

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN  
MENCIÓN REDES DE COMUNICACIONES**

**TEMA:**

**“ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE UNA RED DE ACCESO  
ÓPTICO COHERENTE EMPLEANDO SISTEMAS NG-PON.”**

**AUTOR:**

**EDISON RAMIRO TATAYO VINUEZA**

**DIRECTOR:**

**Dr. GERMAN ARÉVALO B. PhD.**

**QUITO - 2023**

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, EDISON RAMIRO TATAYO VINUEZA, con CI. 1723296529, autor del trabajo de graduación titulado: "ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE UNA RED DE ACCESO ÓPTICO COHERENTE EMPLEANDO SISTEMAS NG-PON", previo a la obtención del título profesional de Magister en Tecnologías de la Información mención Redes de Comunicación, de la Facultad de Ingeniería.

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 de la Universidad.

Quito, 2023



---

Edison Ramiro Tatayo Vinueza

CI: 1723296529

## APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi carácter de Director(a) - Tutor(a) del Trabajo de Posgrado Titulado: "ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE UNA RED DE ACCESO ÓPTICO COHERENTE EMPLEANDO SISTEMAS NG-PON", presentado por el maestrante EDISON RAMIRO TATAYO VINUEZA, titular de la Cédula de Identidad N° 1723296529 para optar al Grado de Magíster en Tecnologías de la Información mención Redes de Comunicación, 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 Ingeniería.

En la ciudad de Quito, a los 29 días de septiembre 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: 4% índice de similitud con otras fuentes.

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

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE UNA RED DE ACCESO ÓPTICO  
COHERENTE EMPLEANDO SISTEMAS NG-PON

INFORME DE ORIGINALIDAD

|                     |                     |               |                         |
|---------------------|---------------------|---------------|-------------------------|
| <b>4%</b>           | <b>4%</b>           | <b>0%</b>     | <b>3%</b>               |
| INDICE DE SIMILITUD | FUENTES DE INTERNET | PUBLICACIONES | TRABAJOS DEL ESTUDIANTE |

FUENTES PRIMARIAS

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Ecuador - PUCE<br>Trabajo del estudiante | <b>3%</b> |
| <b>2</b> | repositorio.puce.edu.ec<br>Fuente de Internet   | <b>1%</b> |
| <b>3</b> | bibdigital.epn.edu.ec<br>Fuente de Internet   | <b>1%</b> |

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, Edison Ramiro Tatayo Vinueza, con cedula de ciudadanía 1723296529, declaro que todos los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo de titulación, previo a la obtención del grado de Magister en Tecnologías de la Información mención Redes de Comunicación, 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 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.



---

Edison Ramiro Tatayo Vinueza

CI: 1723296529

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|  |    |
|--|----|
| DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN .....                         | 2  |
| APROBACIÓN DEL TUTOR .....                               | 3  |
| DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD .....      | 5  |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS .....                               | 6  |
| INDICE DE TABLAS .....                                   | 9  |
| INDICE DE FIGURAS .....                                  | 9  |
| RESUMEN .....  | 11 |
| ABSTRACT .....   | 12 |
| AGRADECIMIENTO .....                                     | 13 |
| DEDICATORIA .....  | 14 |
| CAPITULO I .....   | 15 |
| 1 Introducción .....                                     | 15 |
| 1.1 Justificación .....                                  | 15 |
| 1.2 Planteamiento del Problema .....                     | 16 |
| 1.3 Objetivos de la Investigación .....                  | 17 |
| 1.3.1 Objetivo general.....                              | 17 |
| 1.3.2 Objetivos específicos .....                        | 17 |
| CAPITULO II .....  | 18 |
| 2 FUNDAMENTACION TEÓRICA .....                           | 18 |
| 2.1 Antecedentes de la Investigación.....                | 18 |
| 2.2 Marco Conceptual.....                                | 19 |
| 2.2.1 Redes ópticas pasivas (PON) .....                  | 19 |
| 2.2.2 Estándares UIT para redes de Nueva Generación..... | 19 |
| 2.2.3 Alteraciones a la señal óptica .....               | 20 |
| 2.2.3.1 Atenuación.....                                  | 21 |
| 2.2.3.2 Dispersión cromática .....                       | 21 |
| 2.2.4 Modulación óptica.....                             | 22 |
| 2.2.4.1 Modulación Directa .....                         | 22 |
| 2.2.4.2 Modulación Externa .....                         | 23 |
| 2.2.5 Transmisión Óptica Coherente .....                 | 24 |
| 2.2.5.1 Modulador Mach-Zehnder.....                      | 24 |

