

Pontificia Universidad  
Católica del Ecuador

FACULTAD DE INGENIERÍA  
COORDINACIÓN DE POSGRADO



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

Trabajo de Titulación como requisito previo para la obtención del título de  
Magíster en Tecnologías de Información mención Gestión y Administración de  
TI

**Diseño y simulación de un enlace óptico PAM 8 para conexión de Data  
Centers en entornos urbanos ultra-densos a 1.6 Tb/s**

**Autor:** Ricardo Israel Zapata Yacelga, Ing.

**Director:** Dr. German Vicente Arévalo Bermeo, PhD

Quito, enero 2023

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN**

Yo, RICARDO ISRAEL ZAPATA YACELGA, con CC. 1720822814, autor del trabajo de graduación intitulado: “Diseño y simulación de un enlace óptico PAM 8 para conexión de Data Centers en entornos urbanos ultra-densos a 1.6 Tb/s, previo a la obtención del título profesional de Magíster en Tecnologías de Información mención Gestión y Administración de TI, de la Facultad de Ingenierías.

1.- Declaro tener conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, en conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador a difundir a través de su sitio web de la biblioteca el referido trabajo de graduación, respetando las políticas de propiedad intelectual.

Quito, enero 2023



**RICARDO ISRAEL ZAPATA YACELGA**  
CI: 1720822814

### APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi carácter de Director del Trabajo de Posgrado Titulado “Diseño y simulación de un enlace óptico PAM 8 para conexión de Data Centers en entornos urbanos ultra-densos a 1.6 Tb/s”, presentado por el maestrante RICARDO ISRAEL ZAPATA YACELGA, titular de la Cédula de Identidad N° 1720822814 para optar al Grado de Magíster en Tecnologías de Información mención Gestión y Administración de TI, considero que dicho Trabajo de Investigación reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la evaluación por parte de los Lectores – Evaluadores que se designen para tal fin por parte de las autoridades de la Facultad de Ciencias de la Educación.

En la ciudad de Quito, a los 3 días de enero de 2023.



---

GERMÁN VICENTE ARÉVALO BERMEO

C.I. 0103152500

garevalo893@puce.edu.ec

NRO TELEFONO: 0991572515

NOTA:

Se comunica que en el servicio de análisis Turnitin, el referido trabajo de titulación alcanzó el siguiente resultado: 5% índice de similitud con otras fuentes.

**TURNITIN: INCLUIR HOJA DEL INFORME CON EL PORCENTAJE**

Tesis\_Ricardo\_Zapata\_finalV2\_MTIO\_12-2022.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>5%</b>	<b>5%</b>	<b>0%</b>	<b>4%</b>
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>repositorio.puce.edu.ec</b> Fuente de Internet	<b>3%</b>
<b>2</b>	<b>docplayer.es</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>3</b>	<b>www.dspace.espol.edu.ec</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>4</b>	<b>Submitted to Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO) - Sede Ecuador</b> Trabajo del estudiante	<b>1%</b>

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, Ricardo Israel Zapata Yacelga de cédula de ciudadanía 1720822814 declaro que todos los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación, previo a la obtención del grado de Magíster en Tecnologías de Información mención Gestión y Administración de TI son de mi autoría, auténticos y originales.

Por lo que declaro que el contenido, las conclusiones y los efectos legales y académicos que se desprendan de este trabajo de investigación son y serán de mi sola y exclusiva responsabilidad legal y académica.

Declaro que todo resultado académico que continúe con esta investigación y que se difunda tendrá como filiación la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, reconociendo al director de este trabajo de titulación en la autoría



Ricardo Israel Zapata Yacelga

CI:1720822814

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN .....	15
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
1.1.    Formulación del problema .....	16
1.2.    Objetivos de la Investigación.....	17
Objetivo General.....	17
Objetivos Específicos.....	17
• Analizar el estado del arte de enlaces ópticos que trabajan con PAM-8. ....	17
• Diseñar un enlace óptico PAM-8 a una velocidad de transmisión de 1.6 Tb/s. ....	17
• Simular el enlace óptico PAM-8 a una velocidad de transmisión de 1.6 Tb/s. ....	17
• Analizar los resultados obtenidos para determinar el desempeño del enlace óptico PAM-8. .....	17
1.3.    Justificación de la Investigación .....	17
CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	18
2.1.    Antecedentes de la Investigación.....	18
2.2.    Bases Teóricas. ....	20
2.2.1.    La fibra óptica.....	20
2.2.1.1.    Fibra óptica monomodo .....	20
2.2.1.2.    Fibra óptica multimodo.....	20
2.2.2.    Propiedades de la fibra óptica .....	21
2.2.2.1.    Atenuación .....	21
2.2.2.2.    Dispersión cromática.....	22
2.2.2.3.    Dispersión por modo de polarización .....	22
2.2.2.4.    Transmisores ópticos.....	23
2.2.2.5.    Diodos led .....	23
2.2.2.6.    Diodos laser .....	23
2.2.3.    Receptores ópticos .....	24
2.2.3.1.    Detectores PIN .....	24
2.2.3.2.    Detectores APD.....	25
2.2.4.    Modulación en enlaces ópticos .....	26
2.2.4.1.    Esquemas de modulación.....	26
2.2.4.2.    Modulación digital en amplitud .....	27
2.2.4.3.    Modulación en amplitud de pulso PAM .....	27

2.2.4.4.	Modulación OOK.....	28
2.2.4.5.	Modulación PAM.....	29
2.2.4.5.1.	Modulación PAM 4.....	29
2.2.4.5.2.	Modulación PAM 8.....	29
2.2.5.	BER (tasa de bits errados).....	30
2.2.6.	Diagrama del ojo.....	31
2.2.6.1.	Propiedades del diagrama del ojo .....	32
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....		34
3.1.	Tipo de Investigación.....	34
3.2.	Diseño de Investigación.....	34
3.3.	Unidades de Estudio .....	34
	Población.....	34
	Muestra .....	34
3.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	34
3.5.	Técnica de Análisis de Datos .....	35
3.6.	Operacionalización de Variables .....	35
CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL SISTEMA Y SUMULACIÓN.....		36
4.1.	Co-simulación Matlab-Optisystem .....	36
4.1.1.	Optisystem .....	36
4.1.2.	Diagrama de bloques de la red PON .....	37
4.1.3.	Descripción de los componentes de la red PON .....	41
4.1.3.1.	Transmisor .....	41
4.1.3.1.1.	Generador de secuencias de bits .....	41
4.1.3.1.2.	Modulador PAM en Matlab .....	41
4.1.3.1.3.	Generador de pulsos M-ary.....	42
4.1.3.1.4.	Modulador MZ.....	42
4.1.3.1.5.	Laser transmisor.....	43
4.1.3.2.	Medio de transmisión fibra óptica.....	43
4.1.3.2.1.	Compensador de dispersión .....	44
4.1.3.2.2.	Cálculo de distancia de fibra óptica compensadora de dispersión .....	44
4.1.3.2.3.	Atenuador.....	45
4.1.3.3.	Receptor .....	46
4.1.3.3.1.	Demodulador PAM diseñado en MATLAB .....	47
4.1.3.4.	Parámetros generales de la simulación .....	47
4.1.3.5.	Módulos de visualización.....	48
4.1.3.5.1.	Optical Power Meter .....	48
4.1.3.5.2.	Oscilloscope visualizer .....	48

4.1.3.6.	Co-simulación Matlab Optisystem.....	49
4.1.3.6.1.	Modulador PAM .....	49
4.1.3.7.	Demodulador PAM .....	51
4.1.4.	Gráficas de símbolos enviados y recibidos con modulación PAM.....	54
4.1.5.	Pre-distorsión con PAM-4 .....	56
4.1.6.	Pre-distorsión con PAM-8 .....	58
4.1.7.	Seteo de umbrales para la demodulación.....	59
4.1.8.	Cálculo de los bits errados BER.....	61
4.1.9.	Simulación de la red PON.....	62
4.1.9.1.	Transmisión a 150 Gb/s .....	62
4.1.9.2.	Transmisión a 200 Gb/s .....	63
4.1.9.3.	Transmisión a 300 Gb/s .....	65
CAPÍTULO V: ANALISIS Y RESULTADOS .....		68
5.1.	Análisis con velocidad de transmisión a 150 Gb/s.....	68
5.2.	Análisis con velocidad de transmisión a 200 Gb/s.....	70
5.3.	Análisis con velocidad de transmisión a 300 Gb/s.....	71
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		73
REFERENCIAS.....		75
ANEXOS .....		78

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables .....	35
Tabla 2 Pre-distorsión PAM-4 .....	56
Tabla 3 Pre-distorsión PAM-8 .....	58

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Figura 1</b> <i>Fibra monomodo</i> .....	20
<b>Figura 2</b> <i>Fibra multimodo</i> .....	21
<b>Figura 3</b> <i>Curva de pérdidas causadas por atenuación</i> .....	22
<b>Figura 4</b> <i>Diodo Led</i> .....	23
<b>Figura 5</b> <i>Diodo Láser</i> .....	24
<b>Figura 6</b> <i>Diodo Pin</i> .....	25
<b>Figura 7</b> <i>Diodo APD</i> .....	26
<b>Figura 8</b> <i>Modulación digital ASK</i> .....	27
<b>Figura 9</b> <i>Modulación OOK</i> .....	28
<b>Figura 10</b> <i>Modulación OOK con NRZ</i> .....	29
<b>Figura 11</b> <i>Modulación PAM</i> .....	30
<b>Figura 12</b> <i>Diagrama del ojo</i> .....	31
<b>Figura 13</b> <i>Diagrama del ojo en modulación PAM-4 y PAM-8</i> .....	33
<b>Figura 14</b> <i>Diagrama de Bloques de la red PON</i> .....	39
<b>Figura 15</b> <i>Simulación de la red PON en Optisystem</i> .....	40
<b>Figura 16</b> <i>Generador de bits pseudo aleatorios</i> .....	41
<b>Figura 17</b> <i>Módulo de co-simulación Matlab</i> .....	42
<b>Figura 18</b> <i>Generador de pulsos M-ary</i> .....	42
<b>Figura 19</b> <i>Modulador MZ</i> .....	43
<b>Figura 20</b> <i>Laser CW</i> .....	43
<b>Figura 21</b> <i>Módulo de Fibra Óptica</i> .....	44
<b>Figura 22</b> <i>Fibra Compensadora de Dispersión</i> .....	45
<b>Figura 23</b> <i>Atenuador Óptico</i> .....	46
<b>Figura 24</b> <i>Foto Diodo Pin</i> .....	46
<b>Figura 25</b> <i>Configuración de Ancho de Banda de Modulación en Foto Diodo PIN</i> .....	47
<b>Figura 26</b> <i>Demodulador PAM en Matlab</i> .....	47
<b>Figura 27</b> <i>Parámetros para la Simulación</i> .....	48
<b>Figura 28</b> <i>Optical Power Meter</i> .....	48
<b>Figura 29</b> <i>Osciloscopio en Optisystem</i> .....	49
<b>Figura 30</b> <i>Código para la Creación de Símbolos en PAM</i> .....	49
<b>Figura 31</b> <i>Código para Graficar los Símbolos Enviados y el Diagrama del ojo</i> .....	50
<b>Figura 32</b> <i>Bits Enviados y Diagrama del ojo PAM-4</i> .....	51
<b>Figura 33</b> <i>Variables de nivel y almacenamiento de datos de Optisystem</i> .....	51
<b>Figura 34</b> <i>Código para Graficar la señal Recibida y el Diagrama del ojo</i> .....	52
<b>Figura 35</b> <i>Código para la Demodulación de Acuerdo con el Nivel de PAM</i> .....	52
<b>Figura 36</b> <i>Código para la demodulación de acuerdo con el nivel de PAM parte 2</i> .....	53
<b>Figura 37</b> <i>Código para el cálculo del BER</i> .....	54
<b>Figura 38</b> <i>Símbolos enviados y recibidos en PAM-4</i> .....	54
<b>Figura 39</b> <i>Símbolos enviados y recibidos en PAM-8</i> .....	55
<b>Figura 40</b> <i>Diagrama del ojo en el Transmisor y en el Receptor PAM-4</i> .....	55
<b>Figura 41</b> <i>Diagrama del ojo en el Transmisor y en el Receptor PAM-8</i> .....	56
<b>Figura 42</b> <i>Valores de Pre -distorsión PAM-4</i> .....	57
<b>Figura 43</b> <i>Diagrama del ojo PAM-4 sin Distorsión y con Pre- Distorsión</i> .....	57
<b>Figura 44</b> <i>Valores de Pre-Distorsión PAM-4 a 150 GB/s</i> .....	57
<b>Figura 45</b> <i>Valores de Pre-Distorsión PAM-8</i> .....	58

<b>Figura 46</b>	<i>Diagrama del ojo PAM-8 sin Distorsión y con Pre-Distorsión</i> .....	59
<b>Figura 47</b>	<i>Validación de umbral en el diagrama del ojo</i> .....	60
<b>Figura 48</b>	<i>Umbrales de demodulación PAM-4 y PAM-8</i> .....	60
<b>Figura 49</b>	<i>Código para el cálculo del BER</i> .....	61
<b>Figura 50</b>	<i>Cálculo del BER en Matlab</i> .....	61
<b>Figura 51</b>	<i>Transmisión a 150 Gb/s PAM-4 a 75 GB/s. a) 0 dB de atenuación, b) 5 dB de atenuación, c) 8 dB de atenuación, d) 10 dB de atenuación</i> .....	62
<b>Figura 52</b>	<i>Transmisión a 150 Gb/s PAM-8 a 50 GB/s. a) 0 dB de atenuación, b) 1 dB de atenuación, c) 3 dB de atenuación, d) 5 dB de atenuación</i> .....	63
<b>Figura 53</b>	<i>Transmisión a 200 Gb/s PAM-4 a 100 GB/s. a) 0 dB de atenuación, b) 5 dB de atenuación, c) 8 dB de atenuación, d) 10 dB de atenuación</i> .....	64
<b>Figura 54</b>	<i>Transmisión a 200 Gb/s PAM-8 a 66,6 GB/s. a) 0 dB de atenuación, b) 1 dB de atenuación, c) 3 dB de atenuación, d) 5 dB de atenuación</i> .....	65
<b>Figura 55</b>	<i>Transmisión a 300 Gb/s PAM-4 a 150 GB/s. a) 0 dB de atenuación, b) 5 dB de atenuación, c) 8 dB de atenuación, d) 10 dB de atenuación</i> .....	66
<b>Figura 56</b>	<i>Transmisión a 300 Gb/s PAM-8 a 100 GB/s. a) 0 dB de atenuación, b) 1 dB de atenuación, c) 3 dB de atenuación, d) 5 dB de atenuación</i> .....	67
<b>Figura 57</b>	<i>BER vs Potencia recibida a 150 Gb/s</i> .....	69
<b>Figura 58</b>	<i>BER vs Potencia recibida a 200 Gb/s</i> .....	70
<b>Figura 59</b>	<i>BER vs Potencia recibida a 300 Gb/s</i> .....	71

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRIA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN MENCIÓN GESTIÓN  
Y ADMINISTRACIÓN DE TI

**Diseño y simulación de un enlace óptico PAM 8 para conexión de Data Centers en entornos urbanos ultra-densos a 1.6 Tb/s**

Autor: Ricardo Israel Zapata Yacelga

Director -Tutor: Dr. German Vicente Arévalo Bermeo, PhD

Fecha: enero 2023

**RESUMEN**

El avance de la tecnología exige tener canales con mayores tasas de envío de información por lo que los enlaces de fibra óptica se han incrementado considerablemente en comunicaciones de corto alcance desde o dentro de data centers o computadores de alto rendimiento. El aumento del tráfico de datos y a su vez del tamaño de los data centers obligan a tener interconexiones ópticas más avanzadas que proporcionen una mejor y deseada velocidad, eficiencia energética, distancia de alcance y lo más importante a un bajo costo de implementación.

Se tiene una variedad de formatos de modulaciones avanzadas que permiten el aumento en la velocidad de transmisión, pero los diseños deben estar orientados a la opción más económica y estas son las modulaciones en intensidad que representan una menor complejidad que modulaciones coherentes como PSK o QAM que permiten llegar a velocidades altas con la desventaja que se debe utilizar complejos moduladores IQ y receptores coherentes en la recepción, elevando la complejidad en el diseño.

La mejor opción para el diseño son las modulaciones en amplitud de pulso (PAM-N) con una complejidad y un costo de implementación relativamente bajos, las que permiten incrementando los niveles de bits por baudios llegar a velocidades altas entre 100 a 200 Gb/s en PAM-4 o en PAM-8.

En este estudio se plantea un diseño de una red PON que permita paralelizando láseres llegar a una velocidad de 1.6 Tb/s utilizando modulaciones PAM-4 y PAM-8 trabajando a velocidades de transmisión de 150 Gb/s, 200 Gb/s y 300 Gb/s.

**Palabras clave:**

Modulación de intensidad, modulación PAM-4, modulación PAM-8, co-simulación Matlab, velocidad de transmisión, diagrama del ojo, tasa de bits errados.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MASTER'S DEGREE IN INFORMATION TECHNOLOGIES MENTION  
MANAGEMENT AND IT MANAGEMENT

**Design and simulation of a PAM 8 optical link for connection of Data Centers in ultra-dense urban environments at 1.6 Tb/s**

Author: Ricardo Israel Zapata Yacelga

Director -Tutor: Dr. German Vicente Arévalo Bermeo, PhD

Date: January 2023

**ABSTRACT**

The advancement of technology requires having channels with higher information delivery rates, which is why fiber optic links have increased in short-range communications from or within data centers or high-performance computers. The increase in data traffic and, in turn, the size of data centers makes it necessary to have more advanced optical interconnections that provide better and desired speed, energy efficiency, range distance and, most importantly, at a low implementation cost.

There is a variety of advanced modulation formats that allow the increase in transmission speed, but the designs must be oriented towards the most economical option and these are intensity modulations that represent less complexity than coherent modulations such as PSK or QAM that They allow reaching high speeds with the disadvantage that complex IQ modulators and coherent receivers must be used in the reception, increasing the complexity in the design.

The best option for the design is pulse amplitude modulations (PAM-N) with a low complexity and implementation cost, which allow increasing the levels of bits per baud to reach high speeds between 100 to 200 Gb/s. in PAM-4 or in PAM-8.

This study proposes a design of a PON network that allows parallelizing lasers to reach

a speed of 1.6 Tb/s using PAM-4 and PAM-8 modulations working at transmission speeds of 150 Gb/s, 200 Gb/s and 300 Gb/s.

### **Keywords**

Intensity modulation, PAM-4 modulation, PAM-8 modulation, MATLAB co-simulation, baud rate, eye diagram, bit error rate.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años la tecnología de interconexión óptica se ha utilizado ampliamente en comunicaciones de corto alcance desde o dentro de los data centers o computadores de alto rendimiento. El aumento de tráfico de datos y a su vez del tamaño de los data centers obligan a tener interconexiones ópticas más avanzadas que proporcionen una mejor y deseada velocidad, eficiencia energética y distancia de alcance (Sun, y otros, 2019).

En las últimas décadas el ancho de banda de la red de acceso aumenta a una tasa promedio de 1,5 veces debido al crecimiento de la computación en la nube, la realidad virtual, el video de alta definición 4k/8K y el incremento de servicios que demandan un gran ancho de banda obligando a que la capacidad de la red de acceso aumente (Houtsma & Van Veen, 2017).

Se tiene una variedad de formatos de modulaciones avanzadas que permiten el aumento de velocidad de la transmisión como la modulación de amplitud de pulso (PAM-N) con una complejidad y un costo de implementación relativamente bajos. La mejora por el incremento de los niveles de bits por baudio (N- veces) se puede lograr mediante el mapeo binario adecuando para conexiones ópticas de bajo costo. PAM-4 ha sido considerado como el formato más prometedor para el estándar de nueva generación de 400Gbps detallada en la IEEE 802.3bs, pero PAM-8 proporciona una mayor eficiencia espectral, aunque a mayor número de niveles conlleva tener una relación señal ruido óptima por lo que se tiene que incluir métodos de ecualización para mitigar las distorsiones de la señal (Sun, y otros, 2019).

Una modulación multiniveles PAM-N permite trabajar con un receptor más simple en comparación con los receptores coherentes y a su vez mejoran la eficiencia espectral que en los sistemas binarios permitiendo duplicar o multiplicar por un valor N la cantidad de bits enviados utilizando el mismo ancho de banda, mejorando el rendimiento y la velocidad de transmisión (Ahmed & Mahmood, 2018).

En esta tesis se analiza un enlace óptico con modulaciones PAM-4 y PAM-8 para conexión de Data Centers a una velocidad de 1.6 Tb/s.

En el capítulo I se realizará la descripción del problema, los objetivos y la justificación de la tesis.

En el capítulo II se recopila información del estado del arte de los enlaces ópticos con modulación PAM-8 y las bases teóricas para el diseño.

En el capítulo III se describe la metodología utilizada para el desarrollo de esta tesis.

En el capítulo IV se presenta la propuesta de diseño y solución con la información bibliográfica obtenida. Al final se detallan los resultados obtenidos, as conclusiones y

recomendaciones de acuerdo con la investigación presentada.

## **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Formulación del problema**

Las tecnologías de interconexión óptica se han utilizado ampliamente en comunicaciones de corto alcance desde o dentro de los data centers o computadores de alto rendimiento y a su vez el aumento de tráfico de datos, el aumento del tamaño de los data centers y la interconectividad a sectores remotos obligan a tener interconexiones ópticas más avanzadas que proporcionen una mejor velocidad, eficiencia energética y distancia de alcance (Sun, y otros, 2019).

Para alcanzar altas tasas de transmisión se puede trabajar con receptores coherentes o no-coherentes y usar modulaciones avanzadas que varíen la amplitud o la fase, que permitan aumentar la velocidad de transmisión disminuyendo el efecto de la dispersión ocasionada por las no-linealidades de la fibra como la dispersión cromática y la dispersión por polarización.

La modulación multiniveles PAM-N permite trabajar con receptores más simples en comparación con los receptores coherentes mejorando la eficiencia espectral y multiplicando por N la tasa de bits enviados con el mismo ancho de banda que si se trabajara con modulaciones binarias. PAM-N mejora el rendimiento y la velocidad de transmisión (Ahmed & Mahmood, 2018).

