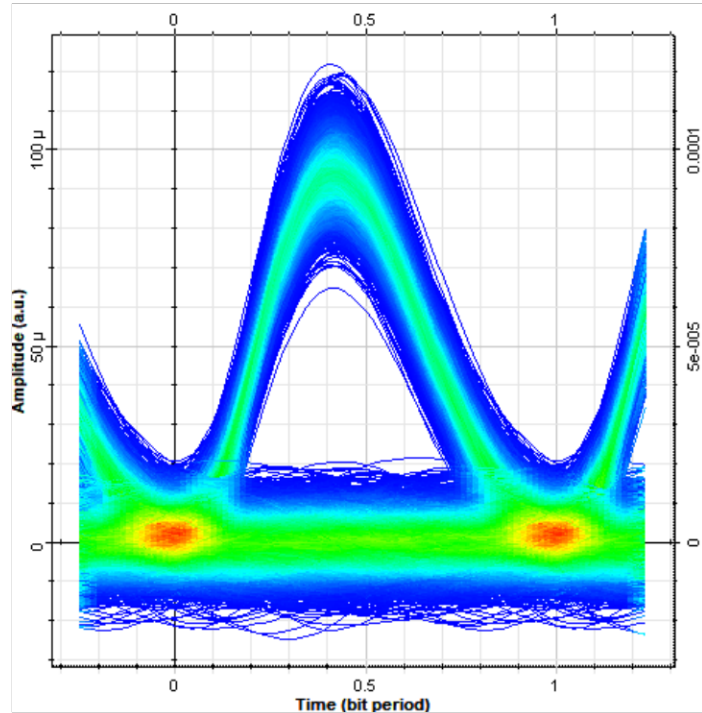


Figura 3.20. Diagrama de ojo para $V_{TX} = 200 \text{ Gbps}$.

3.1.4.7 Simulación sistema OTDM para 250 Gbps

Con una velocidad de transmisión de 250 Gbps la capacidad total del sistema, tomando en cuenta que todos los canales tienen la misma velocidad de transmisión y que se están multiplexando cuatro canales, sería de 1 Tbps. Los valores obtenidos de las simulaciones se pueden observar en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Valores de BER y SNR obtenidos de la simulación con $V_{TX} = 250 \text{ Gbps}$.

Parámetro	Valor
BER	2.10815×10^{-12}
SNR	15.772 dB

Pese a que el sistema tiene una gran capacidad, el BER continúa dentro de los valores permitidos, es decir para un sistema OTDM con cuatro canales en transmisión se puede llegar a tener una capacidad total de 1 Tbps. En el diagrama de ojo de la Figura 3.21 se ve que el ojo está cerrándose de manera vertical y horizontal lo que implica presencia importante de ISI y *jitter* respectivamente, por lo que la señal ya no llega de forma óptima al receptor y se dificulta discriminar la información, lo que provoca un aumento en el BER. Sin embargo, con el fin de obtener resultados con velocidades de transmisión mayores, se

aumenta esta para determinar hasta qué velocidad de transmisión el sistema OTDM opera adecuadamente.