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| 2.2.5.2           | Modulador de Intensidad .....   | 25 |
| 2.2.5.3           | Modulador PAM-4.....  | 27 |
| 2.2.5.4           | Modulador de Fase.....  | 28 |
| 2.2.5.5           | Modulador QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).....                             | 29 |
| 2.2.6             | Detección Directa .....   | 31 |
| 2.2.7             | Detección óptica coherente.....   | 31 |
| 2.2.7.1           | Detector Balanceado .....   | 32 |
| 2.2.7.2           | Detector Coherente QPSK.....  | 33 |
| CAPITULO III..... |   | 35 |
| 3                 | METODOLOGÍA .....   | 35 |
| 3.1               | Tipo de Investigación .....   | 35 |
| 3.2               | Diseño de la Investigación .....  | 35 |
| 3.3               | Unidades de Estudio.....  | 36 |
| 3.4               | Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....                           | 36 |
| 3.5               | Técnica de Análisis de Datos.....   | 37 |
| 3.6               | Operacionalización de Variables.....  | 37 |
| CAPITULO IV ..... |   | 38 |
| 4                 | DISEÑO Y COMPOSICIÓN DE LAS REDES ÓPTICAS .....                                 | 38 |
| 4.1               | Software de simulación OptiSystem.....  | 38 |
| 4.2               | Selección de esquemas de modulación .....                                       | 38 |
| 4.2.1             | Diagrama de bloques de la red PON con PAM-4 y Detección directa .....           | 39 |
| 4.2.2             | Diagrama de bloques de la red PON con QPSK y Detección coherente homodina<br>40 |    |
| 4.2.3             | Descripción de los componentes de la red PAM-4 con Detección Directa .....      | 41 |
| 4.2.3.1           | Matlab Component .....  | 42 |
| 4.2.3.2           | MZ Modulator Analytical .....   | 43 |
| 4.2.3.3           | Fibra óptica.....   | 44 |
| 4.2.3.4           | Fibras Compensadoras de Dispersión (DCF).....                                   | 44 |
| 4.2.4             | Diseño del modulador QPSK con Detección Homodina.....                           | 44 |
| 4.2.4.1           | Descripción de componentes del Transmisor QPSK.....                             | 45 |
| 4.2.4.1.1         | Generador de secuencias de bit y set de prueba.....                             | 45 |
| 4.2.4.1.2         | Generado de Secuencias PSK .....  | 46 |
| 4.2.4.1.3         | Generador de Pulsos M-arios .....   | 47 |
| 4.2.4.1.4         | Fuente Láser .....  | 47 |
| 4.2.4.1.5         | Modulador Mach-Zehnder.....   | 48 |

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| 4.2.4.1.6         | Desplazador de Fase.....  | 49 |
| 4.2.4.1.7         | Acoplador .....   | 50 |
| 4.2.4.1.8         | Transmisor con modulación compleja QPSK.....                                  | 50 |
| 4.2.4.2           | Descripción de los componentes de la red de transporte.....                   | 51 |
| 4.2.4.3           | Descripción de componentes del Detector Homodino.....                         | 52 |
| 4.2.4.3.1         | Oscilador Local.....  | 52 |
| 4.2.4.3.2         | Híbrido óptico de 90° .....   | 52 |
| 4.2.4.3.3         | Fotodetectores y Sistema de Amplificación .....                               | 53 |
| 4.2.4.3.4         | Bloque Universal de Procesamiento Digital de Señales.....                     | 54 |
| 4.2.4.3.5         | Bloque de Decisión.....   | 56 |
| 4.2.4.3.6         | Bloque Decodificador de Secuencias PSK .....                                  | 57 |
| 4.2.4.3.7         | Receptor con detección coherente homodina QPSK .....                          | 58 |
| 4.2.4.4           | Descripción de Herramientas de Medición y Visualización .....                 | 60 |
| 4.2.4.4.1         | Medidor de potencia óptico.....   | 60 |
| 4.2.4.4.2         | BER Test Set.....   | 60 |
| 4.2.4.4.3         | Diagrama de constelación .....  | 61 |
| 4.2.4.4.4         | Gráficas en el dominio del tiempo.....  | 61 |
| 4.2.4.4.5         | Diagrama del ojo .....  | 62 |
| 4.3               | Simulación de las redes PAM-4 y QPSK.....                                     | 63 |
| 4.3.1             | Simulación de las redes PAM-4 y QPSK con DSP a 50 Gbps .....                  | 64 |
| 4.3.2             | Simulación de las redes PAM-4 y QPSK a 100 Gbps .....                         | 66 |
| CAPITULO V .....  |   | 69 |
| 5                 | ANÁLISIS DE RESULTADOS.....   | 69 |
| 5.1               | Resultados con velocidad de transmisión a 50 Gbps con 3dB de atenuación ..... | 69 |
| 5.2               | Resultados con velocidad de transmisión a 50 Gbps con 6dB de atenuación ..... | 72 |
| 5.3               | Resultados con velocidad de transmisión a 50 Gbps con 9dB de atenuación ..... | 74 |
| 5.4               | Resultados con velocidad de transmisión a 100 Gbps con 3dB de atenuación..... | 76 |
| 5.5               | Resultados con velocidad de transmisión a 100 Gbps con 6dB de atenuación..... | 77 |
| 5.6               | Resultados con velocidad de transmisión a 100 Gbps con 9dB de atenuación..... | 78 |
| 5.7               | Análisis de eficiencia espectral .....  | 81 |
| CAPITULO VI ..... |   | 82 |
| 6                 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....  | 82 |
| 6.1               | Conclusiones .....  | 82 |
| 6.2               | Recomendaciones .....   | 84 |
| BIBLIOGRAFÍA..... |   | 85 |