A mayores bits enviados por baudio en PAM-N mayor será la velocidad de transmisión, pero también se incrementa la sensibilidad de estos al ruido y a la atenuación, PAM-8 es una solución atractiva pero el problema radica en como diseñar el enlace y como mejorar el nivel de potencia en el receptor para tener valores de BER menores de  $1e-3$  a tasas de transmisión de 1,6 Tb/s para entornos urbanos densos en la interconexión de data centers.

## **1.2. Objetivos de la Investigación**

### **Objetivo General**

Diseñar y simular un enlace óptico que emplee modulación PAM-8 para conectar Data Centers que se encuentren a corta distancia a una velocidad de 1.6 Tb/s.

### **Objetivos Específicos**

- Analizar el estado del arte de enlaces ópticos que trabajan con PAM-8.
- Diseñar un enlace óptico PAM-8 a una velocidad de transmisión de 1.6 Tb/s.
- Simular el enlace óptico PAM-8 a una velocidad de transmisión de 1.6 Tb/s.
- Analizar los resultados obtenidos para determinar el desempeño del enlace óptico PAM-8.

## **1.3. Justificación de la Investigación**

En las últimas décadas la demanda de ancho de banda de la red de acceso aumenta a una tasa promedio de 1,5 veces debido al crecimiento de aplicaciones como la computación en la nube, la realidad virtual, la mejora en la calidad de los videos de 4K a 8 K, transmisiones vía streaming, el desarrollo del entretenimiento como video juegos en línea y el incremento de servicios que demandan un gran ancho de banda obligando a que la capacidad de la red de acceso aumente. (Houtsma & Van Veen, 2017). Además, algunas ciudades han empezado a migrar hacia modelos inteligentes trayendo consigo entornos urbanos densos por el despliegue de una enorme cantidad de sensores y la explotación de las tecnologías de la información convirtiendo a los servicios públicos más interactivos, accesibles y eficientes. Una ciudad inteligente generará flujos gigantescos de información provenientes de los sensores desplegados por la toda la ciudad (Arevalo, Villavicencio, & Flores, 2019). Por lo que es imprescindible el estudio de técnicas que implementadas en las redes de acceso PON consigan incrementar la velocidad de transmisión. Técnicas de modulación avanzadas mejoran la eficiencia del espectro al enviar más de un bit por símbolo, aunque se debe tener en cuenta que con el incremento de la velocidad de transmisión también aumenta el efecto de la dispersión sobre ella, lo cual provoca que se degraden de los símbolos enviados aumentando los bits errados en el receptor por lo que se ve limitada la velocidad de transmisión.

El propósito de esta investigación es realizar el diseño y la simulación de un enlace

PAM-8 a una velocidad de 1,6Tb/s la cual que permita mejorar el uso y servicios y aplicaciones que demanden gran ancho de banda.

## CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1. Antecedentes de la Investigación

Las PON han tenido un incremento exponencial en los últimos años permitiendo tener conectividad con velocidades altas y con bajos costos. Como base para esta investigación se utiliza la información proporcionada en (Arevalo, Villavicencio, & Flores, 2019) en la cual se realizó un análisis del desempeño de un enlace óptico trabajando con modulación multinivel PAM-4 mediante la simulación en OptiSystem, transmitiendo datos a una velocidad de 10 GB/s con distancias de 20km y 45 km.

En el artículo de (Sun, y otros, 2019) demostraron que se puede obtener ganancias de SNR de 1,74 dB para PAM-4 y PAM-8 respectivamente para lograr un enlace sin errores ajustando a un 20% FEC óptimo. Estas distribuciones fijas pueden ofrecer un rango SNR considerablemente amplio (10,3–16,7 dB para PAM-4 y 13,4–24,6 dB para PAM-8).

En el estudio de (Zhou, y otros, 2020) trabajaron con un WDM-PON codificado con verificación de paridad de baja densidad incluyendo PAM-8 con conformación probabilística, sobre fibra monomodo estándar con una distancia de transmisión de 20 km con detección directa donde cada portadora óptica transporta una señal PS-PAM8 codificada en LDPC con forma probabilística de 20 Gbaudios desde una señal PAM16 uniforme convencional siguiendo una distribución gaussiana. Obteniendo una sensibilidad de potencia en el receptor de 1,48 dB y una optimización de la potencia de fibra de 1,7 dB mediante el uso de señales PSPAM8 codificadas en LDPC en WDM-PON lo que puede brindar una mayor eficiencia espectral y mejora en el presupuesto de pérdida de potencia para las redes de distribución óptica.

En el artículo de (Che & Chen, 2022) se estudió PAM-4 la cual es ampliamente implementada en aplicaciones de data centers. Se basaron en el uso de PAM-4 a una velocidad de 100 GBd, la interfaz óptica de 200 G por carril se está desarrollando activamente tanto en grupos de interoperabilidad industrial como en organismos estándar. Con un ancho de banda limitado una opción es mejorar la eficiencia espectral mediante formatos de orden superior como PAM-6 y PAM-8, pero esto provoca una incompatibilidad hacia atrás, así como un

posible desajuste de modulación entre las interfaces eléctrica y ópticas. Realizaron comparaciones de la tasa de información alcanzable entre PAM-4 y la modulación de orden superior dentro del límite de Nyquist en diferentes condiciones de canal. Con PAM-6 y PAM-8 se mejora la tasa de bits con un máximo en un 29 % y 50% respectivamente.

Por otra parte (Zhang, y otros, 2018) trabajaron con el método de pre-distorsión no lineal de tabla de búsqueda modificada (LUT) con el cual el número de patrones y el cálculo la complejidad se puede reducir a la mitad. Demostraron que con PAM-8 y con una transmisión de modulación y detección directa usando una fibra de 15 km con un láser directamente modulado (DML) se tiene una mejora de la sensibilidad del receptor de alrededor de 1 dB con una tasa de bits erróneos de  $3,8e-3$ . También demostraron que cuando se utiliza LUT modificado con Pre-EQ el rendimiento de las señales PAM-8 tiene una mejora similar en comparación con LUT normal con Pre-EQ.

En el estudio de (Xi, y otros, 2021) presentan un ecualizador solo con un hiperplano de entrenamiento de una sola máquina de vector de soporte (SVM) para compensar la distorsión de las señales PAM-M multiclase en una red óptica pasiva de próxima generación de ancho de banda limitado de bajo costo (NG- sistema PON). En el experimento se trabajaron con una transmisión de 50 Gb/s PAM-4/8 por longitud de onda con óptica de 10 G en un sistema PON de fibra monomodo estándar (SSMF) de 20 km se configura y utiliza para manifestar la viabilidad y eficacia del diseño.

En el artículo de (Hu, y otros, 2022) estudiaron la modulación, transmisión y recepción de señales ópticas multinivel con una velocidad de símbolo ultra alta hasta 304 GBd con dos diferentes esquemas de señalización con PAM-8 el rendimiento de un esquema de codificación de corrección de errores de reenvío (FEC) concatenado de decisión suave (SD) y decisión dura (HD). Para una tasa neta de bits neta de 363,4 Gbit/s se consigue con PAM-8 y 279,0 Gbit/s con señalización tetrabinaria con una distancia de enlace de 10 km en una fibra monomodo estándar.

## 2.2. Bases Teóricas.

### 2.2.1. La fibra óptica

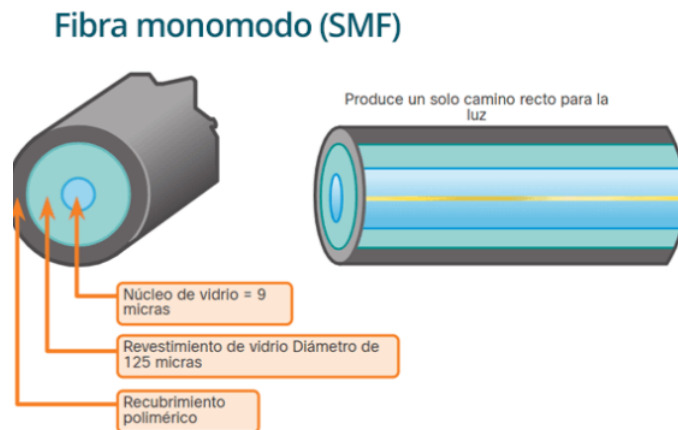
La fibra óptica es un medio de transmisión empleado en redes de datos de altas tasas de transmisión, es un filamento cilíndrico, dieléctrico, transparente y flexible construido principalmente de vidrio o plástico siendo un medio físico óptimo para transmitir datos de un lugar a otro a grandes velocidades cubriendo distancias mucho mayores que otros medios (García & Falconí, 2018).

#### 2.2.1.1. Fibra óptica monomodo

La fibra monomodo tiene el diámetro de su núcleo reducido por lo que solo un haz de luz puede viajar directamente sin reflexión por el centro de esta, haciendo que su ancho de banda sea elevado siendo utilizada en enlaces de grandes distancias. Tiene una banda de paso del orden de los 100 GHz/km, aunque es la más compleja y costosa de implementar permite tener una mayor cobertura en distancia para la transmisión (García & Falconí, 2018).

### Figura 1

*Fibra monomodo*



*Nota:* Adaptado de *Cableado de Fibra Óptica* [Imagen], de CCNA desde cero, (<https://ccnadesdecero.es/cableado-fibra-optica/>). CC BY 2.0

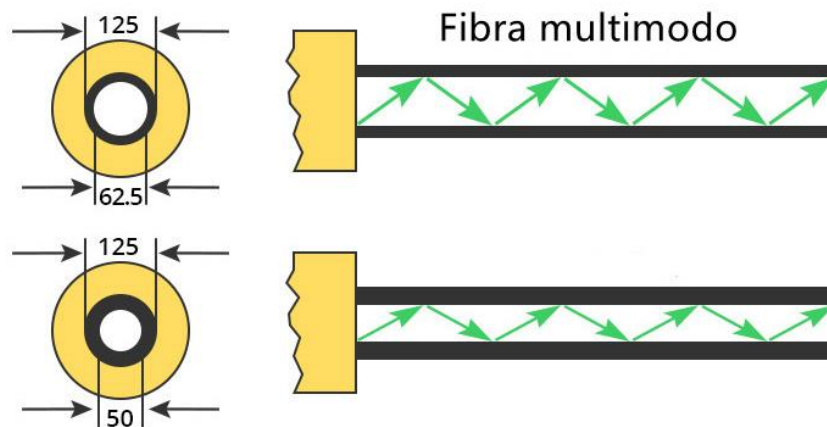
#### 2.2.1.2. Fibra óptica multimodo

Este tipo de fibra óptica permite enviar varios haces de luz a través de ella los cuales

se propagan por caminos diferentes haciendo que no todos lleguen al mismo instante de tiempo al receptor ocasionando la dispersión la cual hace que el ancho de banda sea inferior al de las fibras monomodo. Las fibras multimodo tienen un costo inferior siendo muy utilizadas para comunicaciones de hasta 10 Km. Su núcleo tiene un índice de refracción superior, pero del mismo orden de magnitud que el revestimiento. Por su gran tamaño del núcleo es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión (García & Falconí, 2018).

**Figura 2**

*Fibra multimodo*



*Nota:* Adaptado de *Definición, tipos y características de la fibra multimodo* [Imagen], Community, 2021, (<https://community.fs.com/es/blog/advantages-and-disadvantages-of-multimode-fiber.html>). CC BY 2.0

## 2.2.2. Propiedades de la fibra óptica

Hay que tomar en cuenta algunas propiedades de la fibra antes de realizar un diseño como son la atenuación y algunos efectos negativos producidos por las no linealidades como la dispersión cromática. El cálculo de estas nos ayudará a encontrar mecanismos para la mejora del rendimiento del enlace (García & Falconí, 2018).

### 2.2.2.1. Atenuación

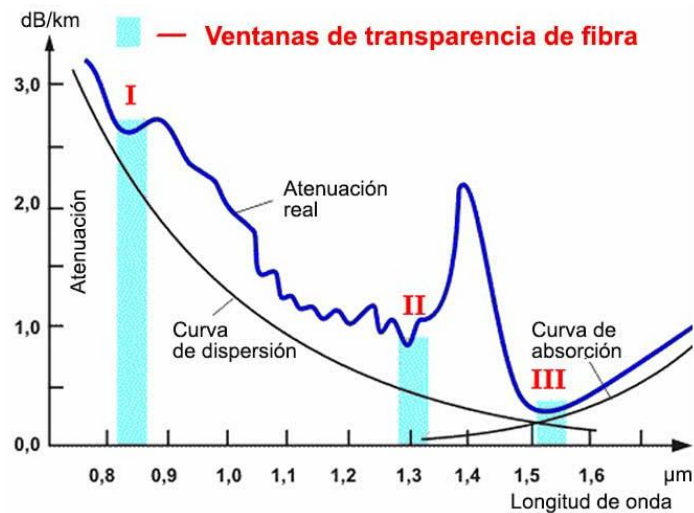
Es la pérdida en potencia óptica de la señal de luz al pasar por una fibra, esta pérdida incrementa con el aumento de la distancia del enlace y se la mide en  $\frac{dB}{Km}$ . Mientras más largo sea un enlace mayor será la pérdida por atenuación, a su vez mientras mejor calidad de los

materiales de la fibra menor será su pérdida en atenuación.

La figura 3 muestra la curva de atenuación en una fibra de silicio. Se observa como la atenuación aumenta con la longitud de onda a la que se transmite. (García & Falconí, 2018).

### Figura 3

*Curva de pérdidas causadas por atenuación*



*Nota:* Adaptado de *Mediciones en la fibra óptica* [Imagen], Toolboom, 22018,

(<https://toolboom.com/es/articles-and-video/fiber-optic-measurements-otdr-trace-recording-and-analysis/>) CC BY 2.0

#### 2.2.2.2. Dispersión cromática

La luz enviada a través de las fibras ópticas está formada de la suma de varias longitudes de onda, el índice de refracción del núcleo de la fibra cambia con respecto a cada longitud de onda que viaja a través de ella ocasionando velocidades diferentes, si se las descompone en función del tiempo se obtiene un retardo entre las diferentes longitudes de onda en el receptor aun cuando hayan sido enviadas al mismo tiempo (Castañeda, 2018).

Para longitudes de onda en los cuales su dispersión cromática sea alta cada pulso enviado se ensanchan en tiempo provocando interferencia con otros pulsos enviados. La dispersión cromática es la suma de la dispersión propia del material y la dispersión causada por la estructura de la guía de onda. (Castañeda, 2018).

#### 2.2.2.3. Dispersión por modo de polarización

La polarización es la propiedad que tiene la luz de tomar direcciones en sus

vibraciones. La luz que viaja a través de una en una fibra óptica tiene dos modos de polarización.

El modo en el eje de las X es denominado un modo lento, mientras que en el eje de las Y es denominado un modo rápido. La dispersion por modo de polarización es la diferencia en los tiempos de llegada en cada modo y su unidad de medida es en pico segundos (Castañeda, 2018).

#### 2.2.2.4. Transmisores ópticos

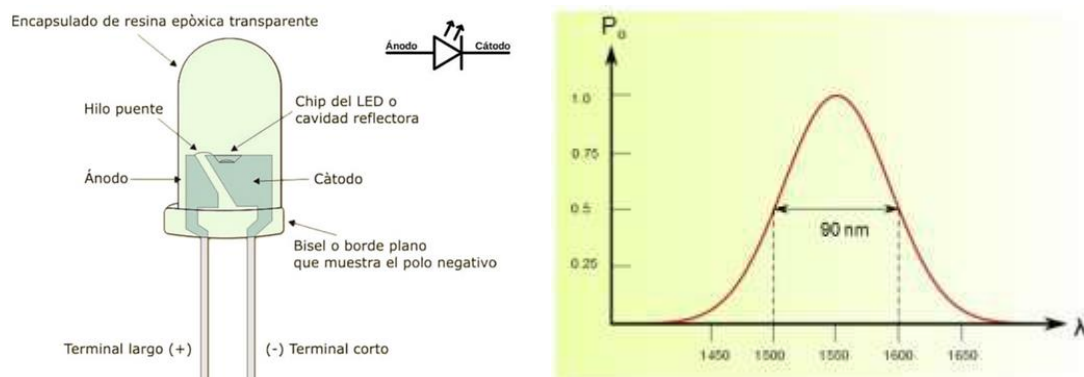
Son los dispositivos que originan la luz que será enviada por la fibra óptica la misma que lleva la información de los bits transmitidos, pueden ser diodos led o diodos laser.

#### 2.2.2.5. Diodos led

Estos utilizan una corriente de 50 a 100 mA y su velocidad de respuesta es lenta, solo se puede usar en fibras multimodo, su ventaja es que son económicos, de fácil uso y su tiempo de vida es muy grande (García & Falconí, 2018).

**Figura 4**

*Diodo Led*



*Nota:* Adaptado de *Diodo Led* [Imagen], Bravo Barahona & Sánchez González, 2012, (<https://tallerelectronica.com/diodo-led/>) CC BY 2.0

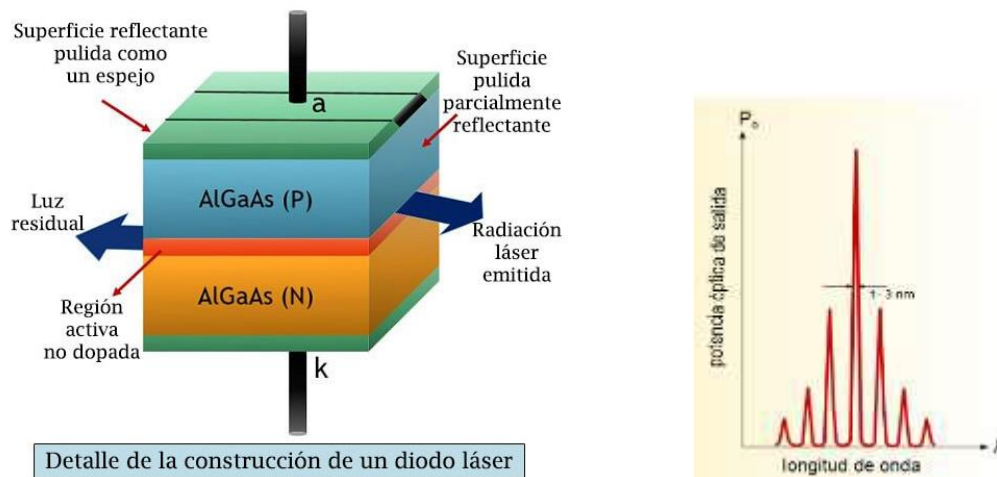
#### 2.2.2.6. Diodos laser

Este tipo de diodos a diferencia del led trabaja con una corriente eléctrica entre los 5 a 40 mA, tienen una velocidad de respuesta alta, son costosos, su tiempo de vida es menor comparado con los diodos led, su uso es difícil, pero se los puede usar tanto en fibras monomodo como multimodo, su haz de luz es más directivo que la del diodo led siendo la

mejor opción para transmitir a altas velocidades. (García & Falconí, 2018).

## Figura 5

### Diodo Láser



Nota: Adaptado de *¿Qué es un Diodo Láser y Cómo Funciona?* [Imagen], Electrónica online, (<https://electronicaonline.net/componentes-electronicos/diodo/diodo-laser/>) CC BY 2.0

### 2.2.3. Receptores ópticos

El receptor está compuesto por un foto diodo receptor el cual convierte las señales que llegan por la fibra óptica en señales eléctricas, su trabajo es obtener una corriente a partir de la luz modulada incidente siendo esta proporcional a la potencia recibida del haz de luz (García & Falconí, 2018).

La corriente inversa producida cuando no se trasmite luz debe ser pequeña para poder detectar señales débiles caso contrario no se las podrá detectar teniendo el foto receptor una sensibilidad baja. Deben tener una respuesta de detección alta y un nivel de ruido bajo. Existen dos tipos de foto receptores:

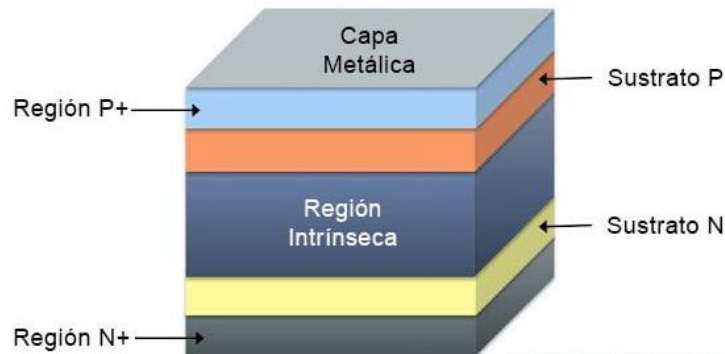
#### 2.2.3.1. Detectores PIN

Se componen de una unión P-N y entre esa unión se intercala una nueva zona de material intrínseco (I), la cual mejora la eficacia del detector. Se utiliza principalmente en sistemas que permiten una fácil discriminación entre posibles niveles de luz y en distancias

cortas (García & Falconí, 2018).

## Figura 6

### *Diodo Pin*



Nota: Adaptado de *Diodo PIN* [Imagen], Electrónica online,

(<https://electronicaonline.net/componentes-electronicos/diodo/diodo-pin/>) CC BY 2.0

### 2.2.3.2. Detectores APD

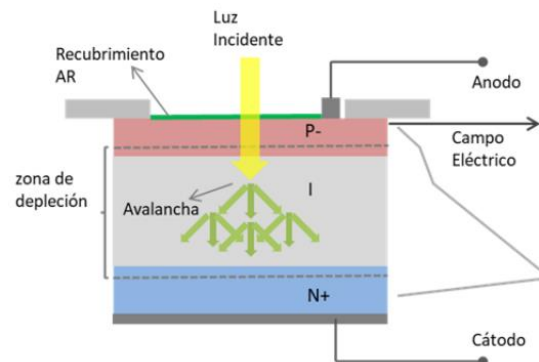
La foto detectores APD son detectores PIN incrementados en ganancia aprovechando el principio de avalancha el cual consiste en chocar un electrón a gran velocidad contra un átomo con el fin de arrancarle otro electrón. Son diez veces más sensibles que un PIN y necesitan menos amplificación adicional. Una de sus ventajas es que tienen velocidades de respuesta mayor lo que facilita la transmisión a velocidades altas. Una desventaja es que sus tiempos de transición son demasiados altos y su vida útil en comparación a un PIN es baja. (García & Falconí, 2018).