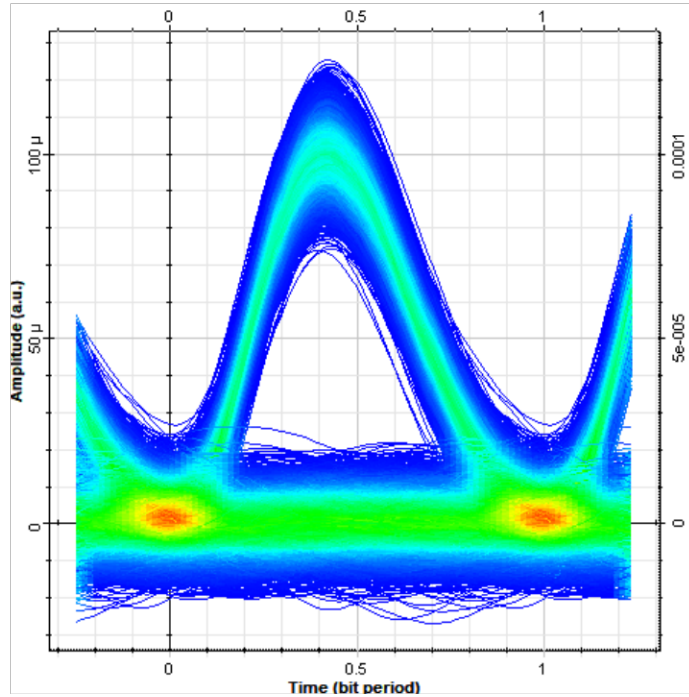


Figura 3.21. Diagrama de ojo para $V_{TX} = 250 \text{ Gbps}$.

3.1.4.8 Simulación sistema OTDM para 300 Gbps

En esta simulación cada canal tiene una velocidad de 300 Gbps por lo que la velocidad total del sistema sería 1.2 Tbps. Como resultado se obtuvieron los valores detallados en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Valores de BER y SNR obtenidos de la simulación con $V_{TX} = 300 \text{ Gbps}$.

Parámetro	Valor
BER	5.74563×10^{-10}
SNR	15.028 dB

El BER se encuentra cerca del límite recomendado para comunicaciones ópticas y esto se corresponde con el diagrama de ojo de la Figura 3.22, en el que se observa un ojo ya muy cerrado y el receptor puede tener problemas al momento de recuperar la información. Es conveniente simular con una velocidad de transmisión superior para ver el comportamiento del sistema, ya que con 300 Gbps por canal óptico está al límite de operar adecuadamente.

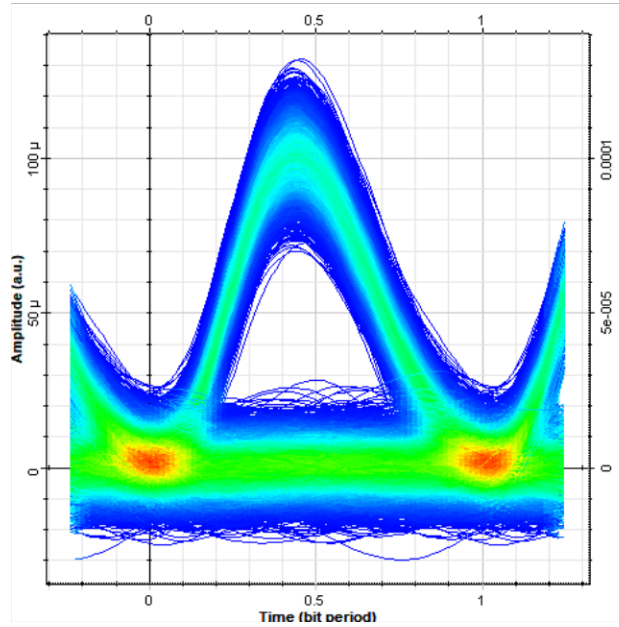


Figura 3.22. Diagrama de ojo para $V_{TX} = 300 \text{ Gbps}$.

Al estar en el límite del BER permitido se procede a graficar el espectro óptico de la señal de entrada y salida del sistema OTDM, de igual manera que se realizó para la velocidad de 10 Gbps. En la Figura 3.23 se presenta el resultado que arrojó el bloque *Dual Port Optical Spectrum Analyzer*. Se puede observar que, respecto al resultado que se obtuvo con una velocidad de 10 Gbps, el espectro se ensancha, este resultado es el esperado ya que se está trabajando a una velocidad de transmisión mayor.