|             |    |
|-------------|----|
| ANEXOS..... | 87 |
|-------------|----|

## INDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1</b> Características de las redes de Nueva Generación PON.....                  | 20 |
| <b>Tabla 2</b> Operacionalización de Variables.....                                       | 37 |
| <b>Tabla 3</b> Ubicación de los símbolos en el diagrama de constelación.....              | 57 |
| <b>Tabla 4</b> Comparación numérica de las redes ópticas PAM-4 y QPSK con DSP a 3dB. .... | 70 |
| <b>Tabla 5</b> Comparación numérica de las redes ópticas PAM-4 y QPSK con DSP a 6dB. .... | 73 |
| <b>Tabla 6</b> Comparación numérica de las redes ópticas PAM-4 y QPSK con DSP a 3dB. .... | 76 |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> Atenuación vs. Longitud de onda de trabajo.....                      | 21 |
| <b>Figura 2</b> Modulación On-Off Keying. ....                                       | 23 |
| <b>Figura 3</b> Componentes del Modulador de Intensidad. ....                        | 25 |
| <b>Figura 4</b> Función de Transferencia del MZM.....                                | 26 |
| <b>Figura 5</b> Modulación en Amplitud PAM-2 y PAM-4.....                            | 28 |
| <b>Figura 6</b> Modulador Dual Drive.....  | 28 |
| <b>Figura 7</b> Modulador I/Q QPSK.....  | 30 |
| <b>Figura 8</b> Esquema de detección coherente básico desbalanceado. ....            | 32 |
| <b>Figura 9</b> Receptor Balanceado.....   | 33 |
| <b>Figura 10</b> Esquema demodulador coherente QPSK.....                             | 34 |
| <b>Figura 11</b> Diagrama de bloques red PON con PAM-4 y detección directa.....      | 39 |
| <b>Figura 12</b> Diagrama de bloques de la red PON QPSK con detección coherente..... | 41 |
| <b>Figura 13</b> Diseño de red PON PAM-4-DD en OptiSystem. ....                      | 42 |
| <b>Figura 14</b> Configuraciones bloque Matlab. ....                                 | 43 |
| <b>Figura 15</b> Diagrama de bloques Transmisor QPSK.....                            | 45 |
| <b>Figura 16</b> Configuraciones Bert Test Set.....                                  | 46 |
| <b>Figura 17</b> Bloque PSK Sequence Generator.....                                  | 46 |
| <b>Figura 18</b> Configuraciones M-ary Pulse Generator.....                          | 47 |
| <b>Figura 19</b> Fuente de luz laser.....  | 47 |
| <b>Figura 20</b> Modulador LiNb MZM dual drive en modo de operación push-pull. ....  | 48 |
| <b>Figura 21</b> Bloque de Desfase.....  | 49 |
| <b>Figura 22</b> Esquema de conexión acopladores 2x2. ....                           | 50 |
| <b>Figura 23</b> Modulador QPSK complejo.....  | 51 |
| <b>Figura 24</b> Red de Transporte.....  | 51 |
| <b>Figura 25</b> Oscilador Local.....  | 52 |
| <b>Figura 26</b> Componentes que conforman el Híbrido Óptico de 90°.....             | 53 |
| <b>Figura 27</b> Bloque de Fotodetección y amplificación.....                        | 53 |
| <b>Figura 28</b> Configuraciones Universal DSP.....                                  | 56 |
| <b>Figura 29</b> Configuraciones Bloque de Decisión.....                             | 56 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 30</b> Configuración Decodificador de Secuencias PSK. ....                          | 57 |
| <b>Figura 31</b> Receptor QPSK Coherente homodino. ....                                       | 58 |
| <b>Figura 32</b> Diseño del Sistema complejo QPSK. ....                                       | 59 |
| <b>Figura 33</b> Bloque medidor de potencia óptica. ....                                      | 60 |
| <b>Figura 34</b> Bloque medidor de BER. ....  | 60 |
| <b>Figura 35</b> Visualizador de Diagrama de Constelación. ....                               | 61 |
| <b>Figura 36</b> Representación de símbolos PAM-4 en el transmisor y receptor. ....           | 62 |
| <b>Figura 37</b> Diagrama del ojo PAM-4 en el receptor. ....                                  | 63 |
| <b>Figura 38</b> Diagramas de ojo en transmisión a 50 Gbps con PAM-4 a 60 Km. ....            | 64 |
| <b>Figura 39</b> Diagramas de constelación QPSK con DSP a 50 Gbps a 3 dB de atenuación. ....  | 64 |
| <b>Figura 40</b> Diagramas de constelación QPSK con DSP a 50 Gbps a 6 dB de atenuación. ....  | 65 |
| <b>Figura 41</b> Diagramas de constelación QPSK con DSP a 50 Gbps a 9 dB de atenuación. ....  | 65 |
| <b>Figura 42</b> Diagramas de ojo en transmisión a 100 Gbps con PAM-4 a 40 Km. ....           | 66 |
| <b>Figura 43</b> Diagramas de constelación QPSK con DSP a 100 Gbps a 3 dB de atenuación. .... | 67 |
| <b>Figura 44</b> Diagramas de constelación QPSK con DSP a 100 Gbps a 6 dB de atenuación. .... | 67 |
| <b>Figura 45</b> Diagramas de constelación QPSK con DSP a 100 Gbps a 9 dB de atenuación. .... | 68 |
| <b>Figura 46</b> BER vs Potencias Recibida 50 Gbps-3dB. ....                                  | 70 |
| <b>Figura 47</b> BER vs Distancia del enlace 50 Gbps-3dB. ....                                | 71 |
| <b>Figura 48</b> BER vs Potencia Recibida 50 Gbps-6dB. ....                                   | 72 |
| <b>Figura 49</b> BER vs Distancia del enlace 50Gbps-6dB. ....                                 | 73 |
| <b>Figura 50</b> BER vs Potencia Recibida 50 Gbps-9dB. ....                                   | 74 |
| <b>Figura 51</b> BER vs Distancia del enlace 50 Gbps-9dB. ....                                | 75 |
| <b>Figura 52</b> BER vs Potencia Recibida 100 Gbps-3dB. ....                                  | 76 |
| <b>Figura 53</b> BER vs Potencia Recibida 100 Gbps-6dB. ....                                  | 78 |
| <b>Figura 54</b> BER vs Potencia Recibida 100 Gbps-9dB. ....                                  | 79 |
| <b>Figura 55</b> BER vs Distancia del enlace 100 Gbps. ....                                   | 80 |
| <b>Figura 56</b> Eficiencia espectral PAM-4 vs QPSK. ....                                     | 81 |