Son contruidos de dos tipos de materiales:

- APD contruidos con silicio que presentan un nivel de ruido bajo facilitando la detección de señales muy débiles. Trabajan con un voltaje de alimentación de entre 200 a 300 voltios.
- APD contruidos de germanio que trabajan a longitudes de onda entre 1000 y 1300 nm.

## Figura 7

### Diodo APD



Nota: Adaptado de *Fotodiodos: PN, PIN, APD* [Imagen], Marco Petriella, 2018

(<http://materias.df.uba.ar/instru2018c2/files/2012/07/Fotodiodos.pdf>) CC BY 2.0

#### 2.2.4. Modulación en enlaces ópticos

Se define como el proceso que modifica una señal con el fin de codificar información sobre una señal portadora en este caso una onda de luz. Se puede modular de acuerdo con su fase, con su frecuencia, con su polarización y con su amplitud, pueden ser directa o indirecta dependiendo de donde se realiza la modulación. La primera modulación y la más simple de implementar es la directa, se la realiza en el transmisor óptico encendiendo y apagando el mismo. La modulación externa en cambio trabaja con un modulador separado del dispositivo transmisor el cual modifica una o más características de la señal, en este caso el transmisor siempre está encendido de esta manera se alarga la vida útil del diodo led o láser (Carriel & Teófilo, 2022).

##### 2.2.4.1. Esquemas de modulación

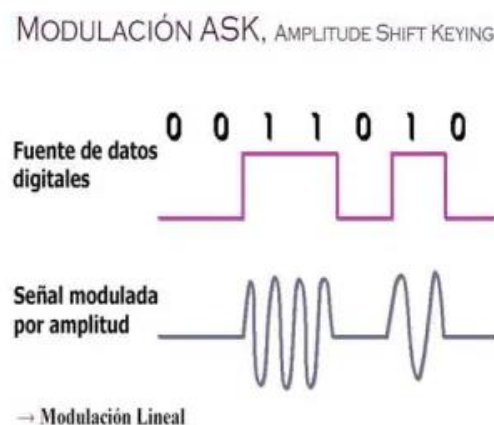
Es el proceso por el cual algunas de las características de una portadora cambian de acuerdo con una señal moduladora. La modulación óptica es un proceso que cambia los parámetros de campo de una señal, de ahí nacen diferentes técnicas de modulación. Se tienen tres esquemas analógicos básicos que son la modulación de amplitud (AM) que varía la señal portadora solo en amplitud, la modulación de frecuencia (FM) que varía solo la frecuencia de la señal portadora y la modulación de fase (PM) que varía las fases por cada símbolo. Sus similares en señales digitales son ASK, FSK y PSK (Carriel & Teófilo, 2022).

### 2.2.4.2. Modulación digital en amplitud

Con la modulación en amplitud una señal portadora analógica varía conforme a la corriente de bit (modulando la señal), manteniendo la frecuencia y la fase constante, por consiguiente, el nivel de amplitud puede ser usado para representar los valores binarios 0 y 1. La magnitud de la señal cambia lo que se interpreta como información, esta varía en el tiempo dando como resultado la modulación ASK (amplitude-shift keying). La modulación ASK se la conoce como OOK (on-off keying) en la que para representar un bit con valor uno se enciende la señal y un bit con valor cero se apaga la señal. OOK es una modulación de dos niveles por tal motivo tiene el mismo funcionamiento de una modulación en PAM-2 (Carriel & Teófilo, 2022).

### Figura 8

*Modulación digital ASK*



*Nota:* Adaptado de *Modulación ASK* [Imagen], TELECOMUNICACIONESITSTULUM, (<https://u6dispositivosdecomunicacionitstulum.wordpress.com/3-2-1-modulacion-por-desplazamiento-de-amplitud/>) CC BY 2.0

La modulación ASK puede ser multinivel al utilizar diferentes valores discretos de señal para representar diferentes combinaciones de bits denominados símbolos de ahí nace las combinaciones de PAM-4 y PAM-8.

### 2.2.4.3. Modulación en amplitud de pulso PAM

Al variar la amplitud de la señal portadora se obtiene la modulación de amplitud de pulso (PAM), variando el ancho del pulso se obtiene la modulación de ancho de pulso

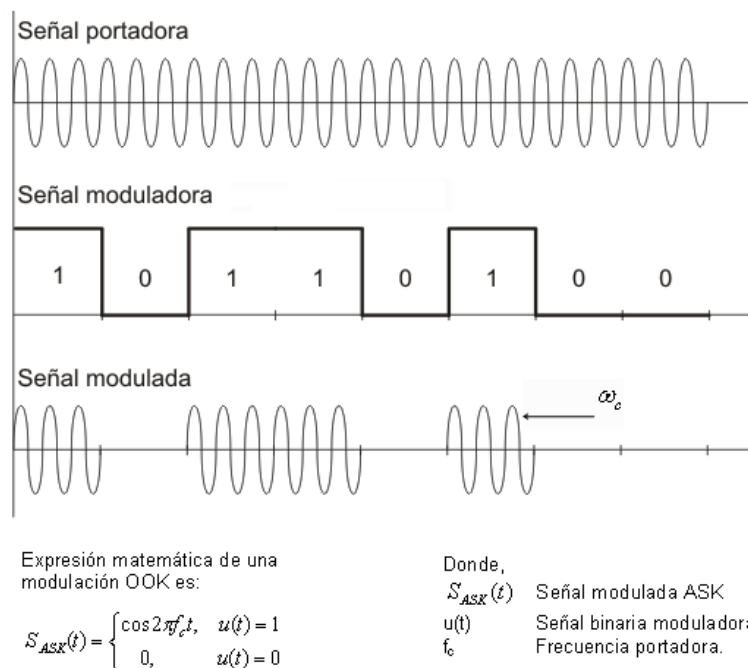
(PWM) y al variar la posición, la amplitud y la duración se obtiene la modulación de posición de pulso (PPM) (Carriel & Teófilo, 2022). Las modulaciones en amplitud son las más sencillas de implementar y las de menos costo posicionándose como la mejor opción para el diseño de redes de transporte.

#### 2.2.4.4. Modulación OOK

On- Off keying es el proceso en el cual se enciende y se apaga el transmisor para tener dos estados lógicos siendo esta la modulación más simple ya que consiste en emitir un pulso de luz cuando se desea transmitir un uno lógico y la ausencia de luz para representar un cero lógico.

**Figura 9**

*Modulación OOK*



*Nota:* Adaptado de *Modulación Digital Pasa banda (ASK)* [Imagen], Mundo Teleco, 2014, (<https://mundotelecomunicaciones1.blogspot.com/2014/10/modulacion-digital-pasabanda-ask.html>) CC BY 2.0

Las variaciones de OOK son NRZ (no retorno a cero) y RZ (retorno a cero), con respecto a NRZ permite trabajar con un menor ancho de banda con respecto a RZ OOK, presenta inmunidad ante el ruido de fase, su transceptor es mucho más simple. La RZ OOK

hace énfasis en el ancho del pulso comparándolo con el periodo del tiempo. Si el pulso es del 100% del valor del tiempo se lo reconoce como RZ (Carriel & Teófilo, 2022).

#### 2.2.4.5. Modulación PAM

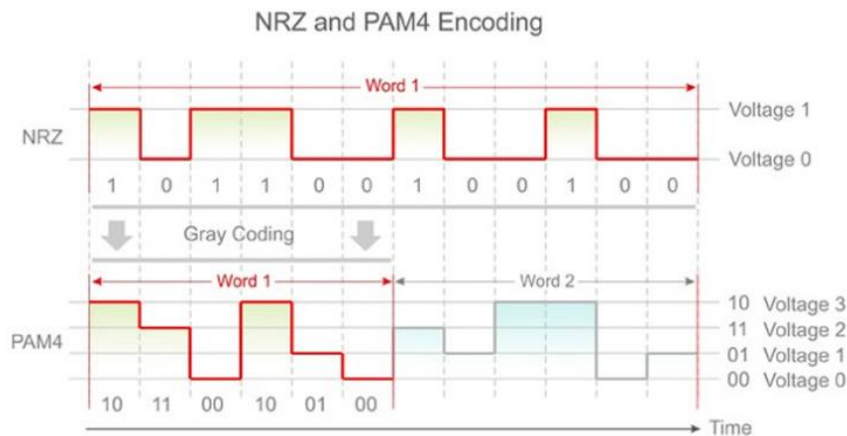
Con la modulación PAM (modulación de amplitud de pulso) los bits a transmitir se modulan en amplitud y esta variación transporta la información. PAM es un esquema multinivel en el cual inicia con un OOK, PAM-4 y PAM-8 (Pardo, Yopez, & Castillo, 2018).

##### 2.2.4.5.1. Modulación PAM 4

Es la variación de OOK en la cual se modula sobre cuatro niveles de amplitud PAM-4 de esta manera se consigue duplicar la velocidad de bits en el canal de transmisión sin la necesidad de duplicar el ancho de banda necesario. Cada nivel se compone de dos bits denominados baudios (Costales, 2020).

**Figura 10**

*Modulación OOK con NRZ*



*Nota: Adaptado de El nuevo mundo de 400 Gbps Ethernet*

[Imagen], FOCC, 2019, (<http://www.fibresplitter.com/info/the-new-world-of-400-gbps-ethernet-38685944.html>) CC BY 2.0

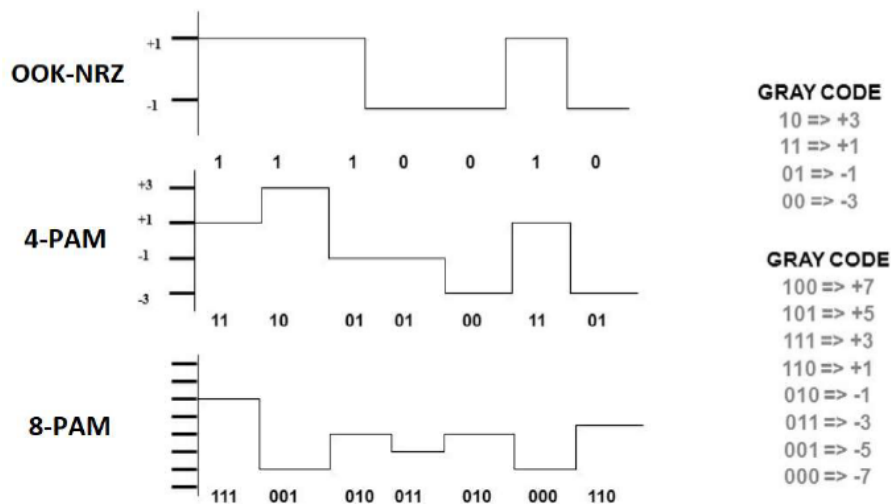
##### 2.2.4.5.2. Modulación PAM 8

La modulación PAM 8 similar a la PAM 4 trabaja con niveles en este caso con 8

duplicando la cantidad de bits que se envían en PAM 4 y a su vez su velocidad, aunque el aumento de niveles lo vuelve muy susceptible al ruido por lo que no se recomienda para largas distancia (Costales, 2020).

**Figura 11**

*Modulación PAM*



*Nota:* Adaptado de *Anatomy of a 112-Gbps ADC/DSP Long-Reach SerDes PHY* [Imagen], EEWeb, 2019, (<https://www.eeweb.com/anatomy-of-a-112-gbps-adc-dsp-long-reach-serdes-phy/>) CC BY 2.0

### 2.2.5. BER (tasa de bits errados)

Para poder determinar el comportamiento de los enlaces de transmisión y saber cuan bueno es el mismo se usan diferentes técnicas de medición de desempeño, una de ellas es el Bit Error Rate BER (Tasa de errores en transmisión) en la cual determina en cierta medida la calidad del enlace de transmisión. Al comparar la cantidad de bits erróneos sobre los transmitidos. Otro método para determinar el desempeño del enlace es obteniendo la relación Señal a ruido de éste (SNR) o bien la atenuación que experimenta una señal entre el extremo transmisor y el receptor. Para facilitar el análisis se trabaja con los pulsos de ondas que se propagan, de esta manera se puede observar sus formas, niveles de ruido, desfases en tiempo o jitter y su potencia, todas ellas dentro de un mismo esquema denominado diagrama de ojo (Carriel & Teófilo, 2022).

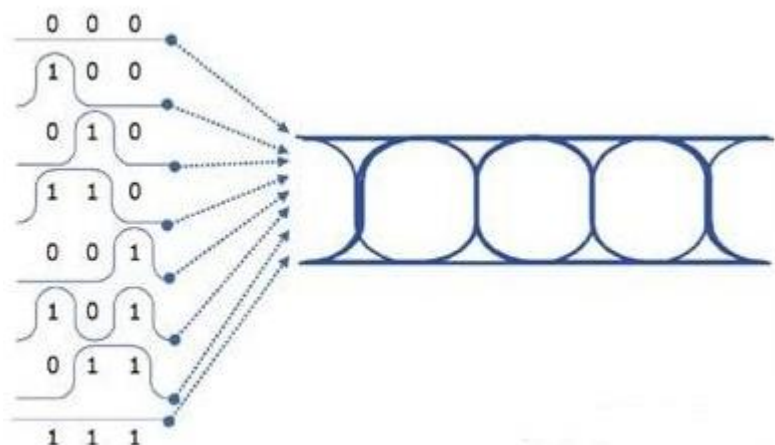
### 2.2.6. Diagrama del ojo

Es la superposición de los pulsos enviados a través del enlace, sus diferentes combinaciones dibujan un diagrama en forma de ojos estos creados al pasar de unos a ceros en un rango de tiempo en específico. El diagrama se lo consigue muestreando la señal recibida dentro de un osciloscopio (Carriel & Teófilo, 2022).

Gracias a la capacidad de los diagramas de ojo para representar la superposición de varias señales simultáneamente es que son conocidos como patrones multi-valores ya que cada punto en el eje del tiempo tiene asociado múltiples niveles de voltaje (Carriel & Teófilo, 2022).

**Figura 12**

*Diagrama del ojo*



*Nota:* Adaptado de *Que es un diagrama de ojo* [Imagen], Programador Clic,

(<https://programmerclick.com/article/50171415791/>) CC BY 2.0

Del diagrama del ojo se determina la calidad del enlace de acuerdo con los siguientes parámetros:

- Del ancho de la apertura del ojo principal se mide el tiempo en el que se puede muestrear la señal sin errores. El muestreo se lo debe hacer cuando el ojo está más abierto de esta manera se asegura un buen umbral para la demodulación.
- Ante la ausencia de interferencia los ojos tienen una buena apertura facilitando la demodulación, pero ante la presencia de interferencia entre símbolos los ojos se cierran disminuyendo el umbral y complicando la demodulación.

- Teniendo una buena apertura en los ojos se puede tener una transmisión de datos en la cual la cantidad de errores sea baja volviendo al enlace confiable.
- Para determinar la inmunidad al ruido se trabaja con la altura del ojo, mientras más alto sea este valor más inmune al ruido será el enlace.
- Si el ojo está cerrado o tiene un nivel de apertura muy bajo indica que al enlace lo están afectando no linealidades.
- Cuando se trabaja con varios niveles para la modulación el efecto de interferencia entre símbolos aumenta y se lo puede confirmar en el diagrama ya que la parte superior del ojo se cruza con la parte inferior, visualmente esto implica cierre del ojo.

### **2.2.6.1. Propiedades del diagrama del ojo**

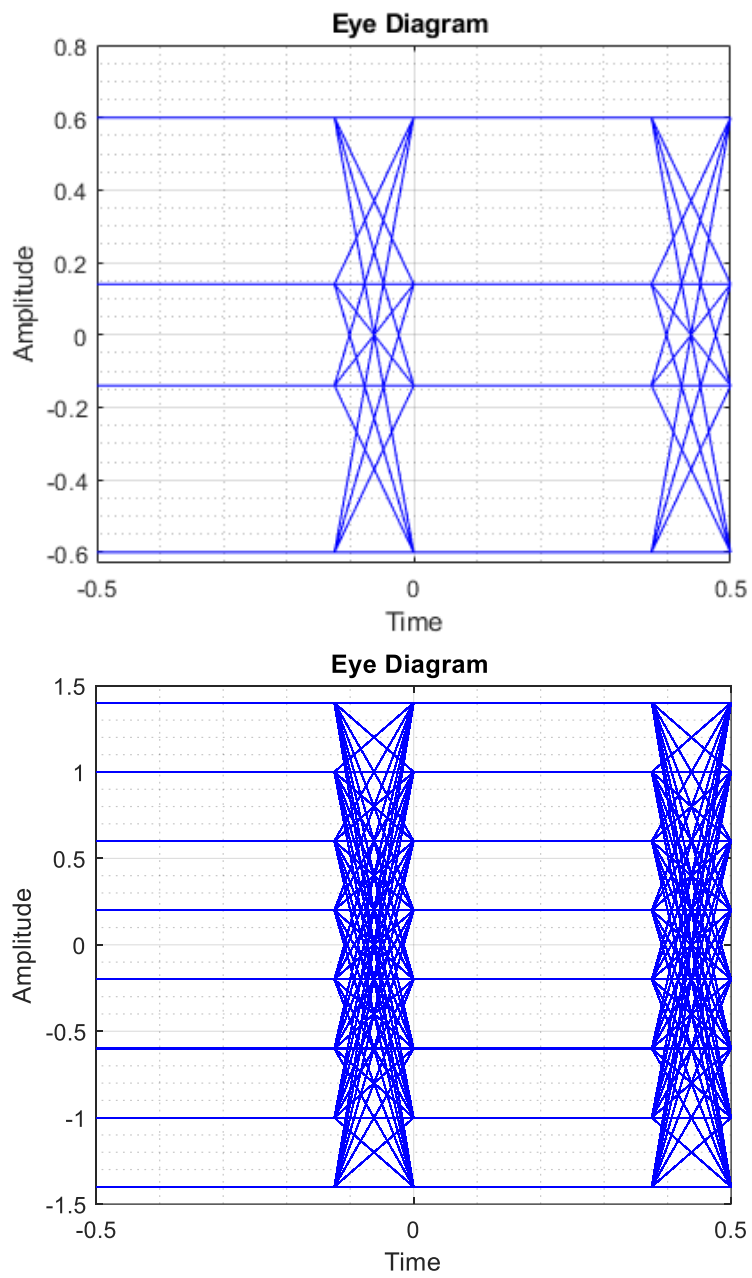
**Nivel uno:** especifica la medición del valor promedio del nivel de un uno lógico, se genera un histograma con los distintos valores del pulso y luego se considera una delgada zona del ancho del pulso obteniendo el valor promedio del nivel uno de dicho pulso.

**Nivel cero:** especifica la medida del valor medio del nivel cero lógicos.

**Cruce de ojos:** consiste en el tiempo de cruce y el cruce de amplitud. El cruce de tiempo hace referencia al tiempo en el que se produce la apertura del ojo y su posterior cierre y a su vez el cruce de amplitud al nivel de voltaje en el cual se produce la apertura del ojo y su posterior cierre. Considerando estos dos parámetros se define el tiempo de bit que corresponde al período entre la apertura y cierre del ojo (Carriel & Teófilo, 2022).

### Figura 13

Diagrama del ojo en modulación PAM-4 y PAM-8



## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA**

### **3.1. Tipo de Investigación**

Se trabaja como base la investigación descriptiva y a su vez con un enfoque cuantitativo para el manejo de los resultados obtenidos del BER (bit error rate) el cual determina cual bueno es un enlace de transmisión y cuan buenos son los mecanismos implementados en la modulación PAM-8 a velocidades de 150, 200 y 300 Gb/s para paralelizar láseres y llegar a una velocidad de 1,6 Tb/s. El valor de BER mínimo a alcanzar es de  $10e-3$  y el objetivo es de  $10e-6$ , además del método experimental el cual permite realizar una comparación y de determinar si PAM-8 tiene un mejor desempeño que PAM-4.

### **3.2. Diseño de Investigación**

Para el diseño de la investigación y con el fin de cumplir los objetivos planteados se utiliza un enfoque experimental manipulando la variable independiente en busca que la variable dependiente llegue a un nivel adecuado para que la transmisión sea óptima. Con esto realizar el análisis de los resultados obtenidos desde Matlab y Optisystem

### **3.3. Unidades de Estudio**

Se define como unidad de estudio al desempeño de enlace óptico con modulación PAM-8 transmitiendo a velocidades de 150, 200 y 300 Gb/s para paralelizar láseres y llegar a una velocidad de 1,6 Tb/s.

#### **Población**

Se delimita la población del análisis que para este caso son los datos enviados a través del enlace óptico.

#### **Muestra**

Los datos enviados a través del enlace óptico se los utiliza para el cálculo del BER (bit error rate) y definir cuan bueno es el diseño con la modulación PAM-8.

### **3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para la obtención de datos del diseño se utilizará los módulos de medición del software Optisystem y Matlab para medir el nivel de potencia en el receptor (se utilizará un medidor de

potencia óptica) y para el cálculo del BER se utilizará la co-simulación entre Optisystem y Matlab.

### 3.5. Técnica de Análisis de Datos

Para el análisis se estructura los datos obtenidos en gráficas del BER y el diagrama del ojo. Los datos obtenidos serán analizados para verificar el nivel de mejora del BER con PAM-8.

### 3.6. Operacionalización de Variables

Para este caso la variable dependiente es el valor BER y la independiente es el valor de potencia en el receptor. Si la potencia en el receptor baja el BER también lo hará, si la potencia en el receptor es alta el valor de los errores disminuye el BER será mejor por lo que estas variables están relacionadas directamente, ambas representan el desempeño del enlace.