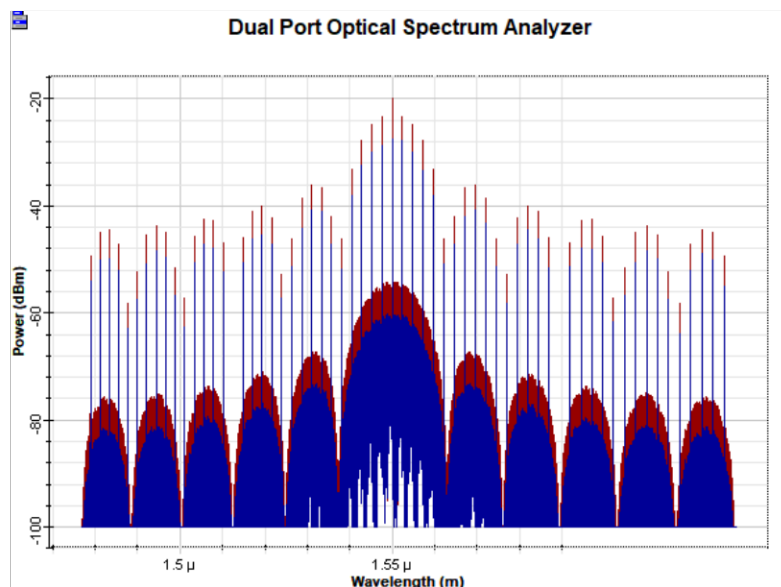


Figura 3.23. Espectro de la señal a multiplexarse (rojo) y espectro de la señal demultiplexada (azul) para $V_{TX} = 300 \text{ Gbps}$.

3.1.4.9 Simulación sistema OTDM para 350 Gbps

Con el fin de comprobar que 300 Gbps por canal es el límite de operación del sistema OTDM, se simuló con una velocidad de transmisión de 350 Gbps y se obtuvieron los valores de la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Valores de BER y SNR obtenidos de la simulación con $V_{TX} = 350 \text{ Gbps}$.

Parámetro	Valor
BER	8.53002×10^{-6}
SNR	14.057 dB

A esta velocidad el BER se deteriora significativamente lo cual también ocurre con el SNR, por lo que ya no se tienen parámetros adecuados para la transmisión de datos según lo recomendado para los sistemas de comunicaciones ópticos, pues el BER es mayor a 10^{-9} . Además, en la Figura 3.24 se observa que el diagrama de ojo está casi cerrado por completo, donde tanto el ISI como el *jitter* son excesivos y por lo tanto el receptor tendría problemas en recuperar la información a esta velocidad de transmisión.

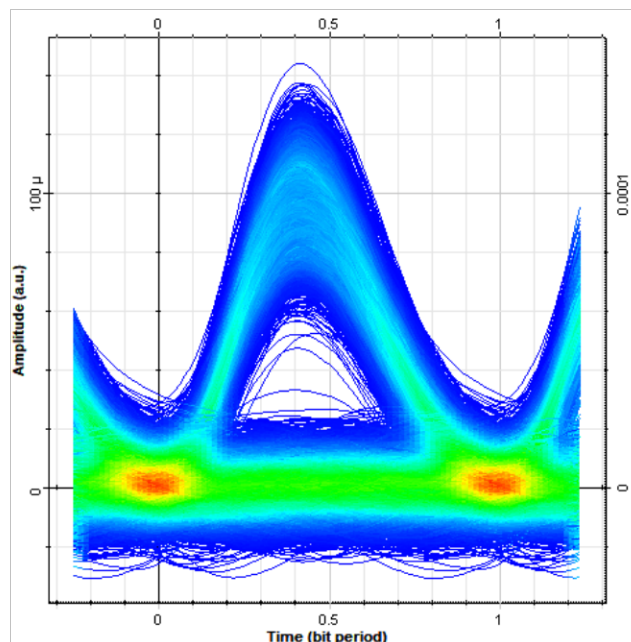


Figura 3.24. Diagrama de ojo para $V_{TX} = 350 \text{ Gbps}$.