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar el desempeño de una red de acceso óptico coherente frente a una red de acceso óptico basada en modulación de amplitud, para lo cual se realizó un cuasi experimento por medio de la herramienta de simulación OptiSystem en co-simulación con Matlab, mismo que permite realizar el despliegue de dos tipos de redes ópticas, la primera se basa en modulación PAM-4 y detección coherente mientras que la segunda red emplea la modulación compleja QPSK y detección coherente. Así mismo con el propósito de identificar la importancia de la unidad de procesamiento digital de señales (DSP) en los esquemas de detección coherente se evalúa de manera cuantitativa el rendimiento de la detección coherente con y sin uso de DSP. La necesidad de evaluar el performance de las redes basadas en intensidad frente a las redes NGPON se debe a la alta demanda de tráfico para aplicaciones en tiempo real que requieren velocidades de transmisión superiores a los 10 Gbps. Los resultados obtenidos evidencian una mejora significativa en la sensibilidad del receptor en promedio 3 dB empleando técnicas de modulación compleja y detección coherente. La detección coherente en conjunto con los algoritmos de procesamiento digital de señales efectivamente incrementa la capacidad de las redes ópticas satisfaciendo los requerimientos de altas tasas de transmisión y optimización del espectro óptico. Adicional a este estudio se podría implementar esquemas de doble polarización con el propósito de optimizar el ancho de banda y multiplexar varias longitudes de onda dentro de una misma fibra óptica

**Palabras clave:** modulación compleja, detección coherente, PAM-4, QPSK, NGPON, Bit Error Rate, diagrama de ojo, diagrama de constelación, OptiSystem

## ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the performance of a coherent optical access network compared to an optical access network based on amplitude modulation, for which a quasi-experiment was carried out using the OptiSystem simulation tool in co-simulation with Matlab, which allows the deployment of two types of optical networks, the first is based on PAM-4 modulation and coherent detection while the second network uses complex QPSK modulation and coherent detection.