Tabla 1 Operacionalización de variables

<b>Variables por manejar</b>	<b>Indicador</b>	<b>Norma</b>
Valor de potencia en el receptor	Valores de potencia en el receptor que permitan tener un valor de BER mínimo de $1e-3$	Norma UIT- G.984.2 Redes ópticas pasivas con capacidad de gigabits - ITU
Tasa de bits erróneos (BER)	BER= cantidad de bits errados/cantidad de bits transmitidos	Norma UIT- G.984.2 Redes ópticas pasivas con capacidad de gigabits - ITU

Nota. Autor

## **CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL SISTEMA Y SUMULACIÓN**

En este capítulo se describe las etapas, elementos y procesos de la simulación realizada en co-simulación entre Matlab y optisystem.

### **4.1. Co-simulación Matlab-Optisystem**

Para la simulación se utilizó los softwares de Matlab como modulador y demodulador y optisystem para simular el envío de los datos a través de la fibra óptica y realizar el cálculo de la cantidad de bits erróneos.

#### **4.1.1. Optisystem**

Optisystem es un software que permite simular enlaces de fibra óptica ayudando a planificar, probar y simular casi todos los tipos de enlaces ópticos en la capa de transmisión de un amplio espectro de redes ópticas desde LAN, SAN, MAN hasta redes ultra largas desde los niveles de componentes facilitando el análisis visual del rendimiento del enlace. (Optiwave, 2022).

Dentro de sus beneficios tenemos:

- Proporciona información global del rendimiento del sistema.
- Permite evaluar los parámetros para ayudar en las especificaciones de tolerancia del diseño.
- Facilita el análisis gracias a su entorno visual.

Características (Optiwave, 2022):

Optisystem facilita una suite para el diseño y comunicación óptica fácil de usar y que contiene:

- Biblioteca de transmisores.
- Biblioteca de receptores.
- Fibras ópticas.
- Amplificadores.
- Herramientas de diseño de red.
- filtros pasivos.
- Procesamiento de la señal.

- Herramientas de diseño en espacio libre y espacio óptico.
- Herramientas para la visualización de señales.

Aplicaciones (Optiwave, 2022):

Optisystem permite el diseño múltiples soluciones de redes ópticas sobre tecnologías OTDM, OCDMA, anillos SONET/SDH manejando transmisiones monomodo o multimodo con formatos de modulación básicos como RZ, NRZ hasta modulaciones complejas como DPSK, QPSK, DP-QPSK, PM-QPSK, QAM-16, QAM-64. Para su uso Optisystem proporciona módulos de amplificadores y láseres como EDFAs, SOAs, Raman y láseres de fibra óptica.

Para determinar el desempeño del diseño del enlace facilita módulos de análisis de del diagrama de ojo, BER, potencia de señal, estados de polarización y diagramas de constelaciones.

Optisystem permite revisar parámetros de eficiencia de la simulación por lo que se diseña en bloques a la misma.

#### **4.1.2. Diagrama de bloques de la red PON**

El diseño de la red PON debe cumplir la condición de llegar a transmitir a una velocidad de 1,6 Tb/s. Este valor no se puede conseguir con un solo láser por lo que se debe paralelizar una cantidad adecuada de láseres para que el costo de implementación no sea tan grande, pero permita llegar a la velocidad deseada. Por este motivo es que se debe diseñar una red en la cual se aproveche al máximo la velocidad de transmisión y la potencia recibida.

El diseño está orientado a aplicaciones de transporte de datos y la opción más económica es utilizar modulaciones en intensidad que representan una menor complejidad que modulaciones coherentes como PSK, QAM que permiten llegar a velocidades altas con la desventaja que se debe utilizar complejos moduladores IQ y receptores coherentes en la recepción, elevando la complejidad en el diseño.

Trabajar solo con NRZ OOK no es lo conveniente por que necesitaría un ancho de banda demasiado elevado como para transmitir a velocidades de 200 o 300 Gb/s y de ahí paralizarlo para llegar a una velocidad de 1,6 Tb/s por eso se optó por PAM-4 y PAM-8 como modulaciones para demostrar que se puede tener velocidades altas con modulaciones en intensidad y con costos económicos menores.

Se decide trabajar sobre un enlace de fibra óptica de 40 Km de longitud y para

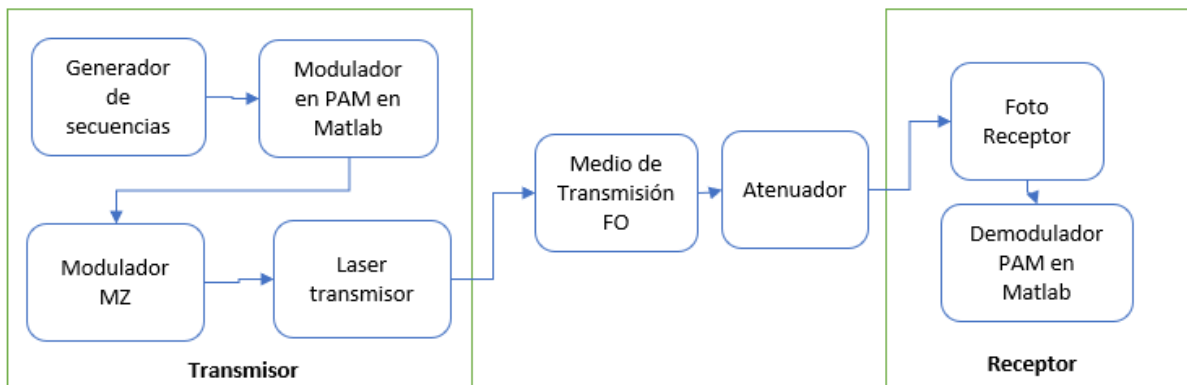
determinar que velocidad es la mejor opción para paralelizar láseres se opta por trabajar a 150, 200 y 300 Gb/s, con estas velocidades de acuerdo con la experimentación se podría paralelizar 10, 8 o 5 láseres para llegar a la velocidad planteada. PAM-4 y PAM-8 ayudarán a alcanzar esta velocidad gracias al envío de más de 1 bit por nivel que permite cada modulación. El diseño debe incluir un módulo de atenuación para validar el comportamiento de este y obtener los valores de los bits erróneos BER y determinar que modulación es más eficiente y que velocidad es la óptima para la paralelización de los láseres.

La simulación de la red PON se divide en 3 partes:

- El transmisor que contiene al generador de bits de secuencia, el modulador PAM diseñado en Matlab, un modulador MZ y el láser transmisor.
- EL medio de transmisión está constituido por la fibra óptica, para este caso se analiza con una longitud de 40 Km y su componente de compensación de dispersión y un atenuador de señal.
- El receptor que está compuesto por el fotodetector y el demodular PAM diseñado en MATLAB.
- Elementos de visualización que permiten revisar la potencia a la salida de los diferentes módulos y verificar la señal recibida.

**Figura 14**

*Diagrama de Bloques de la red PON*

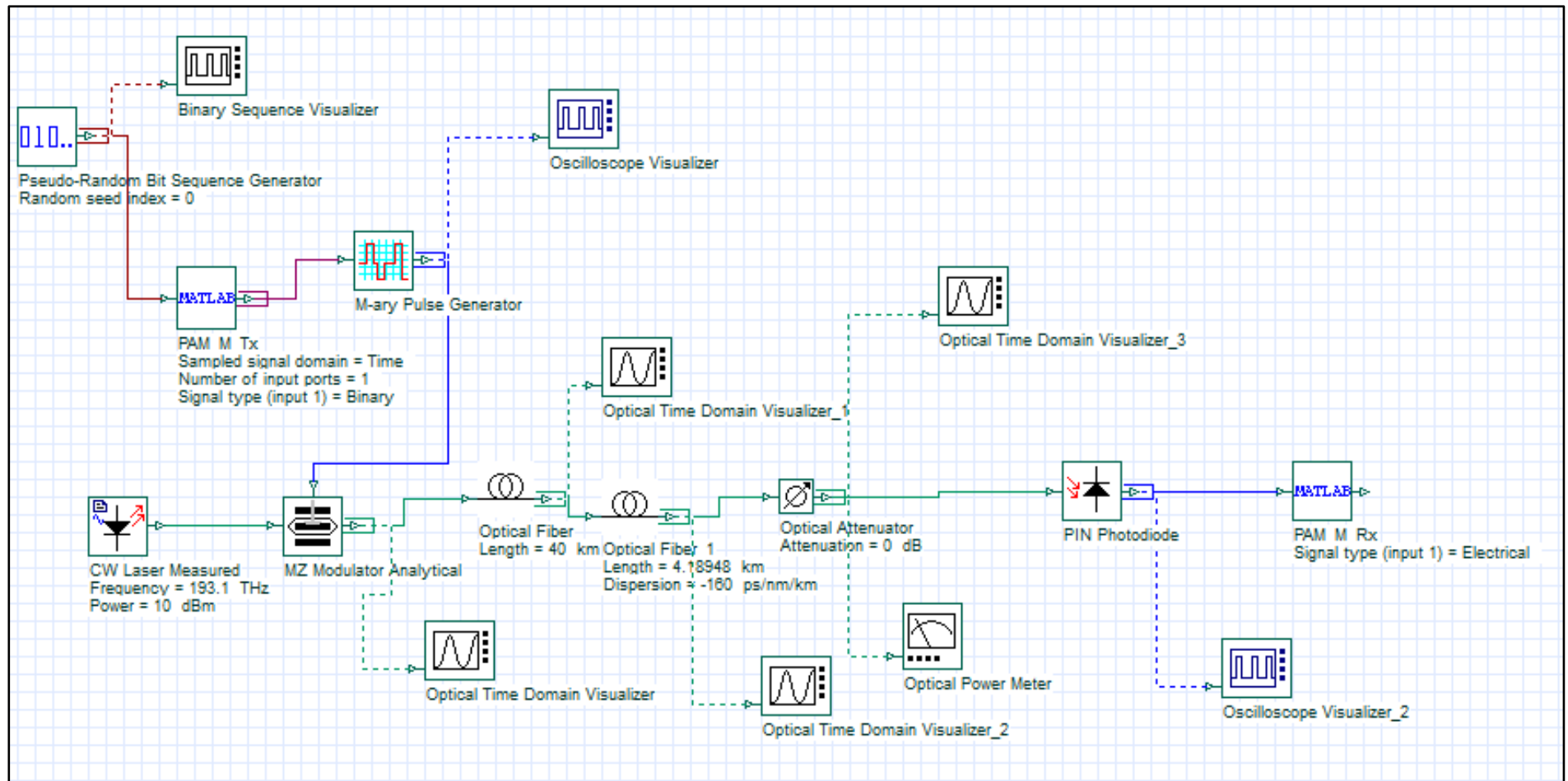


Se detalla cada parte de la simulación con sus componentes para poder transmitir los datos y calcular el valor de bits errados BER.

Para cumplir con el diagrama de bloques se diseñó la siguiente simulación en optisystem que permite enviar bits aleatorios a Matlab para que sean procesados, devueltos a optisystem, pasados por el medio de transmisión que es la fibra óptica para ser detectados por un fotodiodo y regresados nuevamente a Matlab para su análisis.

**Figura 15**

*Simulación de la red PON en Optisystem*



### 4.1.3. Descripción de los componentes de la red PON

#### 4.1.3.1. Transmisor

El transmisor está compuesto por elementos de optisystem y Matlab los cuales incluyen:

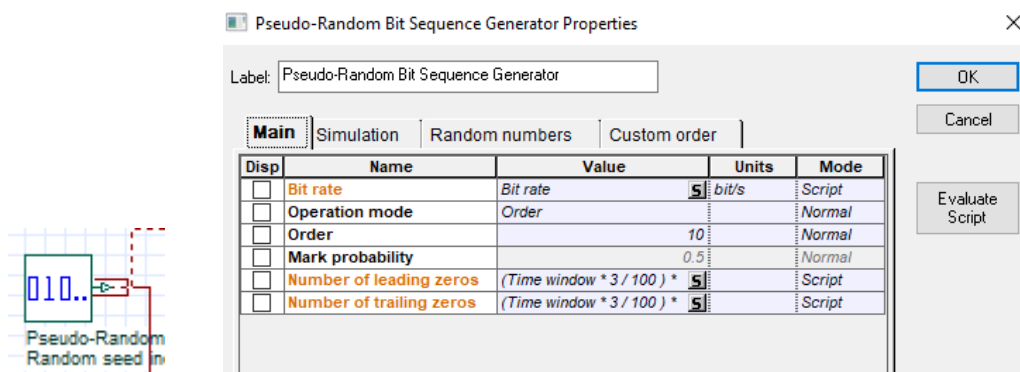
- Generador de secuencias de bits
- Modulador PAM en Matlab
- M-ary generador de pulsos
- Modulador MZ
- Laser transmisor

##### 4.1.3.1.1. Generador de secuencias de bits

Este módulo de optisystem permite generar una secuencia binaria de bits pseudoaleatorios que son los datos para transmitir (Optiwave, 2022).

**Figura 16**

*Generador de bits seudo aleatorios*



Al ingresar en las propiedades del módulo se puede cambiar la tasa de bits o poner una función para el cálculo de bits a generar. Los bits son enviados al módulo de Matlab para su tratamiento y modulación en PAM (Optiwave, 2022).

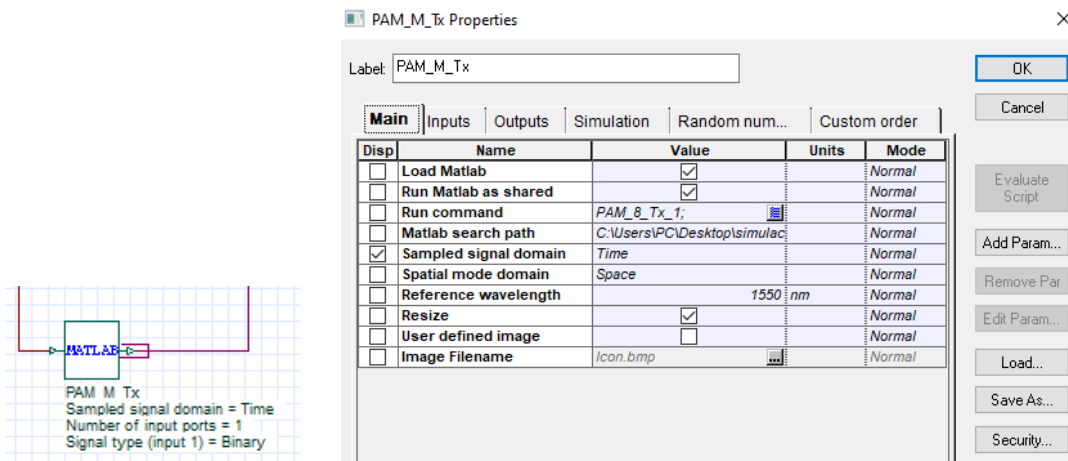
##### 4.1.3.1.2. Modulador PAM en Matlab

Este módulo permite la co-simulación entre Matlab y optisystem en el cual se setea el archivo .m que se genera en Matlab para que sea ejecutado con los bits seudo aleatorios

generados. Estos bits serán codificados para los niveles de PAM, se deja abierto el código para que se pueda seleccionar los niveles que se requieran analizar (2, 4 u 8 niveles PAM). El código tanto del modulador como el demodulador se lo detallará más adelante.

**Figura 17**

*Módulo de co-simulación Matlab*

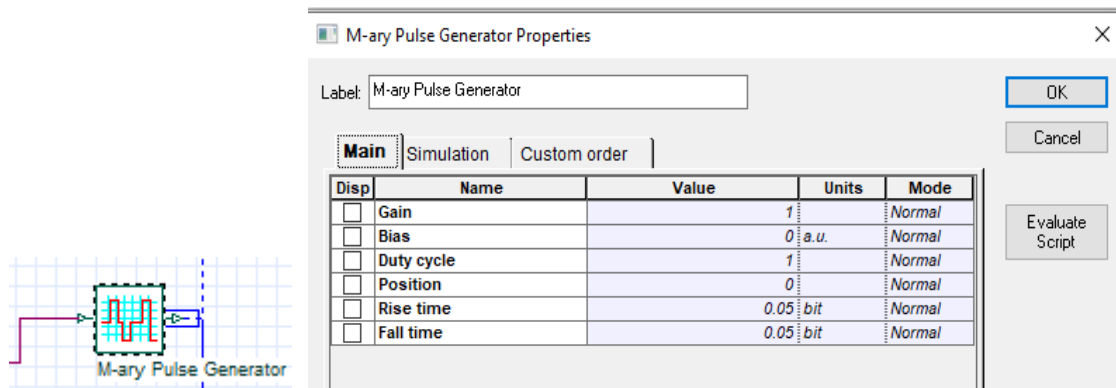


#### 4.1.3.1.3. Generador de pulsos M-ary

Este módulo genera pulsos multinivel de acuerdo con la señal de entrada que le envía Matlab. Se utiliza para modulaciones como PAM, QAM, PSK y DPSK siendo estas similares a una señal binaria con la diferencia que puede tener cualquier nivel (Optiwave, 2022).

**Figura 18**

*Generador de pulsos M-ary*

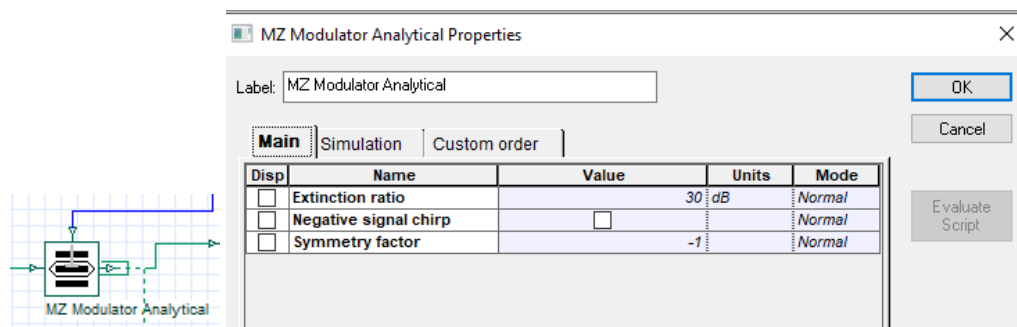


#### 4.1.3.1.4. Modulador MZ

Este módulo simula el funcionamiento de un modulador Mach-Zehnder el cual tiene dos entradas y una salida. La entrada óptica es la que se conecta desde el láser transmisor CW Laser Measured y la segunda es una entrada eléctrica la cual viene del generador pulsos M-ary el cual trae la información de la salida de Matlab (Optiwave, 2022).

**Figura 19**

*Modulador MZ*

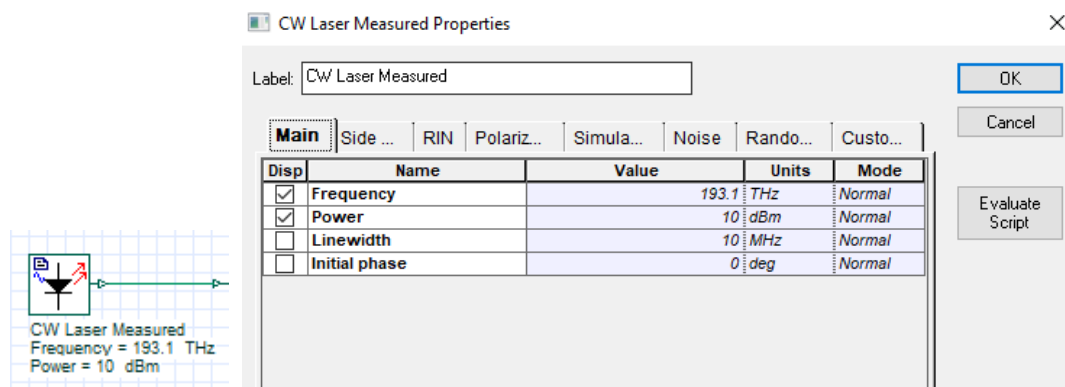


#### 4.1.3.1.5. Laser transmisor

Para la simulación se utiliza un láser CW Laser Measured este módulo es el que genera una señal óptica continua que ingresa al modulador MZ. Como parámetros de configuración tiene el ancho del haz de luz, la supresión de modo lateral y el ruido de intensidad relativa (Optiwave, 2022).

**Figura 20**

*Laser CW*



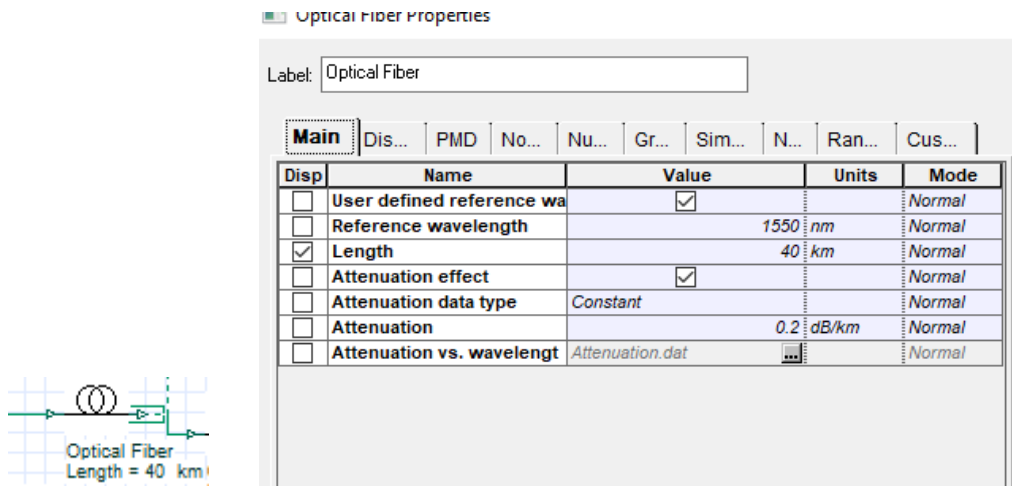
#### 4.1.3.2. Medio de transmisión fibra óptica

Está compuesto por la fibra óptica por la cual viaja la luz a la salida del modulador MZ.

Se configura el módulo a una distancia de 40 Km que es el valor planteado para el uso interurbano, para el valor de la dispersión cromática (CD) se setea a  $16,75 \frac{ps}{nm \cdot Km}$  con una atenuación en fibra óptica de  $0,2 \frac{dB}{Km}$ .