3.1.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La multiplexación TDM en el dominio eléctrico se vuelve difícil de implementar a velocidades superiores a 40 Gbps debido a las limitaciones impuestas por la electrónica de alta velocidad. Por otro lado, OTDM ofrece una solución, ya que este esquema puede

aumentar la tasa de bits del sistema de una única portadora óptica a valores que estén por encima de 1 Tbps [11].

Otros resultados experimentales mostraron que una señal OTDM de 1.28 Tbps pudo transmitirse a lo largo de 70 km, pero fueron necesarios compensadores de dispersión [12]. Por otro lado, para otro experimento se empleó una modulación DQPSK para transmisión en un sistema OTDM en 240 km a 1.28 Tbps y en 60 km a 2.56 Tbps [11].

Con lo descrito en los párrafos anteriores se comprueba que la capacidad total del sistema simulado arroja resultados favorables para el estudio, ya que en las simulaciones realizadas en este Trabajo de Integración Curricular se obtuvo una capacidad máxima de 1.2 Tbps, y en esas condiciones el sistema aún presenta un valor de BER adecuado para comunicaciones ópticas, lo cual es consistente con los resultados experimentales alcanzados.

Que el sistema simulado sea *back-to-back* permite que el enfoque del estudio se centre en la multiplexación y demultiplexación, ya que en el resultado que se obtuvo al agregar una fibra óptica ideal hubo una variación mínima en el BER frente al resultado obtenido con un escenario *back-to-back*. Así, a la velocidad de 10 Gbps con una fibra óptica ideal se obtuvo un BER de 4.12856×10^{-31} y para *back-to-back* el BER fue de 3.48779×10^{-31} , si bien se obtuvo un BER ligeramente menor sin la fibra óptica ideal, este no afecta al funcionamiento del sistema pues su diferencia es mínima y por tal razón los resultados de las demás simulaciones fueron aceptables.

En la Figura 3.25 se muestra cómo el BER va aumentando conforme aumenta la velocidad de transmisión, lo cual se debe a que al momento de tener una velocidad de transmisión más elevada los tiempos de bit se reducen y al receptor le resulta más difícil poder recuperar la señal de buena manera.

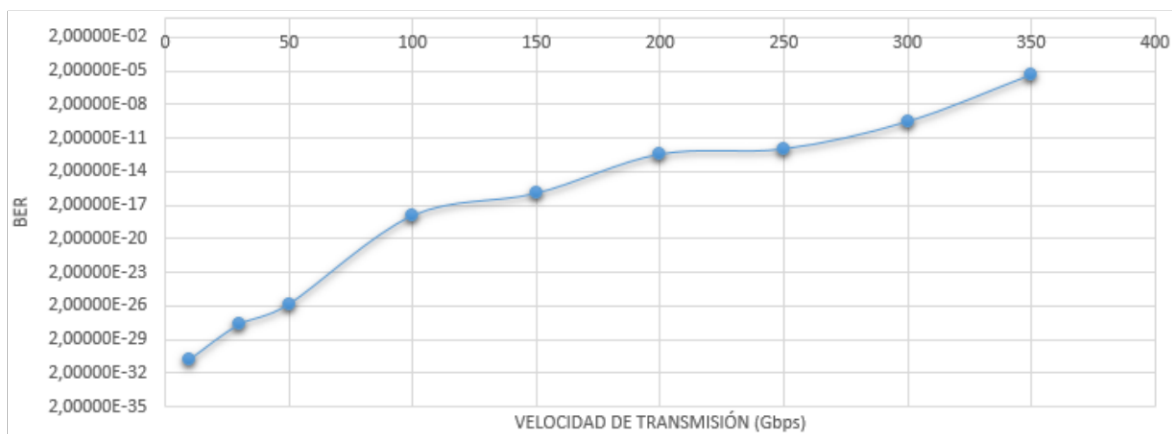


Figura 3.25. BER en función de la velocidad de transmisión del sistema OTDM simulado.