Likewise, with the purpose of identifying the importance of the digital signal processing unit (DSP) in coherent detection schemes, the performance of coherent detection with and without the use of DSP is quantitatively evaluated. The need to evaluate the performance of intensity-based networks compared to NGPON networks is due to the high traffic demand for real-time applications that require transmission speeds greater than 10 Gbps. The results obtained show a significant improvement in receiver sensitivity by an average of 3 dB using complex modulation and coherent detection techniques. Coherent detection in conjunction with digital signal processing algorithms effectively increases the capacity of optical networks by satisfying the requirements for high transmission rates and optimization of the optical spectrum. In addition to this study, double polarization schemes could be implemented with the purpose of optimizing the bandwidth and multiplexing several wavelengths within the same optical fiber.

**Keywords:** complex modulation, coherent detection, PAM-4, QPSK, NGPON, Bit Error Rate, eye diagram, constellation diagram, OptiSystem

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por permitirme alcanzar un peldaño más en mi formación académica,  
por brindarme sabiduría y fortaleza para no rendirme en el camino.

A mis padres y familia por su apoyo incondicional y su motivación para que continúe con  
mi formación académica y profesional.

A mi tutor el Ing. Germán Arévalo, PhD por su paciencia y asesoría.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, gracias por su apoyo incondicional.

A mis amigos y familiares que con su granito de arena me motivaron a culminar con  
éxito este programa.

A mí mismo, recuerda el camino es largo y difícil, pero has conseguido las herramientas  
para conquistar el objetivo.

## CAPITULO I

### 1 Introducción

En el presente trabajo se analiza el desempeño de una red de acceso óptico coherente frente a una red de acceso óptico basada en modulación de amplitud, para lograr este objetivo se realiza un cuasi experimento por medio de la herramienta de simulación OptiSystem en co-simulación con Matlab, mismo que permite realizar el despliegue de dos tipos de redes ópticas, la primera se basa en modulación PAM-4 y detección coherente mientras que la segunda red emplea la modulación compleja QPSK y detección coherente. Después de evaluar las redes

En el capítulo I se detalla el planteamiento del problema y justificación del problema. En el capítulo II se describen los fundamentos teóricos de los sistemas de modulación de intensidad y modulación directa, así como los esquemas de modulación compleja con detección coherente. En el capítulo III se determina la metodología a utilizar, mientras que en el capítulo IV se describe la arquitectura a utilizar y se diseñan las redes con modulación PAM-4 y QPSK.

En la sección V se analizan los resultados obtenidos a diferentes parámetros de velocidad de transmisión, distancia y atenuación. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación realizado.

#### 1.1 Justificación

Las redes ópticas coherentes sumados a un sistema de multiplexación, con separación entre canales de 10 GHz (UDWDM), pueden resolver los problemas de capacidad que afrontan los proveedores de red que basan sus redes de acceso en esquemas de modulación de intensidad y detección directa, pues los sistemas coherentes proporcionan mayor eficiencia espectral y flexibilidad para transportar más información sobre la misma fibra óptica.

Este tipo de redes de acceso apoyados de esquemas de modulaciones complejas, detección coherente y compensación de dispersión por medio del procesamiento digital de

señales, permiten generar señales de datos eficientes a altas tasas de transmisión sobre un enlace de fibra. (Keysight Technologies, 2019). Comparar el desempeño de las redes coherentes frente a las redes tradicionales permitirá a los proveedores de servicios de internet tomar decisiones sobre la inserción de nuevas tecnologías sobre su infraestructura de red para proporcionar un mejor servicio que incluye mayores velocidades de transmisión.

## **1.2 Planteamiento del Problema**

En la actualidad la alta demanda de tráfico para aplicaciones en tiempo real requieren de velocidades de transmisión superiores a los 10 Gbps, sin embargo, las redes pasivas ópticas (PON) basadas en modulación de amplitud o intensidad (OOK o PAM-2) no son robustas, pues presentan una limitación en su eficiencia espectral y se debe principalmente a que cada canal óptico multiplexado se ensancha debido a los efectos de la dispersión y se superpone con los canales vecinos, ocasionando distorsión y degradación de la señal en redes de larga distancia y consecuentemente se presenta incremento de pérdidas en la transmisión.