**Figura 21**

*Módulo de Fibra Óptica*



#### 4.1.3.2.1. Compensador de dispersión

La fibra óptica presenta efectos indeseables que afectan a la información que se transmite siendo estos menores o mayores según: el tipo de fibra, la distancia, los tipos de modulación y la velocidad a la que se transmiten los datos. Uno de estos efectos es la dispersión cromática, la cual es un fenómeno que causa el ensanchamiento en tiempo del pulso óptico transmitido por lo que hay que compensar este problema para mejorar los datos en la recepción (Castañeda, 2018).

#### 4.1.3.2.2. Cálculo de distancia de fibra óptica compensadora de dispersión

Se toma en cuenta la dispersion cromática (CD) y la dispersion por polarización (PMD) de la fibra óptica a 40 Km (Castañeda, 2018).

$$Disp_{CD} = CD \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] * L[km]$$

$$Disp_{CD} = 16,75 \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] * 40[km]$$

$$Disp_{CD} = 670 \left[ \frac{ps}{nm} \right]$$

La fibra compensadora tiene un valor de dispersión cromática (CD) de -160 ps/(nm\*km).

$$L_{DCF} = \frac{Disp_{fo}}{CD_{DCF}}$$

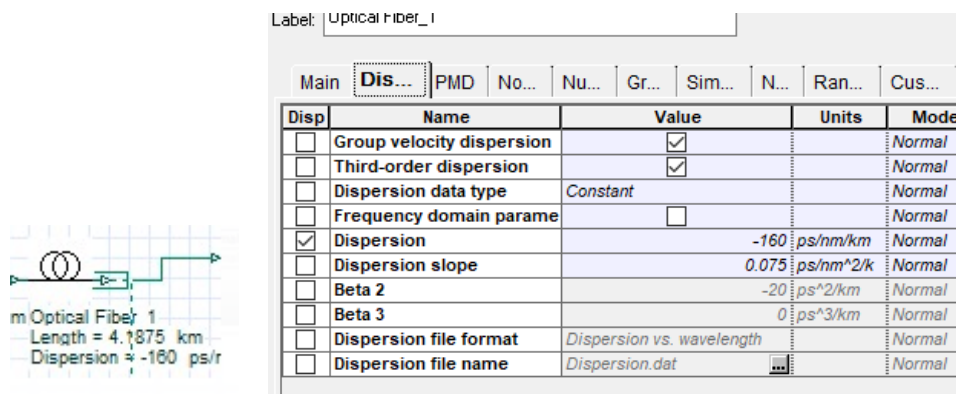
$$L_{DCF} = \frac{670 \left[ \frac{ps}{nm} \right]}{-160 \left[ \frac{ps}{nm * km} \right]}$$

$$L_{DCF} = 4,1875 \text{ km}$$

Para la simulación se utiliza el mismo módulo de fibra óptica, pero con los valores de dispersión y longitud calculados.

**Figura 22**

*Fibra Compensadora de Dispersión*



Label: Optical Fiber\_1

Main **Dis...** PMD No... Nu... Gr... Sim... N... Ran... Cus...

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Group velocity dispersion	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Third-order dispersion	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion data type	Constant		Normal
<input type="checkbox"/>	Frequency domain parame	<input type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Dispersion	-160	ps/nm/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion slope	0.075	ps/nm^2/k	Normal
<input type="checkbox"/>	Beta 2	-20	ps^2/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Beta 3	0	ps^3/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion file format	Dispersion vs. wavelength		Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion file name	Dispersion.dat		Normal

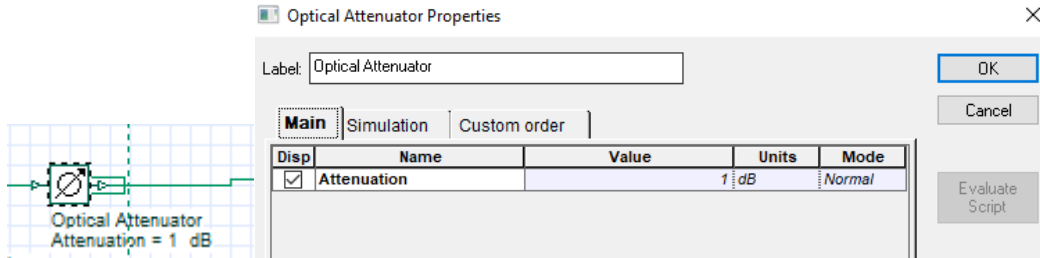
m Optical Fiber: 1  
Length = 4.1875 km  
Dispersion = -160 ps/r

#### 4.1.3.2.3. Atenuador

Este módulo permite ingresar atenuación adicional al enlace la que nos sirve para simular la degradación de la señal para el cálculo del BER, para este caso se varia de valores de 0,1 a 1 y de 1 a 10 dB por punto a calcular dependiendo del nivel de la modulación PAM (Optiwave, 2022).

**Figura 23**

*Atenuador Óptico*

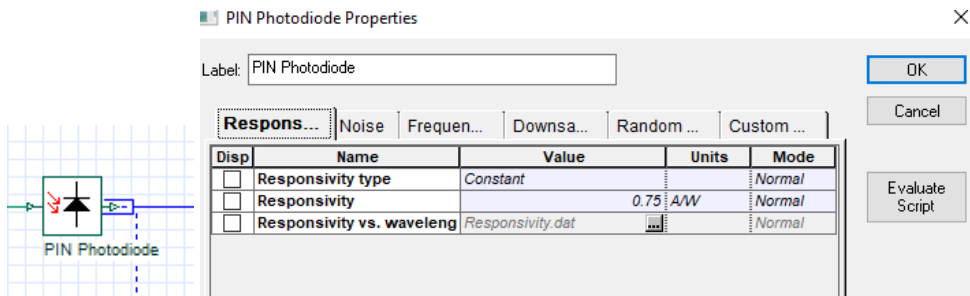


**4.1.3.3. Receptor**

El receptor está formado por un foto diodo detector que para este caso se utilizó un foto diodo PIN.

**Figura 24**

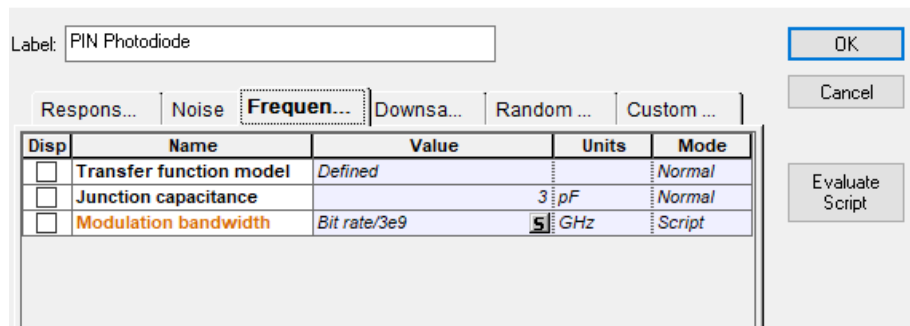
*Foto Diodo Pin*



Un parámetro importante para configurar es el ancho de banda de modulación en la cual va a trabajar el fotodiodo PIN, a trabajar en distintas modulaciones se setea para que sea la división del bit rate global para dos o tres dependiendo si es PAM-4 o PAM-8 (Optiwave, 2022).

**Figura 25**

*Configuración de Ancho de Banda de Modulación en Foto Diodo PIN*

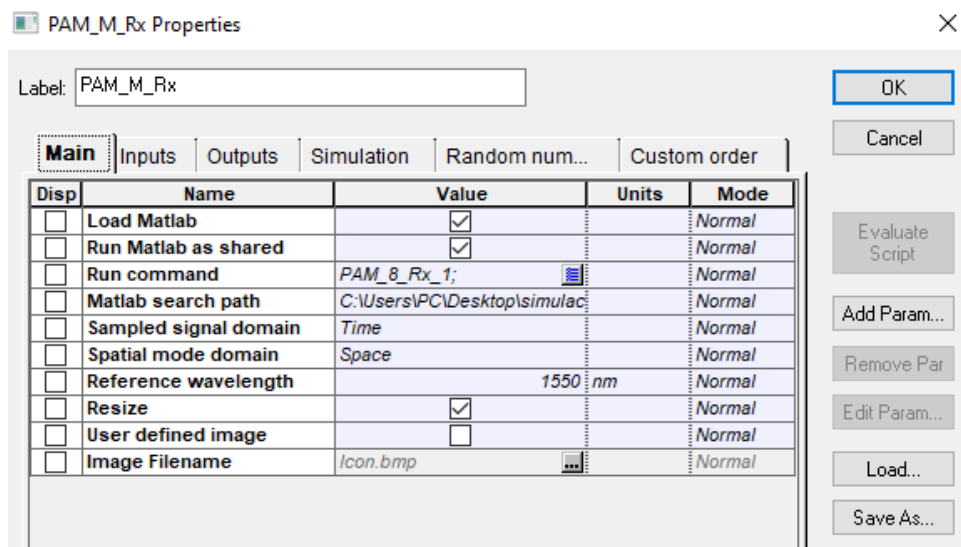


#### 4.1.3.3.1. Demodulador PAM diseñado en MATLAB

La salida del fotodiodo PIN se conecta al módulo de Matlab en el cual está el código para el demodular PAM y para el cálculo del BER, este se describirá más adelante.

**Figura 26**

*Demodulador PAM en Matlab*

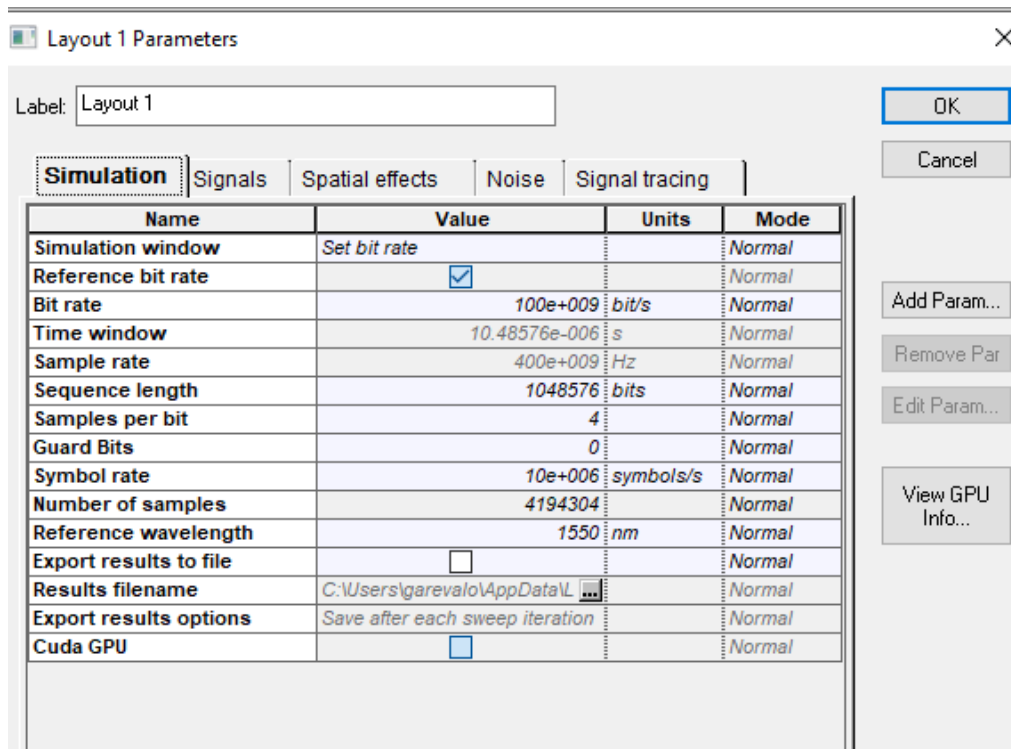


#### 4.1.3.4. Parámetros generales de la simulación

Optisystem requiere de parámetros generales para la simulación, en el cual lo más importantes son la cantidad de bits a enviar para este caso se trabajó con  $2^{20}$  bits y velocidades de transmisión (bit rate) superiores a 50 GBps (Giga Baudios por segundos) de acuerdo si es modulación PAM-4 o PAM-8 (Optiwave, 2022).

**Figura 27**

*Parámetros para la Simulación*



#### 4.1.3.5. Módulos de visualización

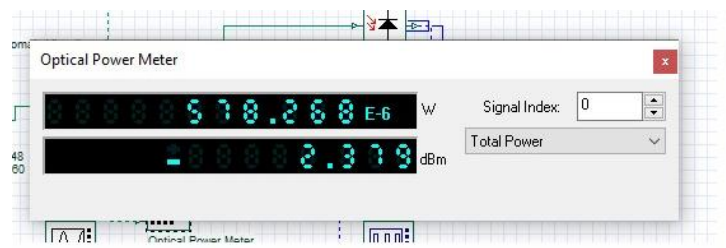
Se utiliza un medidor de potencia para validar la señal que recibe el fotodetector pin.

##### 4.1.3.5.1. Optical Power Meter

Este módulo visualizador muestra la potencia media de las señales en vatios y en dBm (Optiwave, 2022).

**Figura 28** *Optical Power Meter*

*Optical Power Meter*

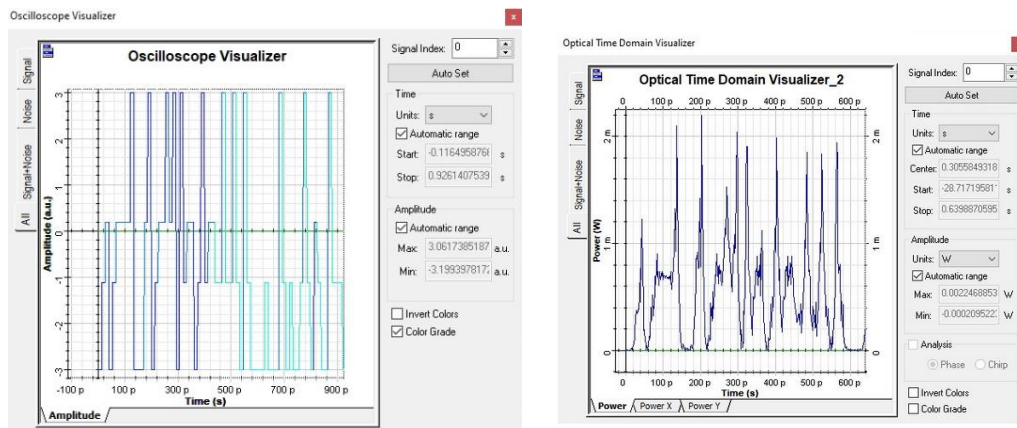


##### 4.1.3.5.2. Oscilloscope visualizer

Permite visualizar señales eléctricas en el dominio del tiempo ayudándonos a confirmar que Matlab este enviando correctamente la señal modulada y que Optisystem la procese (Optiwave, 2022).

**Figura 29**

Osciloscopio en Optisystem



#### 4.1.3.6. Co-simulación Matlab Optisystem

Optisystem es el encargado de generar los bits pseudo aleatorios para ser modulados en Matlab para ello se utiliza el siguiente código en un archivo .m que permite recibir los bits, procesarlos, modularlos de acuerdo con el nivel de PAM seleccionado y volverlos a enviar a optisystem.

##### 4.1.3.6.1. Modulador PAM

Para dar tratamiento a los datos que envía optisystem, el código primero debe almacenar los valores de la variable InportPort, se crea una nueva matriz de acuerdo con los niveles de PAM que se desee simular y se le aplica el comando para modulación que en Matlab es pammod. A esta señal se la convierte en pulsos rectangulares NRZ y se lo regresa a optisystem. Se incluye código para visualizar los bits recibidos, los símbolos generados por la modulación y su respectivo diagrama del ojo.

**Figura 30**

### Código para la Creación de Símbolos en PAM

```
d=InputPort1.Sequence;
N=length(d); %longitud data
M=4; %Número de niveles
g=reshape (d, log2(M), N/log2(M) )';
if M==4
    g(:,2)=xor(g(:,1),g(:,2));
end

b=bin2dec(num2str(g, '%-1d'))';

Ns=4; % número de muestras por baudio

a1=pammod(b,M);%Modulacion PAM-M
nrz=(0.2*rectpulse(d, Ns))';
pam= (0.2*rectpulse(a1, Ns))'; %señal PAM muestreada
```

### Figura 31

#### Código para Graficar los Símbolos Enviados y el Diagrama del ojo

```
figure (1)
plot(nrz,'b-x')
ylim ([-0.05,0.25])
title ('TX bits')
grid on
grid minor

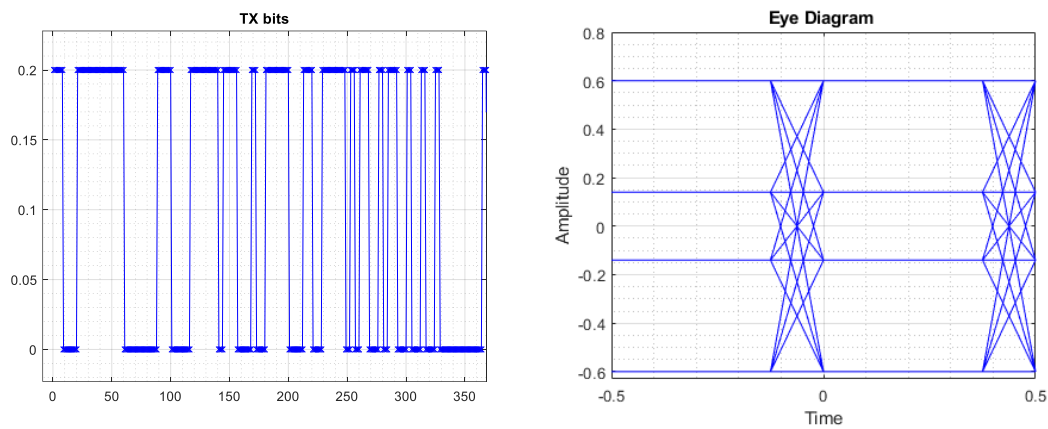
figure (2) plot(pam,'r-x')
ylim ([-1, 1])
title ('TX Baudios')
grid on
grid minor

figure (3)
eyediagram (pam (1: floor(length(pam))),Ns*2);
grid on
grid minor
```

Para niveles de PAM-4 se generan las siguientes gráficas de bits y del diagrama del ojo en el código del transmisor de Matlab.

**Figura 32**

*Bits Enviados y Diagrama del ojo PAM-4*



#### 4.1.3.7. Demodulador PAM

Para dar tratamiento a los datos que envía optisystem después de haberlos sido modulados y pasados por los 40 Km de fibra óptica, por el compensador de dispersión, por el atenuador de señal y ser pasados del dominio óptico al eléctrico por el fotodetector PIN el código diseñado en Matlab almacena los valores de la variable InportPort1 y los procesa para demodular los datos, observar su diagrama del ojo y calcular la cantidad de bits erróneos. Ya no es necesario volver enviar información a optisystem en vista que se calcula todo en Matlab.

El demodulador convierte los niveles en bits de acuerdo con los umbrales de apertura del ojo de cada nivel de acuerdo con cada modulación.

**Figura 33**

*Variables de nivel y almacenamiento de datos de Optisystem*

```
M=4; % número de niveles
Ns=8; % número de muestras por baudio
SignalRx=InputPort1; % la señal recibida se guarda en la variable
```

**Figura 34** Código para Graficar la señal Recibida y el Diagrama del ojo

```
ruído=SignalRx.Noise. Signal;
B1=real (SignalRx.Sampled. Signal+SignalRx.Noise. Signal);
figure (5)
plot(B1,'-x')
grid on
grid minor

eyediagram (B1(1: floor(length(B1))), Ns*2);
grid on
grid minor
vect1= [];
PAM= [];
bitsRx= [];
```

**Figura 35** Código para la Demodulación de Acuerdo con el Nivel de PAM

```
for t=1: Ns:length(B1) %El valor inicial de t es la muestra inicial
óptima para inicio de la decodificación
    if M==8
        % HUMBRALES PARA DECODIFICACIÓN DE LA SEÑAL PAM 8:
        v7 = 7;
        v6 = 6;
        v5 = 5;
        v4 = 4;
        v3 = 3;
        v2 = 2;
        v1 = 1;

        if B1(t) > v7 %para el nivel 1 0
            PAM= [PAM 7];
            bitsRx= [bitsRx 1 1 1];

        elseif B1(t)< v7 && B1(t) > v6
            PAM= [PAM 6];
            bitsRx= [bitsRx 1 1 0];

        elseif B1(t)< v6 && B1(t) > v5
            PAM= [PAM 5];
            bitsRx= [bitsRx 1 0 1];

        elseif B1(t)< v5 && B1(t) > v4
            PAM= [PAM 4];
            bitsRx= [bitsRx 1 0 0];

        elseif B1(t)< v4 && B1(t) > v3
            PAM= [PAM 3];
```

**Figura 36**

*Código para la demodulación de acuerdo con el nivel de PAM parte 2*

```
bitsRx= [bitsRx 0 1 1];

elseif B1(t)< v3 && B1(t) > v2
%   PAM= [PAM 2];
bitsRx= [bitsRx 0 1 0];

elseif B1(t)< v2 && B1(t) > v1
%   PAM= [PAM 1];
bitsRx= [bitsRx 0 0 1];

elseif B1(t)< v1
%   PAM= [PAM 0];
bitsRx= [bitsRx 0 0 0];

end
elseif M==4
% HUMBRALES PARA DECODIFICACIÓN DE LA SEÑAL PAM 4
v3 = 3;
v2 = 2;
v1 = 1;

if B1(t) > v3
bitsRx= [bitsRx 1 0];

elseif v3 && B1(t) > v2
bitsRx= [bitsRx 1 1];

elseif B1(t)< v2 && B1(t) > v1
bitsRx= [bitsRx 0 1];

elseif B1(t)< v1
bitsRx= [bitsRx 0 0];
end
end
end
```

El código del demodulador también incluye el cálculo de la tasa de bits erróneos BER para ello en el modulador se almacena los bits enviados en un archivo txt el cual es llamado en el demodulador para ser comparado con los bits demodulados. Con esto se puede calcular el valor exacto del BER y almacenarlo en otro archivo de texto.