En la Figura 3.26 se muestra cómo la SNR aumenta conforme se tiene un mejor BER, es decir que la potencia de la señal es mucho mayor que la potencia del ruido en recepción a velocidades bajas y esta relación va disminuyendo al ir aumentando la velocidad de transmisión, estos resultados son los esperados ya que concuerdan con la teoría relacionada a los sistemas de comunicaciones ópticos. Los valores de potencia con los que se obtuvo el SNR se detallan en la Tabla II.1 en el ANEXO II “Mediciones de potencias para el cálculo del SNR”.

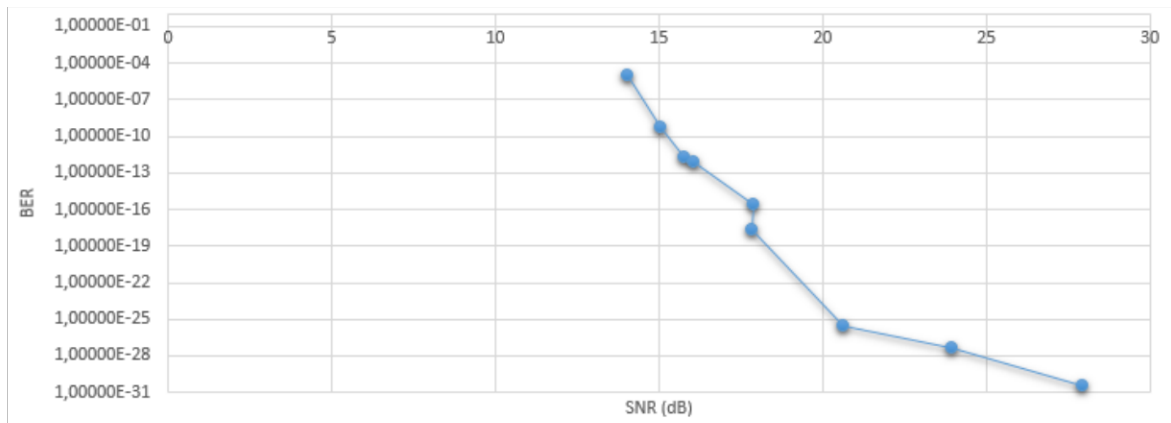


Figura 3.26. BER versus SNR del sistema OTDM simulado.

Con los resultados que se han analizado, se determina que OTDM resulta óptimo para transmisiones de datos a altas velocidades, ya que un canal que se está transmitiendo ocupa toda la capacidad del sistema durante el slot de tiempo que le sea asignado, pudiendo llegar hasta 1.2 Tbps para las condiciones que se presentaron en este trabajo. Sin embargo, una de las principales limitaciones que se tiene actualmente frente a otras técnicas de multiplexación como WDM, es que no se ha desarrollado comercialmente y por el contrario WDM es la tecnología más desplegada a nivel mundial; sin embargo, se debe tener en cuenta que una combinación de ambas puede mejorar aún más la capacidad de transmitir datos a altas velocidades.

Para un escenario *back-to-back* con una longitud de onda de operación distinta a la que se utilizó en este trabajo, los valores de BER podrían tener variaciones mínimas, ya que al trabajar con esta conexión no se tiene un canal de transmisión, que es en el cual se producen la mayoría de pérdidas para los sistemas de comunicaciones ópticos. Dependiendo del caso al utilizar un canal de transmisión que simule uno real puede ser necesario utilizar amplificadores ópticos e incluso compensadores de dispersión, lo cual para el presente estudio no fue utilizado dado que está fuera del alcance propuesto.

La potencia de transmisión utilizada para este trabajo fue adecuada según los resultados analizados ya que la capacidad máxima alcanzada es similar a los resultados experimentales mencionados anteriormente. En caso de aumentar la potencia dentro de límites razonables ya sea en el láser o a través de amplificadores de ser el caso, el detector podría recuperar de mejor manera la información lo que implicaría un menor BER. Lo contrario ocurriría si se disminuye la potencia, ya que no le llegaría la potencia suficiente al detector y este no recuperaría la información de forma adecuada, lo que implicaría un mayor BER.