Con base en este antecedente, se pretende analizar el desempeño de las redes ópticas coherentes, debido a que al trabajar con esquemas de modulación compleja se obtiene una mejora de la eficiencia espectral y se envían más bits por símbolo, por lo tanto, se alcanzan mayores velocidades de transmisión, con mínima latencia aprovechando al máximo el ancho de banda disponible.

Actualmente se disponen de redes de acceso coherentes las cuales están conformadas de la siguiente manera: en el lado del transmisor, se dispone de moduladores complejos que utilizan técnicas de únicamente fase y fase y cuadratura, mientras que en el lado del receptor se disponen de demoduladores de tipo homodino y heterodino. Por consiguiente, es necesario analizar y seleccionar los esquemas de modulación compleja y demodulación coherente que permitan establecer una comparativa frente a las redes de acceso basadas en modulación por amplitud.

Para establecer un análisis comparativo de las redes de acceso basadas en modulación en amplitud y redes de acceso coherente, se emplearán las modulaciones PAM-4 y Q-PSK, las cuales son esquemas de modulación que llevan la misma cantidad de información, sin embargo, presentan cambios significativos en su eficiencia espectral y robustez en la transmisión.

### **1.3 Objetivos de la Investigación**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Analizar el desempeño de una red de acceso óptica coherente frente a una red de acceso óptico basada en modulación de amplitud.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Revisar en la bibliografía la situación actual de las redes NG-PON, priorizando sus esquemas de modulación y multiplexación.
- Identificar un esquema de modulación de fase M-PSK para establecer una comparación con las redes ópticas moduladas en amplitud.
- Seleccionar el esquema de detección coherente más eficiente para las redes de acceso NG-PON.
- Diseñar y simular una red de acceso NG-PON basada completamente en óptica coherente.
- Evaluar a través de una simulación un sistema óptico basado en PAM-4 y comparar su rendimiento frente a un sistema óptico coherente basado en Q-PSK.

## CAPITULO II

### 2 FUNDAMENTACION TEÓRICA

#### 2.1 Antecedentes de la Investigación

En la actualidad las aplicaciones consumidas por los usuarios tales como internet de alta velocidad, TV de alta definición, realidad virtual, almacenamiento en la nube, IoT, aprendizaje automático, inteligencia artificial, entre otros, requieren de un mayor ancho de banda y menor latencia, comprometiendo la capacidad propuesta por los prestadores de servicio basados en la tecnología GPON, los cuales proveen velocidades de transmisión de 1,25 Gbps y 2.4 Gbps de subida y bajada respectivamente. Para satisfacer la gran cantidad de tráfico creciente, se propone el uso de las redes de acceso óptico coherentes sobre redes de nueva generación PON (NG-PON), las cuales incrementan considerablemente el ancho de banda, velocidad de transmisión, alcance máximo y número de usuarios utilizando las redes pasivas previamente desplegadas.(Celi Izquierdo, 2022)

El resurgimiento de la transmisión óptica coherente comenzó con el desarrollo de un sistema óptico coherente basado en modulación por desplazamiento de fase en cuadratura diferencial (DQPSK), logrando alcanzar 40 Gbps a 20 Gbauds por canal WDM. Hoy en día para atender a las altas velocidades de transmisión se dispone de las tecnologías 50G-PON y Higher Speed PON (HSPON) o ITU-T G.9804 y se recomienda utilizar esquemas de modulación compleja, basados en fase y cuadratura, las cuales reducen el ancho de banda requerido y admiten la compensación de la dispersión cromática con ayuda del procesamiento digital de señales.(Albakay, 2018a, p. 3)

## **2.2 Marco Conceptual**

### **2.2.1 Redes ópticas pasivas (PON)**

Las redes de comunicación óptica pasivas se caracterizan por estar conformadas exclusivamente de elementos ópticos pasivos, los cuales no requieren de ningún tipo de fuente de alimentación para su normal funcionamiento, donde la señal óptica se divide a través de splitters y se distribuye a múltiples usuarios. La ventaja de las redes PON respecto de las redes de cobre radica en el uso de splitters, los cuales con un solo hilo de fibra óptica pueden conectar 32 y 64 usuarios.

Las redes PON proporcionan una variedad de servicios que incluye acceso a internet, voz y video a velocidades de 2.5 y 10 Gbps. Además, pueden cubrir distancias que van desde 20 hasta 60 km desde la oficina central.