**Figura 37**

*Código para el cálculo del BER*

```
bTx=load('TX_bits.txt'); %  
bitsRx=bitsRx (1: length(bTx));  
save RX_bits_adj.txt bitsRx -ascii  
bRx=load('RX_bits.txt'); %  
  
numerr=biterr (BitsTx, bitsRx);  
ber=numerr/length(bTx);  
  
save BER.txt ber -ascii
```

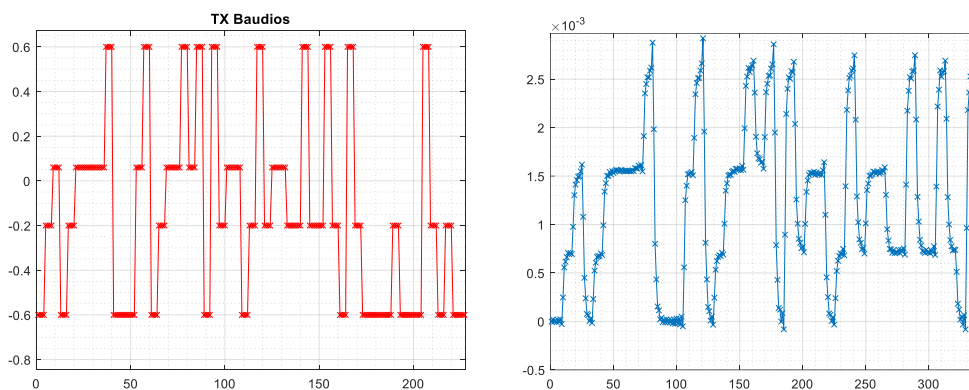
Con los códigos de Matlab tanto del modulador como el demodulador listo se ejecuta la simulación en PAM-4 a diferentes velocidades empezando con 50 GB/s obteniendo las siguientes gráficas en el transmisor y en el receptor.

#### 4.1.4. Gráficas de símbolos enviados y recibidos con modulación PAM

Del modulador se envían símbolos en PAM-4 y PAM- 8 que pasan a través del medio de transmisión, en el demodulador se observa el deterioro de estos.

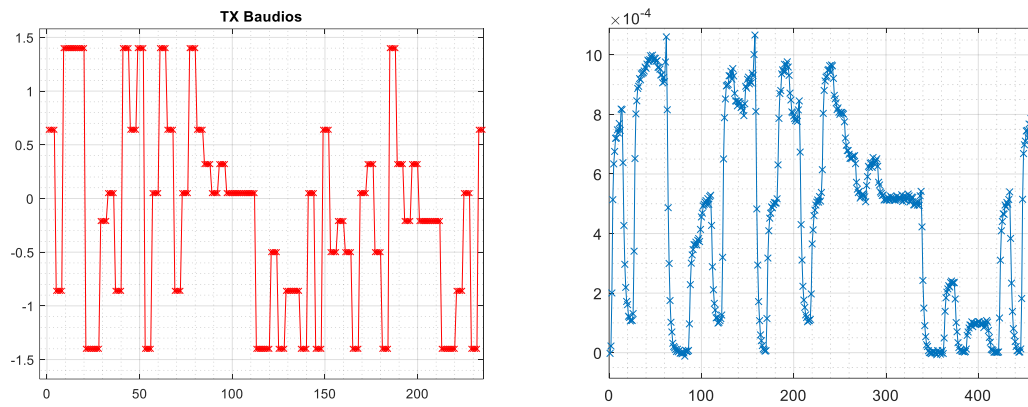
**Figura 38**

*Símbolos enviados y recibidos en PAM-4*



**Figura 39**

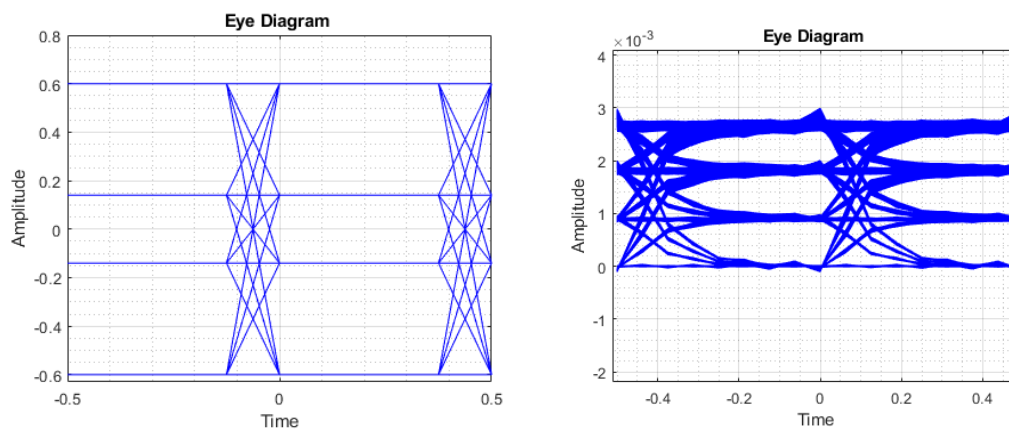
*Símbolos enviados y recibidos en PAM-8*



Para determinar los umbrales para la demodulación se necesita graficar el diagrama del ojo, un ojo abierto significa que tenemos un buen enlace al contrario que un ojo más cerrado representa posibles problemas en la recepción con un bajo BER.

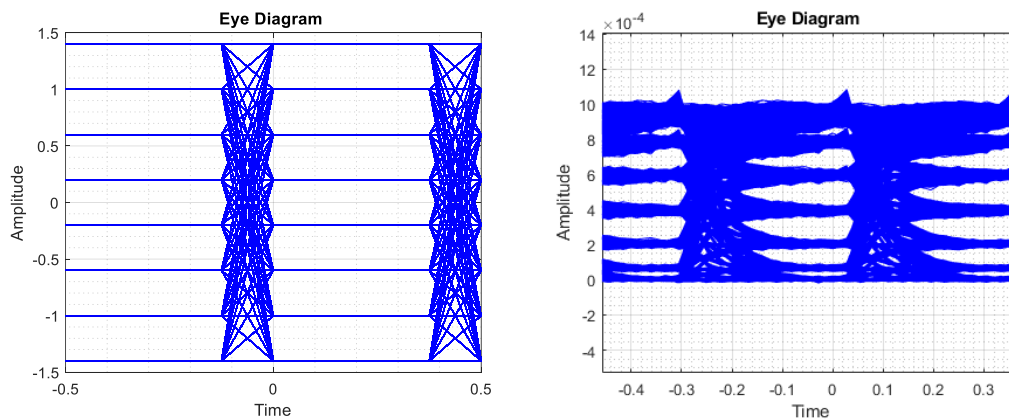
**Figura 40**

*Diagrama del ojo en el Transmisor y en el Receptor PAM-4*



## Figura 41

### Diagrama del ojo en el Transmisor y en el Receptor PAM-8



Se valida en los diagramas del ojo en el receptor que los niveles más altos son afectados por el ruido y la atenuación del enlace haciendo que los ojos sean asimétricos e incluso tener ojos cerrados como en el caso de PAM-8 por lo que es necesario realizar una pre-distorsión en el modulador, esto se logra cambiando el valor de cada nivel para que en el receptor se obtenga un diagrama del ojo con niveles más abiertos y simétricos. Después del análisis a una velocidad de 100 GBps se determina valores óptimos tanto para PAM-4 como para PAM-8.

#### 4.1.5. Pre-distorsión con PAM-4

El diagrama del ojo en el receptor muestra una afectación en los niveles superiores volviéndolos asimétricos por lo que se modificó los valores de cada uno de ellos. El proceso fue de prueba y error modificando y enviando de nuevo los bits hasta encontrar valores óptimos con los cuales los ojos queden abiertos y lo más simétricos posibles. En el código de Matlab del transmisor se modificó los niveles de codificación Gray de acuerdo con la siguiente tabla para PAM-4.

Tabla 2 Pre-distorsión PAM-4

PAM-4		
Símbolos	Nivel original	Nivel con pre-distorsión
10	+3	+3
11	+1	0,3
01	-1	-1
10	-3	-3

NOTA: Autor

En el código de Matlab se incluyen las siguientes líneas para el cambio de los niveles +1 y -1, estos pueden ser modificados de acuerdo con la velocidad que se quiera transmitir. El nivel seteado sirve hasta una velocidad de 100 GB/s, lo que se busca es que los niveles superiores tengan mayor separación en sus ojos para que no les afecte tanto el ruido y la atenuación que es donde se valida la afectación.

**Figura 42**

*Valores de Pre -distorsión PAM-4*

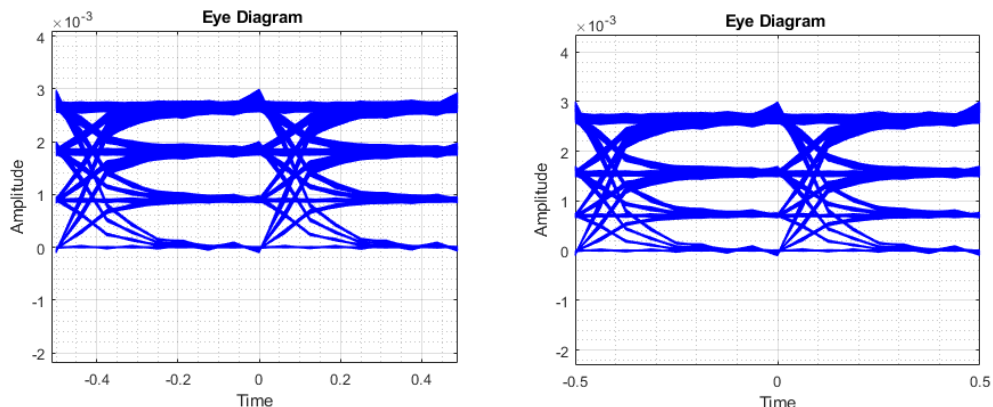
```

%-----pre-distorsión para PAM 4-----
a1(a1==1) =0.3; % predistorsión del nivel 1
a1(a1==-1) =-1; % predistorción del nivel -1
%-----

```

**Figura 43**

*Diagrama del ojo PAM-4 sin Distorsión y con Pre- Distorsión*



Con la simulación realizada para llegar a una velocidad en PAM-4 de 150 GB/s se necesita otros niveles de pre-distorsión para tener un óptimo desempeño.

**Figura 44**

*Valores de Pre-Distorsión PAM-4 a 150 GB/s*

```

%-----pre-distorsión para PAM 4 a 150GBps-----
a1(a1==1)=0.2; % predistorsión del nivel 1
a1(a1==-1)=-1.11; % predistorción del nivel -1
%-----

```

#### 4.1.6. Pre-distorsión con PAM-8

Similar a PAM-4 se validó que al momento de transmitir los datos y llegar al receptor los ojos son asimétricos e inclusive algunos están cerrados por lo que se aplicó pre-distorsión en los niveles hasta encontrar valores que a 100 GB/s permitan tener ojos simétricos.

Tabla 3 Pre-distorsión PAM-8

PAM-8		
Símbolos	Nivel original	Nivel con pre-distorsión
100	+7	+7
101	+5	3,6
111	+3	2
110	+1	0,65
010	-1	-0,65
011	-3	-2,1
001	-5	-3,8
000	-7	-7

NOTA: Autor

En el código de Matlab de ser necesario se pueden modificar los niveles de acuerdo con el entorno que se simule.

#### Figura 45

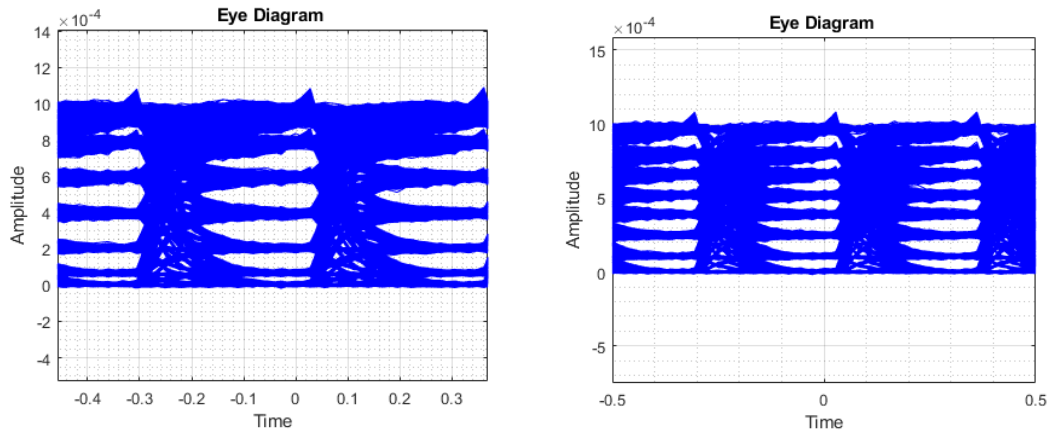
*Valores de Pre-Distorsión PAM-8*

```
%-----pre-distorsión para PAM 8-----  
a1(a1==5) =3.6; % remplazo para bit 5  
a1(a1==3) =2; % remplazo para bit 3  
a1(a1==1) =0.65; % remplazo para bit 1  
a1(a1==-1) ==-0.65; % remplazo para bit -1  
a1(a1==-3) ==-2.1; % remplazo para bit -3  
a1(a1==-5) ==-3.8; % remplazo para bit -5  
%-----
```

Con estos valores de pre-distorsión en PAM-8 mejora el diagrama del ojo en el receptor.

**Figura 46**

*Diagrama del ojo PAM-8 sin Distorsión y con Pre-Distorsión*



#### **4.1.7. Seteo de umbrales para la demodulación**

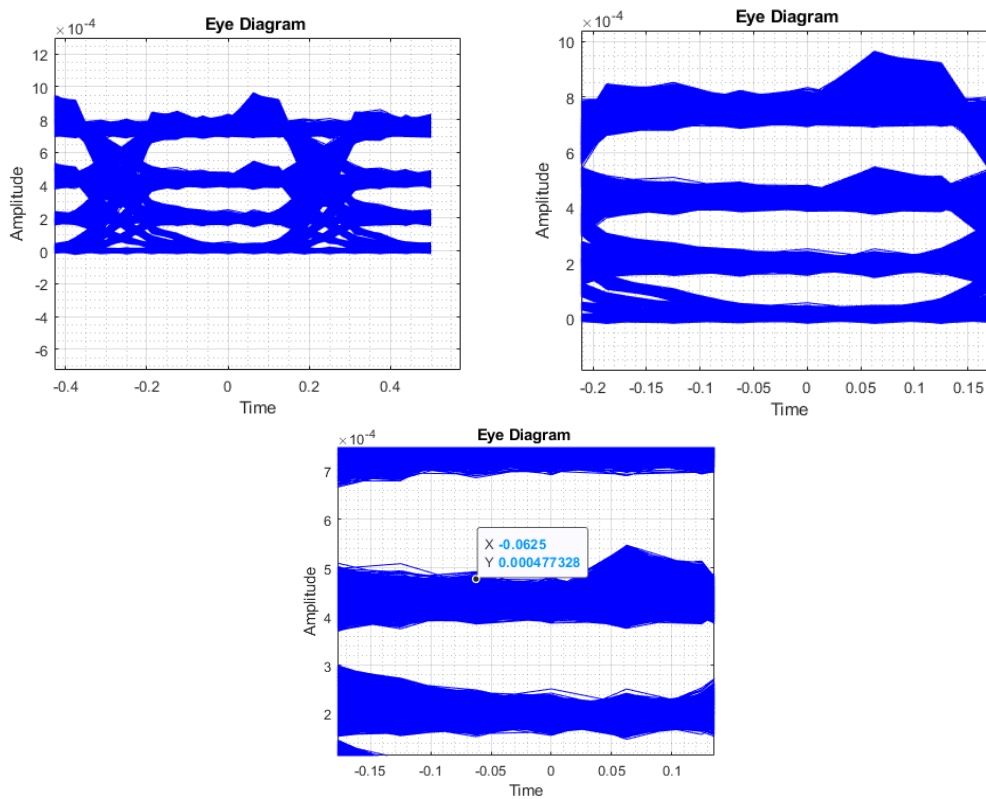
Para la demodulación se tiene que revisar en el diagrama del ojo el punto medio de cada nivel y encontrar el valor para el umbral, esto hay que realizarlo para cada longitud de fibra óptica que se utilice y también para cada valor distinto de atenuación en vista que la señal en el receptor varia con el cambio de estos parámetros.

Para ello al iniciar una simulación se debe validar los rangos y configurarlos en el receptor.

La manera más sencilla de verificar el umbral es hacer zoom al ojo que se quiere analizar y encontrar su punto medio ayudados por la grilla y anotarlo en el código. Este proceso se lo realizó para PAM-4 y PAM-8 y por cada valor de atenuación, este proceso es largo y si se toma mal las medidas el demodulador tendrá diferentes bits que los originales causando que el cálculo de los bits erróneos sea incorrecto.

**Figura 47**

*Validación de umbral en el diagrama del ojo*



En el código de Matlab se tiene un espacio para poner los valores tanto de PAM-4 como PAM-8 es importante encontrar los valores correctos para evitar errores en los siguientes cálculos.

**Figura 48**

*Umbral de demodulación PAM-4 y PAM-8*

```
% UMBRALES PARA DECODIFICACIÓN DE LA SEÑAL PAM-4  
v3 = 0.172e-3;  
v2 = 0.08e-3;  
v1 = 0.027e-3;
```

```
% UMBRALES PARA DECODIFICACIÓN DE LA SEÑAL PAM 8:  
v7 = 0.865e-4;  
v6 = 0.71e-4;  
v5 = 0.585e-4;  
v4 = 0.455e-4;  
v3 = 0.325e-4;  
v2 = 0.185e-4;  
v1 = 0.065e-4;
```

#### 4.1.8. Cálculo de los bits errados BER

Para determinar cuan óptimo es el enlace utilizamos el cálculo de los bits errados BER, para esto hay que comparar uno a uno los bits recibidos después de la demodulación con los bits enviados antes de la modulación. La suma de los errores encontrados se los divide para la cantidad de bits transmitidos.

$$BER = \frac{\# \text{ bits errados}}{\# \text{ bits transmitidos}}$$

En el código de Matlab del transmisor se almacena en un archivo de texto los bits enviados que serán cargados de nuevo en Matlab cuando el demodulador los necesite para comparar con los bits recibidos.

**Figura 49**

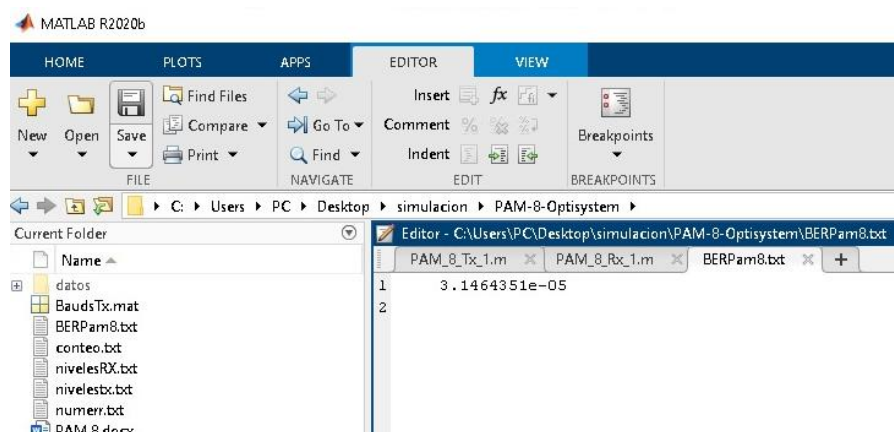
*Código para el cálculo del BER*

```
bTx=load('TX_bits.txt');%
bitsRx=bitsRx(1:length(bTx));
save RX_bits_adj.txt bitsRx -ascii
bRx=load('RX_bits.txt');%
numerr=biterr(bitsTx,bitsRx);
ber=numerr/length(bTx);
save TX_bits_adj.txt bitsTx -ascii
save BER.txt ber -ascii
```

Los valores del BER resultantes se los almacena manualmente en hojas de Excel para su posterior análisis.

**Figura 50**

*Cálculo del BER en Matlab*



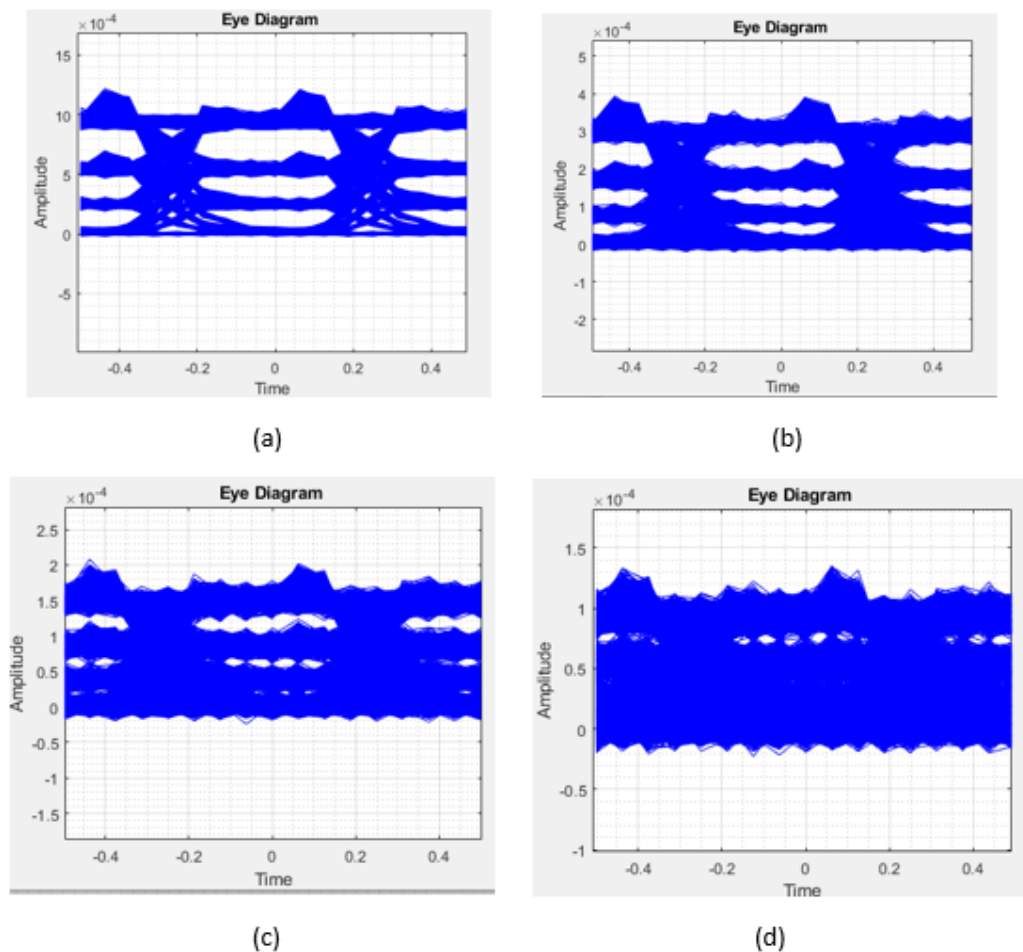
## 4.1.9. Simulación de la red PON

### 4.1.9.1. Transmisión a 150 Gb/s

Se inicia la prueba del diseño transmitiendo a una velocidad efectiva de 150 Gb/s, para esto primero se envía símbolos en PAM-4 a 75 GB/s para alcanzar la velocidad objetiva, para levantar la información del BER se varía el atenuador desde 1 hasta 10 dBm. Se envían  $2^{20}$  bits pseudo aleatorios desde optisystem.