3.2 CONCLUSIONES

Con los resultados que se alcanzaron y posteriormente se analizaron en el Trabajo de Integración Curricular, a continuación, se presentan las conclusiones que se obtuvieron del estudio y la simulación del sistema OTDM:

- Los diferentes escenarios de simulación se implementaron en el software OptiSystem y del análisis de los resultados se desprende que estos fueron los esperados de acuerdo a la teoría consultada y a trabajos afines realizados.
- El entrelazado bit a bit simulado con una secuencia de cuatro bits fue necesario para poder observar cómo los bits procedentes de cada canal en transmisión toman su slot de tiempo correspondiente en la señal OTDM multiplexada. Lo que permitió validar el intercalado de bits en tiempo y posteriormente aumentar la longitud de la secuencia de bits (8192) de cada canal a multiplexarse.
- La codificación RZ al 20% permitió tener una señal OTDM multiplexada en la cual los bits de cada canal no se interferían entre sí y esto se pudo apreciar gráficamente en la simulación realizada con una secuencia de cuatro bits en cada canal.
- El cálculo de los retardos de tiempo es de vital importancia para la asignación del slot de tiempo correcto a cada canal en la señal multiplexada, para ello la ecuación utilizada determinó los retardos correspondientes para el escenario simulado, mismos que fueron apropiados para el correcto funcionamiento del sistema OTDM de acuerdo a los resultados arrojados en las simulaciones realizadas.
- De acuerdo al sistema simulado se obtuvieron resultados óptimos con velocidades de máximo 300 Gbps en cada uno de los cuatro canales multiplexados, es decir cuando el sistema tiene una capacidad total máxima de 1.2 Tbps aún los resultados alcanzados de BER y SNR son adecuados según los requerimientos recomendados para los sistemas de comunicaciones ópticas. Con lo cual se determina que OTDM

es una técnica de multiplexación que permite transmitir datos a una tasa máxima de unidades de Tbps en condiciones ideales.

- Si se agrega un canal de transmisión en condiciones más cercanas a un escenario real, la capacidad total del sistema OTDM disminuiría, ya que cuando se simula con condiciones ideales no se toman en cuenta pérdidas que pueden afectar al correcto funcionamiento del sistema en un escenario real.
- La técnica de multiplexación OTDM es considerablemente mejor respecto al TDM eléctrico, cuya capacidad máxima es de hasta 40 Gbps aproximadamente, mientras que en el presente estudio se observó que el sistema OTDM puede ofrecer capacidades en el orden de los Tbps.
- Al momento no es posible implementar una multiplexación OTDM porque no hay equipos comerciales para el efecto, por esta razón la técnica de multiplexación WDM es la más utilizada actualmente. Sin embargo, una combinación de ambas técnicas puede ayudar a obtener mayores capacidades para la transmisión de datos.
- La conexión *back-to-back* entre el multiplexor y el demultiplexor facilitó las simulaciones y el análisis posterior de los resultados obtenidos, y estos no fueron diferentes a los alcanzados cuando se trabajó con una fibra ideal de una longitud de 50 km a una velocidad de 10 Gbps, con lo que se validó las simulaciones *back-to-back* y se trabajó con estas para todas las otras velocidades de transmisión analizadas.

3.3 RECOMENDACIONES

- Es necesario utilizar una secuencia de bits de longitud adecuada para poder obtener valores de BER confiables, ya que al utilizar secuencias de longitudes cortas los datos que se obtienen no resultan de utilidad.
- Será de utilidad en futuros estudios aumentar el número de canales a multiplexarse, pero con menores velocidades de transmisión para verificar el funcionamiento del sistema OTDM en esas condiciones.
- En este Trabajo de Integración Curricular fueron tomadas en cuenta condiciones bastante ideales en los diferentes elementos utilizados para simular el sistema OTDM, por lo que en una implementación práctica se recomienda tomar en cuenta las pérdidas que pueden tener estos elementos.