Por lo general, este tipo de redes basan su funcionamiento en sistemas de modulación de intensidad y detección directa (IM/DD). Es decir, se utiliza un láser con modulación directa o un modulador externo que transforma las señales eléctricas en pulsos de luz, para luego ser enviados a través de la fibra óptica, mientras que en la recepción se utiliza fotodetectores que realizan el proceso inverso. El rendimiento de este tipo de redes se ve limitado por las pérdidas de la red óptica de transporte, además de la baja eficiencia del espectro óptico debido a la transmisión de una o pocas longitudes de onda ampliamente espaciadas entre sí. (Velásquez, 2019, p. 8)

### **2.2.2 Estándares UIT para redes de Nueva Generación**

La UIT dispone de dos variantes de redes de Nueva Generación siendo estas: NG-PON (Next Generation - PON) también conocida como XG-PON (Extendend PON) y NG-PON2 (Next Generation - PON2) o WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing – PON. Este tipo de redes de nueva generación se caracterizan por ofrecer una mayor capacidad de ancho de banda y

velocidades de transmisión más altas, que las hacen ideales para satisfacer las crecientes demandas de tráfico. (Velásquez, 2019, p. 9). En la Tabla 1, se presenta un resumen de las características más relevantes de las redes ópticas pasivas de nueva generación.

**Tabla 1**

*Características de las redes de Nueva Generación PON.*

| Características              | NG-PON / XG-PON           | NG-PON2                 |
|------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Estándar                     | ITU-T G.987.x             | ITU-T G.989.x           |
| Velocidad de Transmisión     | Asimétricos: 10/2.5 Gbps  | Hasta 40 Gbps de bajada |
|                              | Simétricos: hasta 10 Gbps | Hasta 10 Gbps de subida |
| Tecnología de Multiplexación | TDM                       | TWDM                    |
|                              |                           | PtP WDM                 |
| Modulación                   | M-PSK, QAM                | M-QAM, OFDM             |
| Coexistencia                 | G-PON, B-PON y E-PON      | G-PON, B-PON y E-PON    |
| División de usuarios         | 1:64                      | 1:256                   |
| Min. alcance de fibra (km)   | 20                        | 40                      |

Nota: Adaptado de Velásquez, 2019, p. 9

### 2.2.3 Alteraciones a la señal óptica

La señal óptica al viajar por la fibra óptica sufre alteraciones que afectan a la propagación de la luz, si estos efectos no son mitigados a tiempo ocasionan ensanchamiento de los pulsos, retardos, interferencia entre símbolos que degradan la calidad de la transmisión. El comportamiento de la señal óptica  $x(z, t)$  a través de la fibra óptica puede describirse por medio de la ecuación no lineal de Schrödinger que se muestra en la ecuación 1, donde  $z$  representa la distancia y  $t$  el ancho temporal del pulso.

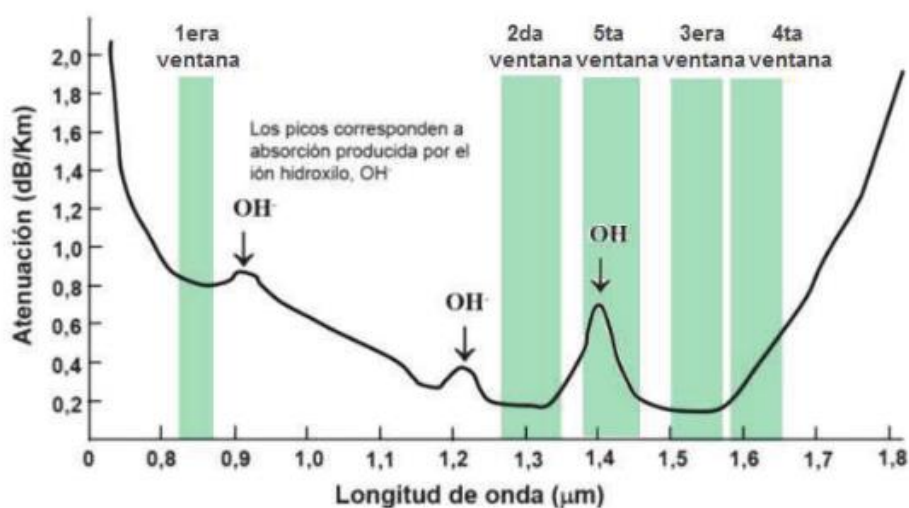
$$\frac{\partial x(z, t)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} x(z, t) - j \frac{\beta_2}{2} * \frac{\partial^2 x(z, t)}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} * \frac{\partial^3 x(z, t)}{\partial t^3} - j\gamma |x(z, t)|^2 x(z, t) \quad (1)$$

### 2.2.3.1 Atenuación

La atenuación ( $\alpha$ ) es la disminución de intensidad de la señal óptica a medida que viaja a través de la fibra óptica, depende directamente de la distancia del enlace y de la longitud de onda de trabajo, se mide en  $dB/km$ . En la **Figura 1** se presenta las ventanas de operación de la fibra óptica y su respectiva relación con la atenuación.