#### Figura 51

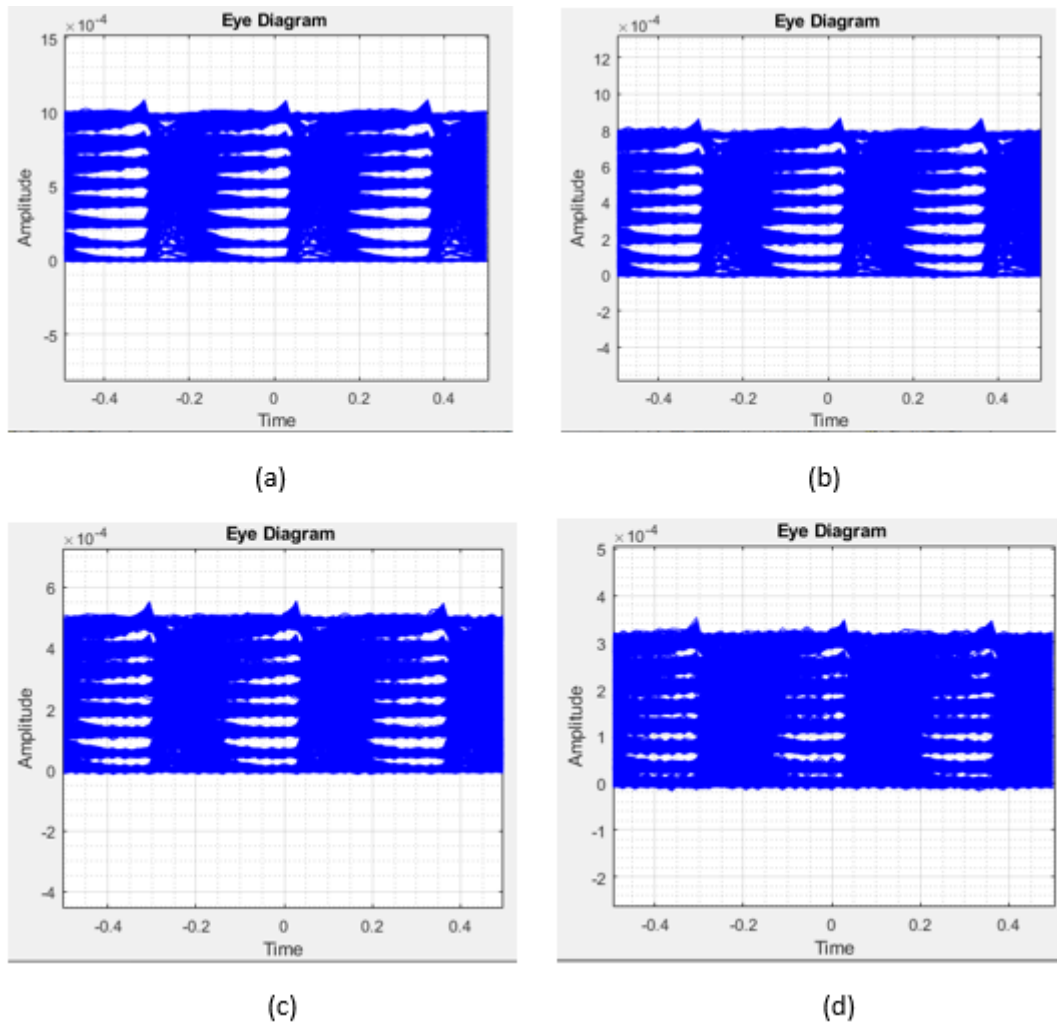
Transmisión a 150 Gb/s PAM-4 a 75 GB/s. a) 0 dB de atenuación, b) 5 dB de atenuación, c) 8 dB de atenuación, d) 10 dB de atenuación



Con PAM-8 se transmite a una velocidad de 50 GB/s, se varía el valor del atenuador para obtener los valores del BER similar a lo realizado en PAM-4.

## Figura 52

Transmisión a 150 Gb/s PAM-8 a 50 GB/s. a) 0 dB de atenuación, b) 1 dB de atenuación, c) 3 dB de atenuación, d) 5 dB de atenuación

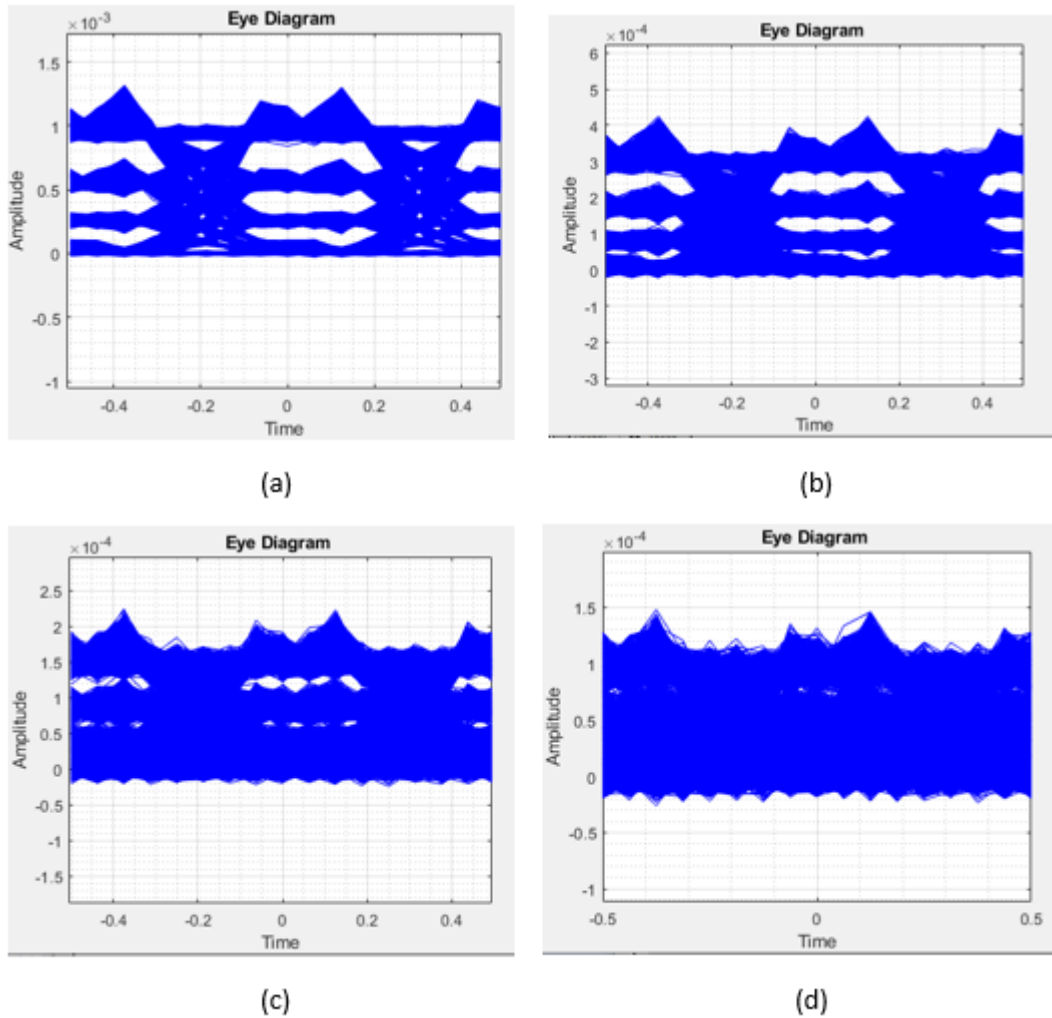


### 4.1.9.2. Transmisión a 200 Gb/s

Los datos para enviar son los mismos que en 150 Gb/s, se cambia la velocidad de transmisión de cada modulación para llegar a la velocidad de 200 Gb/s, para PAM-4 se trabaja con 100 GB/s y para PAM-8 con 66,6 GB/s, se varía la potencia del atenuador para obtener los valores del BER.

### Figura 53

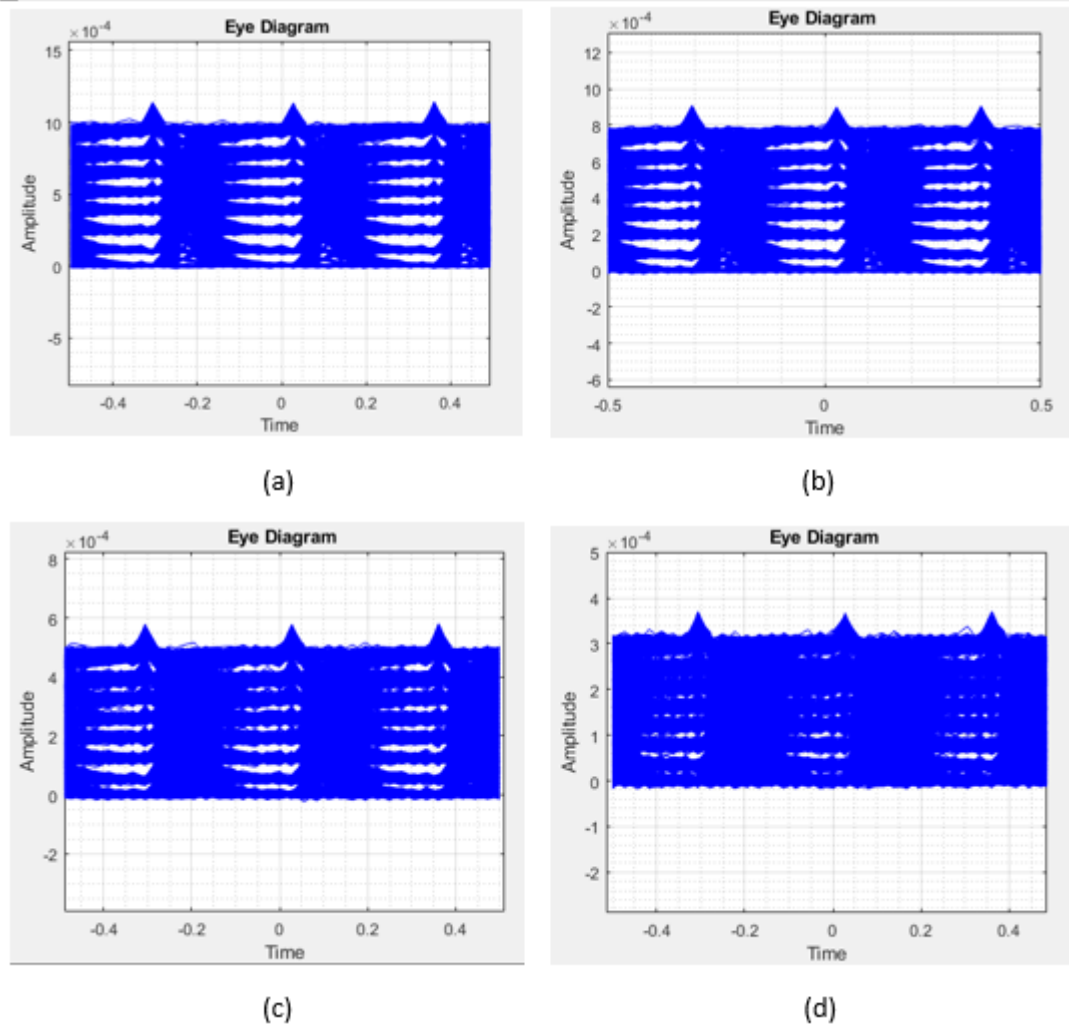
Transmisión a 200 Gb/s PAM-4 a 100 GB/s. a) 0 dB de atenuación, b) 5 dB de atenuación, c) 8 dB de atenuación, d) 10 dB de atenuación



Con PAM-8 se transmite a una velocidad de 66,6 GB/s, se varía el valor del atenuador para obtener los valores del BER similar a lo realizado en PAM-4.

## Figura 54

Transmisión a 200 Gb/s PAM-8 a 66,6 GB/s. a) 0 dB de atenuación, b) 1 dB de atenuación, c) 3 dB de atenuación, d) 5 dB de atenuación

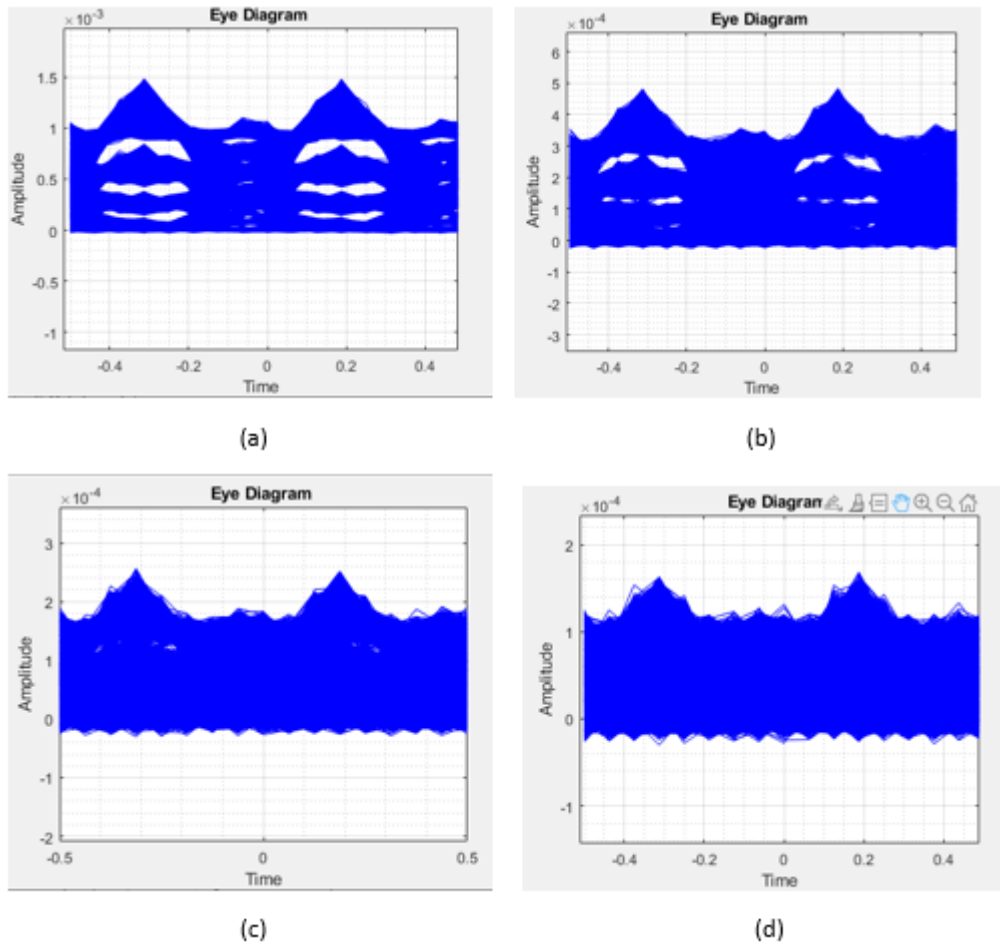


### 4.1.9.3. Transmisión a 300 Gb/s

Por último, se envía los datos a una velocidad de 300 Gb/s, se cambia la velocidad de transmisión de cada modulación para llegar a esta velocidad, para PAM-4 se trabaja con 150 GB/s y para PAM-8 con 100 GB/s, se varía la potencia del atenuador para obtener los valores del BER.

## Figura 55

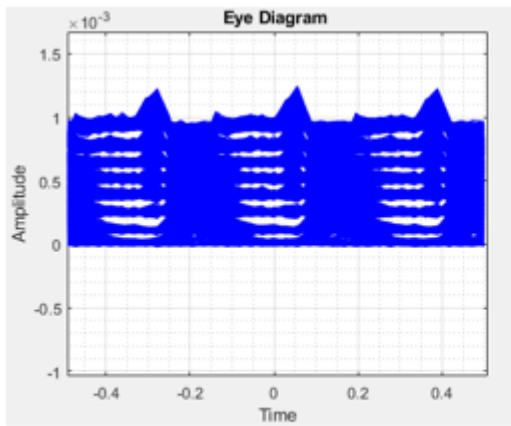
Transmisión a 300 Gb/s PAM-4 a 150 GB/s. a) 0 dB de atenuación, b) 5 dB de atenuación, c) 8 dB de atenuación, d) 10 dB de atenuación



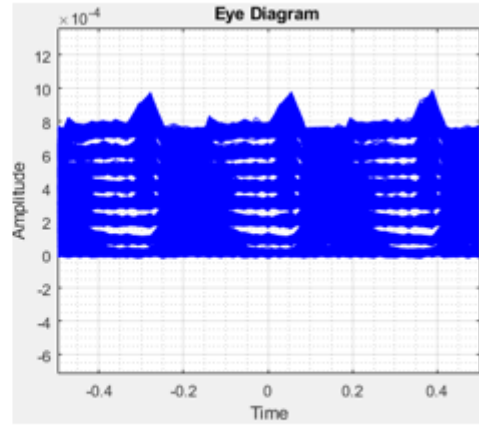
Con PAM-8 se transmite a una velocidad de 100 GB/s se varía el valor del atenuador para obtener los valores del BER similar a lo realizado en PAM-4.

**Figura 56**

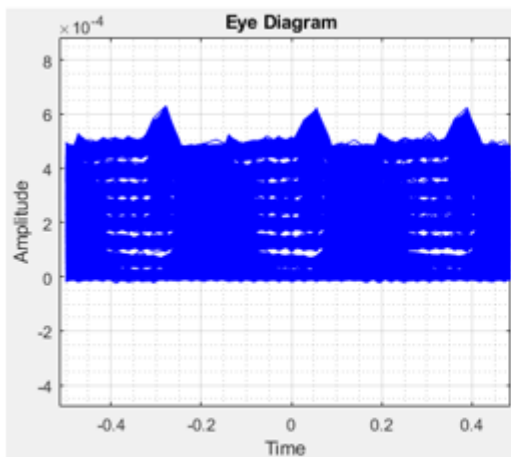
*Transmisión a 300 Gb/s PAM-8 a 100 GB/s. a) 0 dB de atenuación, b) 1 dB de atenuación, c) 3 dB de atenuación, d) 5 dB de atenuación.*



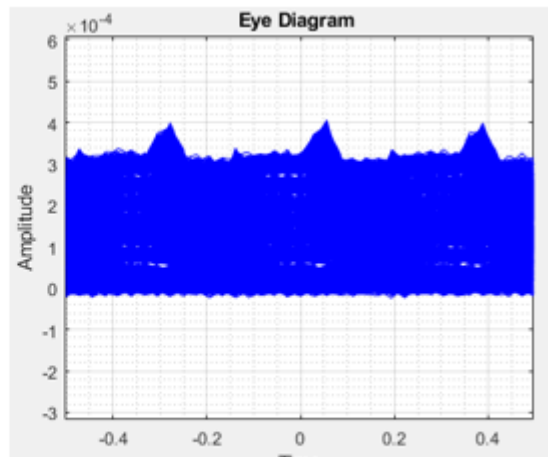
(a)



(b)



(c)



(d)

## CAPÍTULO V: ANALISIS Y RESULTADOS

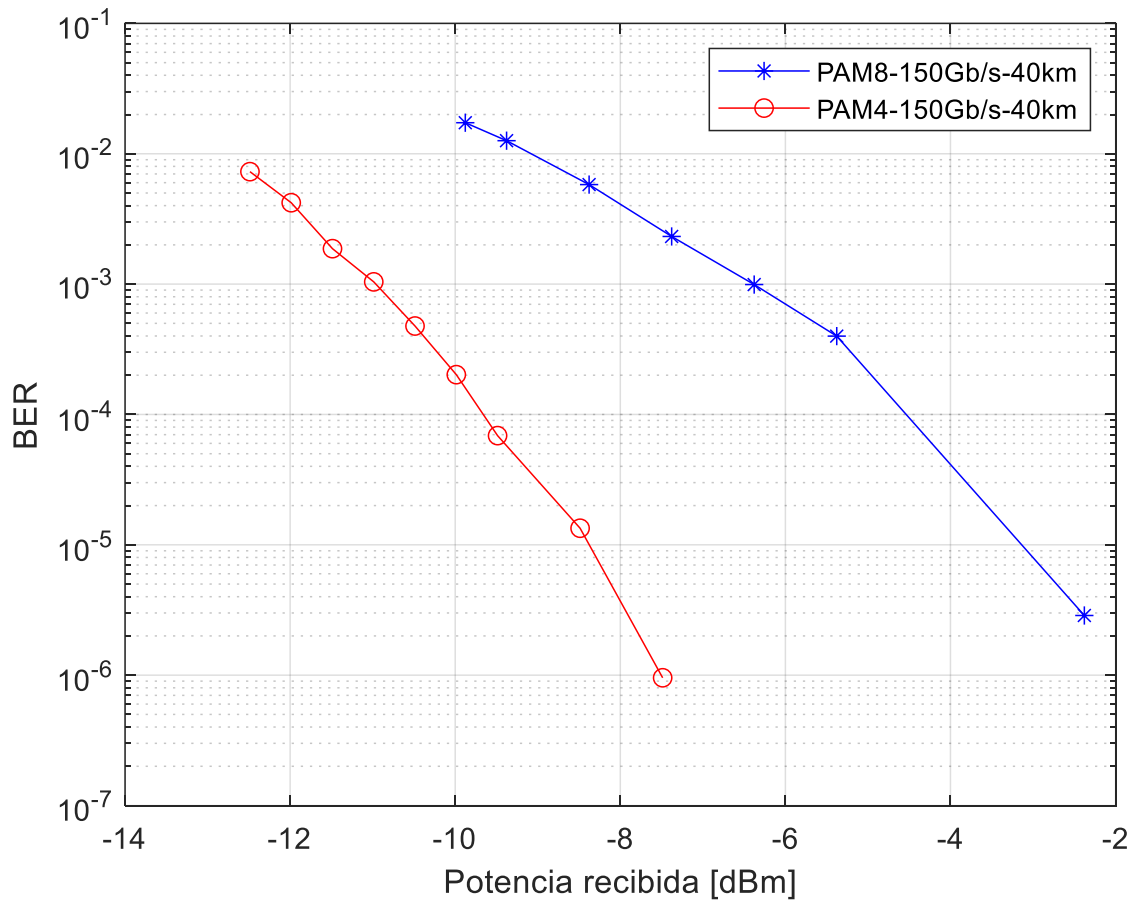
Las simulaciones se las realizaron con una fibra óptica de 40 Km de longitud en vista que el diseño está orientado en un entorno de transporte en zona urbanas ultradensas. Se adiciona su respectivo compensador de dispersión lo cual es necesario por la afectación que tiene la señal al trabajar a velocidades altas de 150 Gb/s, 200 Gb/s y 300 Gb/s. Estas velocidades fueron escogidas para poder paralelizar la menor cantidad de láseres y de esta manera llegar a la velocidad de transmisión planteada de 1,6 Tb/s. Para cada una de estas velocidades se envían  $2^{20}$  bits y se calcula el valor de BER para determinar la eficiencia de cada modulación. Se analiza los resultados a un BER de  $1e-6$  y  $1e-3$  siendo este último el mínimo valor de BER para poder aplicar códigos de corrección de errores (FEC) con los cuales aplicándolos correctamente se podría mejorar los valores de BER hasta  $1e-9$ .