- Para futuras investigaciones que puedan complementar al presente trabajo se puede utilizar diferentes técnicas de codificación y modulación de la señal en transmisión, de tal manera que se analice cómo funciona el sistema OTDM bajo distintas condiciones.
- Se trabajó con una única potencia de transmisión, por lo que para futuros estudios se recomienda utilizar distintas potencias de transmisión para analizar el desempeño del sistema OTDM en esas condiciones.
- La banda de operación escogida para el desarrollo del trabajo arrojó resultados favorables. Sin embargo, no se comprobó el funcionamiento del sistema para otras bandas de operación, lo cual puede ser tema de interés para futuros estudios de tal manera que se puedan comparar los resultados a diferentes longitudes de onda de trabajo.
- La conexión *back-to-back* fue adecuada, pero se recomienda incluir una fibra con atenuación y dispersión en el canal de transmisión, de tal manera que se pueda analizar el sistema OTDM bajo esas condiciones, y de ser el caso hacer uso de elementos adicionales como amplificadores y compensadores de dispersión.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Jiménez, Comunicaciones Ópticas, Quito, 2010.
- [2] M. Bruno, «Simulation and Performance Evaluation of OTDM in Optical Communication System,» *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 4, pp. 489-493, 2015.
- [3] H. Dutton, Understanding Optical Communications, North Carolina: IBM, 1998.
- [4] W. Tomasi, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, México: Peaason Educación., 2003.
- [5] R. Pinto y A. Cabezas, SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS, Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, 2014.
- [6] R. Ranaswami, K. Sivarajan y G. Sasaki, Optical Networks a Practical Perspective, Burlington: ELSEVIER, 2010.
- [7] L. Barry, Optical Communication System, Dublin: Elsevier Ltd, 2005.
- [8] Z. Ghassemlooy y S. G, Encyclopedia of Modern Optics II, Newcastle: Elsevier Ltd, 2005.
- [9] Z. Junyu, «Research on Coherent Ligth Detection Method Based on Phase Control of Fiber Delay Line,» *Journal of Physics: Conference series*, 2021.
- [10] O. S. Inc., «Optiwave Photonic Software,» 2021. [En línea]. Available: <https://optiwave.com/optisystem-overview/>. [Último acceso: 24 11 2021].
- [11] A. Govind, FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS, New Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC., 2010.
- [12] T. Vo, H. Hu, M. Galili y J. Palushani, «Photonic chip based transmitter optimization and receiver demultiplexing of a 1.28 Tbit/s OTDM signal,» *OPTICS EXPRESS* , vol. 18, nº 16, pp. 17252-17261, 2010.

5 ANEXOS

ANEXO I. Sistema MUX/DEMUX OTDM simulado.

ANEXO II. Mediciones de potencias para el cálculo del SNR.

ANEXO I

En el presente anexo se coloca una imagen del sistema OTDM MUX/DEMUX simulado.

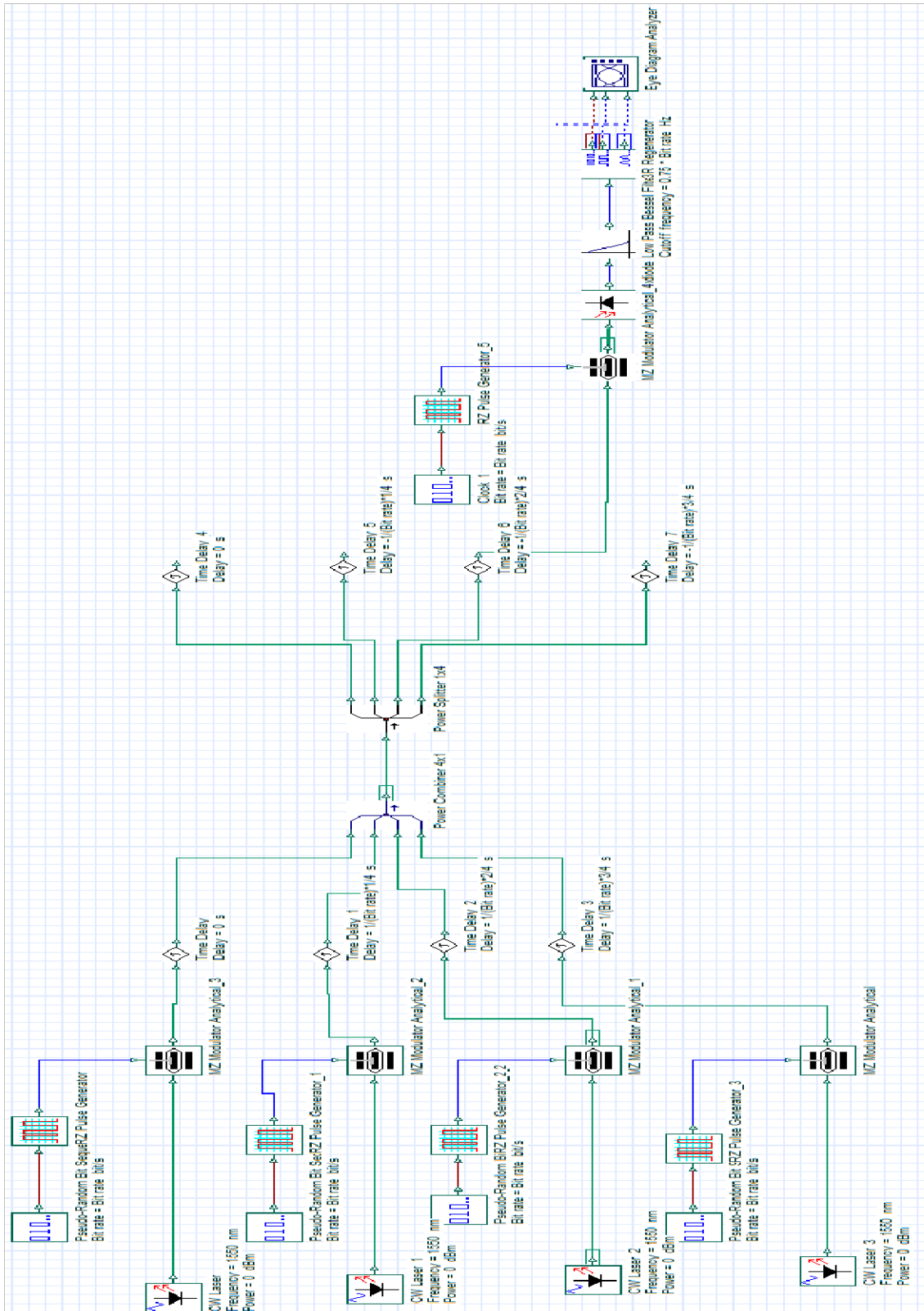


Figura I.1. Sistema MUX/DEMUX OTDM simulado.

ANEXO II

Mediciones de *Signal Power* y *Noise Power*, con las velocidades de transmisión simuladas en el Trabajo de Integración Curricular.

Tabla II.1. Mediciones de *Signal Power* y *Noise Power* para obtención del SNR.

VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN (Gbps)	SIGNAL POWER (W)	NOISE POWER (W)
10	1.027×10^{-9}	1.647×10^{-12}
30	1.240×10^{-9}	4.981×10^{-12}
50	956.427×10^{-12}	8.274×10^{-12}
100	999.217×10^{-12}	16.511×10^{-12}
150	1.537×10^{-9}	25.002×10^{-12}
200	1.337×10^{-9}	33.164×10^{-12}
250	1.586×10^{-9}	41.983×10^{-12}
300	1.593×10^{-9}	50.057×10^{-12}
350	1.493×10^{-9}	58.664×10^{-12}