### 5.1. Análisis con velocidad de transmisión a 150 Gb/s

Para transmitir a una velocidad de 150 Gb/s se utilizó la modulación PAM-4 a una velocidad de 75 GB/s y con PAM-8 a una velocidad de 50 GB/s. Hay que recordar que la modulación PAM-4 permite enviar dos bits por baudio y PAM-8 tres bits de ahí el tener menor velocidad de baudio en PAM-8 para llegar a la velocidad de 150 Gb/s. El resultado de la simulación se verifica en la gráfica del BER a 150 Gb/s de la figura 57.

**Figura 57**

*BER vs Potencia recibida a 150 Gb/s*



Para tener un BER de  $1e-6$  a una velocidad de 150 Gb/s en PAM-4 se necesita tener una potencia mínima en la recepción de -7,5 dBm y en PAM-8 una potencia mínima de -1,5 dBm. PAM-8 tiene una penalidad en potencia de 6 dBm con respecto a PAM-4 al transmitir a 150 Gb/s para un BER de  $1e-6$ . Para un BER de  $1e-3$  a una velocidad de 150 Gb/s en PAM-4 se necesita una potencia de -11 dBm y para PAM-8 de -6,4 dBm teniendo una penalidad PAM-8 de 4,6 dBm con respecto a PAM-4.

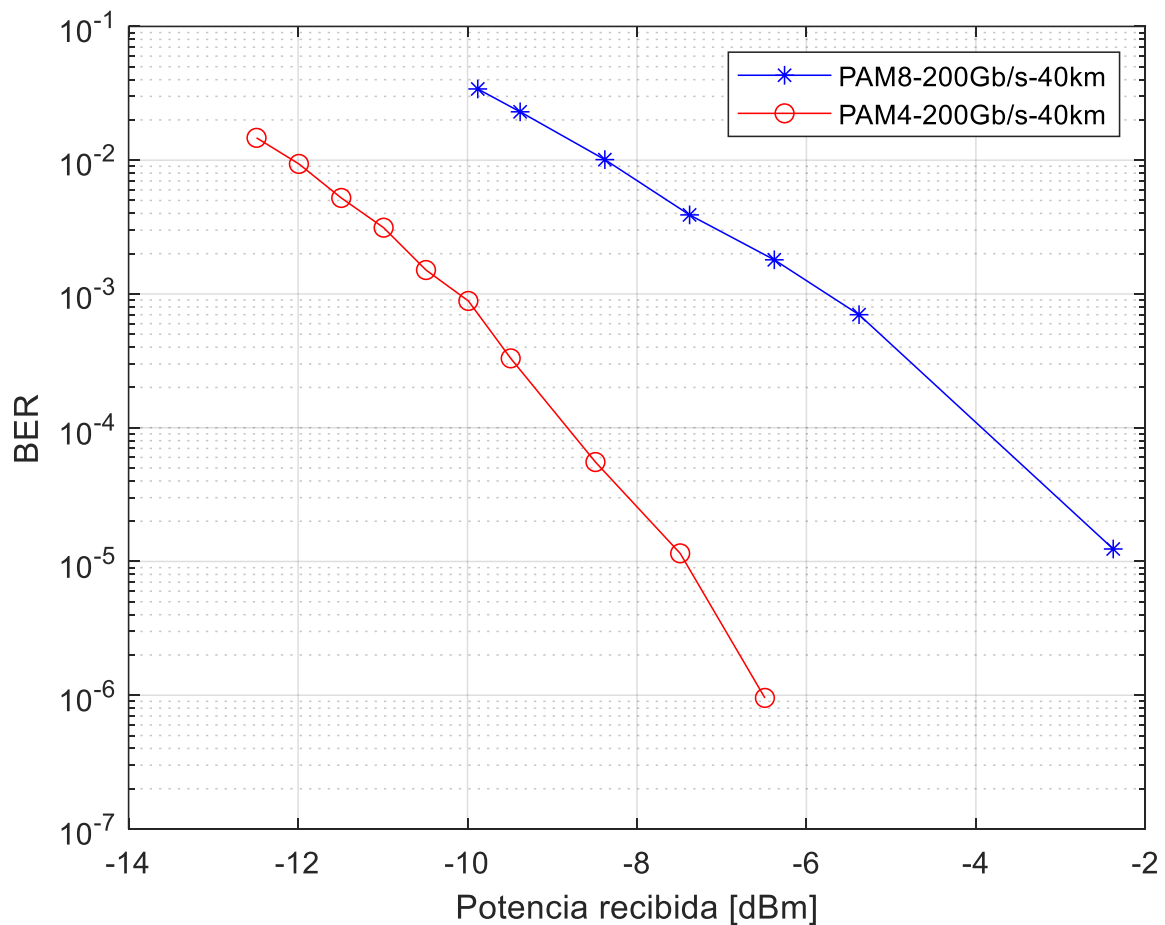
Para llegar a la velocidad de 1,6 Tb/s con una velocidad de transmisión de 150 Gb/s se necesitaría paralelizar 11 láseres llegando a una velocidad final de 1,65 Tb/s o paralelizar solo 10 láseres llegando a 1,5 Tb/s con esto no se llegaría a la velocidad planteada, pero se ahorraría el costo de 1 laser. Para la velocidad de transmisión de 150 Gb/s planteada se necesitaría trabajar con dispositivos que trabajen a un ancho de banda de 75 GHz para PAM-4 y de 50 GHz para PAM-8.

## 5.2. Análisis con velocidad de transmisión a 200 Gb/s

Para transmitir a una velocidad de 200 Gb/s se utilizó la modulación PAM-4 a una velocidad de 100 GB/s y con PAM-8 a una velocidad de 66,6 GB/s. El resultado de la simulación a esta velocidad se verifica en la gráfica del BER a 200 Gb/s de la figura 58.

**Figura 58**

*BER vs Potencia recibida a 200 Gb/s*



Para lograr un BER de  $1e-6$  a una velocidad de 200 Gb/s en PAM-4 se necesita tener una potencia mínima en la recepción de -6,5 dBm y en PAM-8 una potencia mínima de -0,5 dBm. PAM-8 tiene una penalidad en potencia de 6 dBm con respecto a PAM-4 al transmitir a 200 Gb/s para un BER de  $1e-6$ . Para un BER de  $1e-3$  a una velocidad de 200 Gb/s en PAM-4 se necesita una potencia de -10 dBm y para PAM-8 de -5,75 dBm teniendo una penalidad PAM-8 de 4,25 dBm con respecto a PAM-4.

Para llegar a la velocidad de 1,6 Tb/s con una velocidad de transmisión de 200 Gb/s se

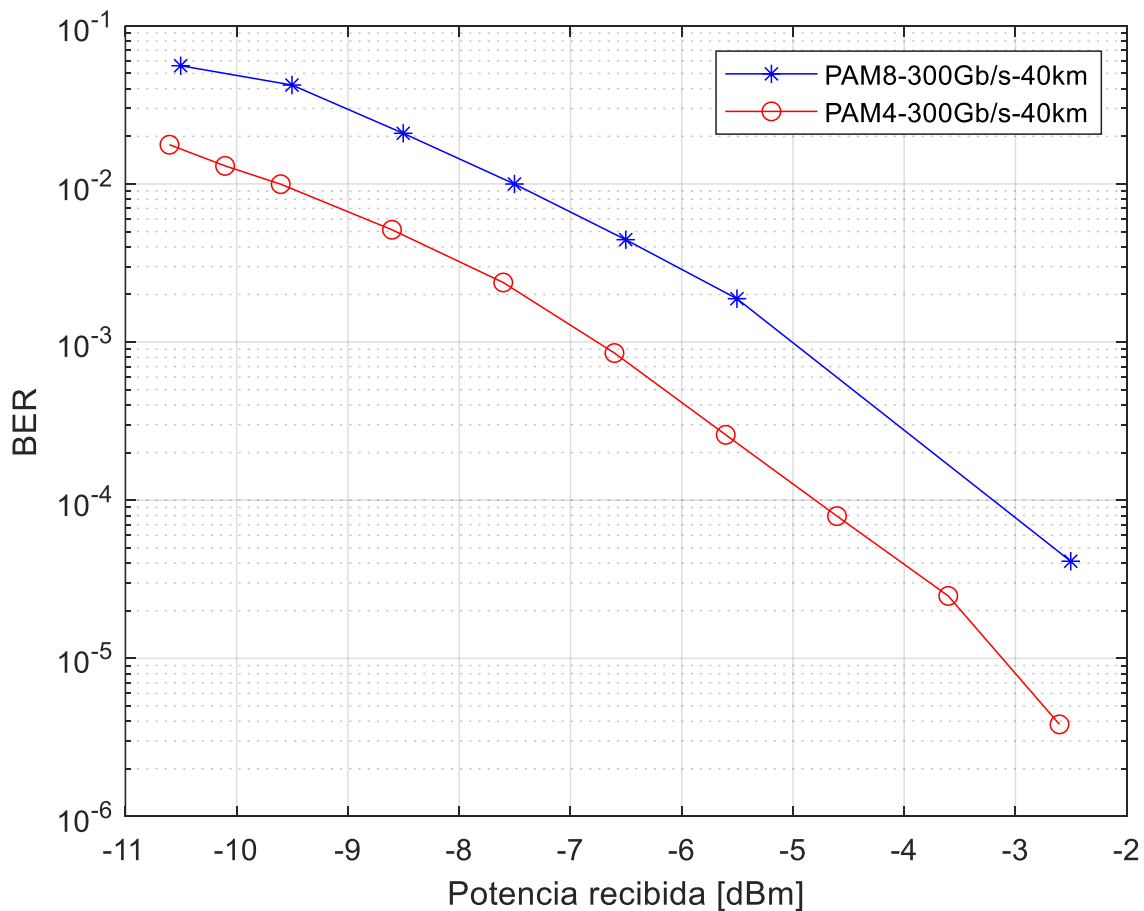
necesitaría paralelizar 8 láseres. Para la velocidad de transmisión de 200 Gb/s planteada se necesitaría trabajar con dispositivos que trabajen a un ancho de banda de 100 GHz para PAM-4 y de 66,6 GHz para PAM-8, siendo esta la opción más viable para llegar a la velocidad de 1,6 Tb/s por sus niveles de potencia y en especial por la cantidad de láseres y el ancho de banda de los dispositivos a utilizar.

### 5.3. Análisis con velocidad de transmisión a 300 Gb/s

Como una propuesta adicional se analizó transmitir a una velocidad de 300 Gb/s para lo cual se utilizó la modulación PAM-4 a una velocidad de 150 GB/s y con PAM-8 a una velocidad de 100 GB/s. El resultado de la simulación a esta velocidad se verifica en la gráfica del BER a 300 Gb/s de la figura 59.

**Figura 59**

*BER vs Potencia recibida a 300 Gb/s*



Para lograr un BER de 1e-6 a una velocidad de 300 Gb/s en PAM-4 se necesita tener

una potencia mínima en la recepción de -2 dBm y en PAM-8 una potencia mínima de 2 dBm.

PAM-8 tiene una penalidad en potencia de 4 dBm con respecto a PAM-4 al transmitir a 200 Gb/s para un BER de  $1e-6$ . Para un BER de  $1e-3$  a una velocidad de 300 Gb/s en PAM-4 se necesita una potencia de -6,8 dBm y para PAM-8 de -5 dBm teniendo una penalidad PAM-8 de 1,8 dBm con respecto a PAM-4.

Para llegar a la velocidad de 1,6 Tb/s con una velocidad de transmisión de 300 Gb/s se necesitaría paralelizar 5 láseres para llegar a una velocidad de 1.5 Tb/s o paralelizar 6 láseres obteniendo una velocidad de 1,8 Tb/s que es muy superior a la planteada. Se podría trabajar con 5 láseres obteniendo un ahorro con respecto a las otras velocidades que necesitan 10 o 8 láseres.

Para la velocidad de transmisión de 300 Gb/s planteada se necesitaría trabajar con dispositivos que trabajen a un ancho de banda de 150 GHz para PAM-4 y de 100 GHz para PAM-8.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones:

De los datos obtenidos de la simulación se concluye que al aumentar la velocidad de transmisión de 150 a 200 y a 300 Gb/s decrece la penalidad de usar PAM-8 frente a PAM-4 en específico en la velocidad de 300 Gb/s disminuye a 1,8 dBm a diferencia de trabajar con 150 Gb/s que PAM-8 tiene una penalidad de 4,6 dBm y de 4,25 dBm con 200 Gb/s.

La mejor opción para implementar es la que requiere menos ancho de banda para el canal y para los dispositivos para nuestro caso es transmitir a 200 Gb/s para lo cual se puede trabajar con PAM-4 a 100 Gb/s o con PAM-8 a 66,6 GB/s. Con estas velocidades se necesitaría dispositivos a 100 GHz y 66 GHz respectivamente paralelizando 8 láseres para llegar a la velocidad de 1,6 Tb/s.

En cualquiera de las velocidades manejadas PAM-8 es la mejor opción en vista que envía más información que PAM-4 y requiere menor ancho de banda en dispositivos y en canal para llegar a velocidades altas mejorando la eficiencia espectral, pero tiene el inconveniente que necesita tener una mejor potencia en la recepción en vista que es más sensible al ruido y a la atenuación que PAM-4.

El trabajar a velocidades bajas conlleva tener un menor ancho de banda, menor afectación del ruido y de la atenuación, pero para alcanzar la velocidad de 1,6 Tb/s se necesitaría paralelizar más láseres elevando el costo de implementación.

**Recomendaciones:**

Del diseño realizado para la co-simulación entre Matlab y Optisystem se recomienda para poder enviar gran cantidad de bits en el orden de  $2^{20}$  en adelante tener un computador con una alta capacidad de procesamiento de varios núcleos y de memoria RAM en vista que una simulación enviando más de 1 millón de bits con un procesador de core i5 con una RAM de 9 Gigas se demora entre 35 a 50 minutos si se necesita enviar más bits este tiempo aumentaría exponencialmente.

Para la demodulación PAM se debe establecer correctamente los umbrales de los ojos para esto Optisystem permite enviar en una variable la señal con los niveles, pero separada del ruido, esto ayuda a determinar específicamente los valores sin la afectación del ruido.

Hay que tener en cuenta que el fotodiodo receptor pin debe ser configurado correctamente el ancho de banda a la cual debe trabajar, cada que se cambie el bit rate se debe modificar este valor para evitarse esta manualidad hay que configurar que sea automático de acuerdo con los niveles de modulación y el bit rate.

## REFERENCIAS

Ahmed, R., & Mahmood, H. (2018). Performance analysis of PAM intensity modulation based on dispersion compensation fiber technique for optical transmission system. Obtention IEEE: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8340540>

Arevalo, G., Villavicencio, M., & Flores, G. (2019). Experimental demonstration of a PAM-4 based 20 Gb/s PON using dispersion pre-compensation. Obtention Workshop on Information Processing and Control: <https://doi.org/10.1109/RPIC.2019.8882165>

Cano, R. (2022). Simulador de sistemas de comunicaciones ópticas coherentes (Doctoral dissertation. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: <https://riunet.upv.es/handle/10251/186979>

Carriel, V., & Teófilo, B. (2022). Análisis comparativo de esquemas de modulación y codificación binaria en redes de comunicaciones ópticas. Obtenido de Universidad católica Santiago de Guayaquil: <http://201.159.223.180/bitstream/3317/17873/1/T-UCSG-POS-MTEL-215.pdf>

Castañeda, P. (2018). Análisis y simulación del fenómeno de dispersión cromática en las fibras ópticas monomodo ITU-T G.652 e ITU-TG.655. Obtenido de Escuela Politécnica Nacional: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19307>

CcnaDesdeCero. (s.f.). CCNA desde cero. Obtenido de <https://ccnadesdecero.es/cableado-fibra-optica/>

Che, D., & Chen, X. (2022). Higher-Order Modulation vs Faster-Than-Nyquist PAM-4 for Datacenter IM-DD Optics. Obtention IEEE: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9769899>

Community. (2021). Definición, tipos y características de la fibra multimodo. Obtenido de <https://community.fs.com/es/blog/advantages-and-disadvantages-of-multimode-fiber.html>

Costales, F. (2020). Comparación del desempeño de las modulaciones PAM-2, PAM-4 y PAN-8 en la transmisión de datos a alta velocidad en redes PON de nueva generación (NG-PON). Obtenido de PUCE: <http://201.159.222.35/handle/22000/18443>

EWeb. (2018). Anatomy of a 112-Gbps ADC/DSP Long-Reach SerDes PHY. Obtenido de <https://www.eeweb.com/anatomy-of-a-112-gbps-adc-dsp-long-reach-serdes-phy/>

ElectronicaOnline. (s.f.). Diodo PIN. Obtenido de <https://electronicaonline.net/componentes-electronicos/diodo/diodo-pin/>

FOCC. (2019). El nuevo mundo de 400 Gbps Ethernet. Obtenido de <http://www.fibresplitter.com/info/the-new-world-of-400-gbps-ethernet-38685944.html>

García, X., & Falconí, J. (2018). Simulación de enlace de fibra óptica en red EPON. Obtenido de Espol: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/45652/1/D-83387.pdf>

Houtsma, V., & Van Veen, D. (2016). A study of options for high-speed TDM-PON beyond 10G. Obtenido de IEEE: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7792559>

Hu, Q., Borkowski, R., Lefevre, Y., Cho, J., Buchali, F., Bonk, R., & Hoessbacher, C. (2022). Ultrahigh-Net-Bitrate 363 Gbit/s PAM-8 and 279 Gbit/s Polybinary Optical Transmission Using Plasmonic Mach-Zehnder Modulator. Obtenido de IEEE: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9767590>

Optiwave. (2022). Optiwave Releases OptiSystem 19.0. Obtenido de <https://optiwave.com/resources/latest-news/optiwave-releases-optisystem-19/>

Pardo, C., Yopez, H., & Castillo, A. (2018). Propuesta De Enlace De Fibra Óptica Entre Bogotá Y Santa Marta. Universidad San Jose de Caldas. Obtenido de Universidad San Jose de Caldas: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13756/PardoPe%c3%b1aCarlosMauricio2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Petriella, M. (2018). Fotodiodos: PN, PIN, APD. Obtenido de <http://materias.df.uba.ar/instru2018c2/files/2012/07/Fotodiodos.pdf>

Programador Clic. (s.f.). Que es un diagrama de ojo. Obtenido de <https://programmerclick.com/article/50171415791/>

Sun, L., Wang, C., Du, J., Liang, C., hang, W., Xu, k., & He, Z. (2019). Dyadic probabilistic shaping of PAM-4 and PAM-8 for cost-effective VCSEL-MMF optical interconnection. Obtenion IEEE: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8667637>

SYNOPLYS. (2022). Retrieved from OptSim Product Overview. Obtenion SYNOPLYS: <https://www.synopsys.com/optical-solutions/rsoft/system-network-optsim.html>

TELECOMUNICACIONES ITSTULUM. (s.f.). Modulación ASK. Obtenido de <https://u6dispositivosdecomunicacionitstulum.wordpress.com/3-2-1-modulacion-por-desplazamiento-de-amplitud/>

Toolboom. (2018). Mediciones en la fibra óptica. Obtenido de <https://toolboom.com/es/articles-and-video/fiber-optic-measurements-otdr-trace-recording-and-analysis/>

Xi, Y., Bi, M., Xin, M., Wang, C., Yu, J., & Hu, W. (2021). Simplified SVM Equalization Algorithm Based on Single Hyperplane Training Enabled 50Gb/s PAM-4/8 With 10-G Optics in NG-PON System. Obtenion <https://ieeexplore.ieee.org/document/9512407>

Zhou, L., He, H., Zhang, Y., Chen, Y., Xiao, Q., & Dong, Z. (2020). Enhancement of spectral efficiency and power budget in WDN-PON employing LDPC-coded probabilistic shaping PAM8. Obtenion IEEE: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9019609>

## **ANEXOS**