**Figura 1**

*Atenuación vs. Longitud de onda de trabajo*



*Nota: Adaptado de Diseño, simulación y pruebas de un laboratorio de sistemas de comunicaciones ópticas usando Matlab Communications System Toolbox, Simulink y OptiSystem, Hidalgo Moreta, 2016, p. 44.*

### 2.2.3.2 Dispersión cromática

Los términos  $\beta_2$  y  $\beta_3$  de la ecuación de Schrödinger describen cómo se ensancha el pulso producto de la dispersión cromática. Este fenómeno está asociado con el índice de refracción de la fibra óptica, donde las diferentes longitudes de onda de la luz se propagan a diferente velocidad y al llegar al receptor a diferentes tiempos ocasionan el ensanchamiento del pulso óptico transmitido. El coeficiente dispersión cromático se expresa en  $ps/km * ns$ . (Torres Ferrera, 2017, pp. 143-145).

## **2.2.4 Modulación óptica.**

La modulación óptica se define cómo el proceso de insertar información eléctrica en una portadora óptica con el propósito de que la señal resultante sea más robusta y pueda ser transportada en un medio guiado como lo es la fibra óptica. Los formatos de modulación pueden ser analógico (AM, FM y PM) o digital (M-ASK, M-PSK, M-FSK, M-QAM) en la cual se modifican varios parámetros de la señal como la amplitud, la fase o la frecuencia.

Para que una señal de datos eléctrica modifique los parámetros de salida de la señal óptica resultante, se dispone de dos técnicas de modulación: modulación directa y modulación externa, la descripción de funcionamiento ventajas y desventajas se mencionan a continuación.

### **2.2.4.1 Modulación Directa**

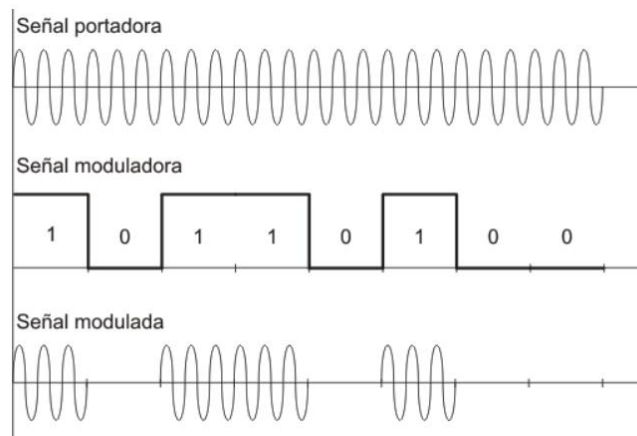
La modulación directa es la técnica de modulación más sencilla de implementar para transmitir información en un sistema de comunicaciones ópticas. Basa su funcionamiento en la variación de corriente de conducción de un láser directamente modulado, de esta manera la señal moduladora eléctrica se convierte en variaciones de potencia óptica, es decir, presencia o ausencia de luz a la salida del modulador.

Este tipo de modulación presenta limitaciones en cuanto a velocidad de transmisión, puede realizar transmisiones de hasta 2.5 Gbps, debido a que depende directamente del tiempo de respuesta de la fuente láser frente al estímulo de corriente. Al aumentar la tasa de transmisión se producirán más retardos de conmutación, dificultando los procesos de detección en el receptor. Es necesario también considerar que existe degradación de la señal producto del efecto chirp, el cual sumado a los efectos de la dispersión cromática producen un incremento en la interferencia entre símbolo (ISI). (Acosta Ortiz, 2019, pp. 17-18)

La técnica de modulación directa más utilizada en las redes de comunicaciones ópticas es la modulación On-Off Keying (OOK), que establece su funcionamiento en la emisión de luz para un 1 lógico y ausencia de luz para un 0 lógico, como se observa en la Figura 2.

## Figura 2

*Modulación On-Off Keying.*



*Nota:* Adaptado de *ASK-Desplazamiento de amplitud*, [Imagen], Textos Científicos, 2005, (<https://www.textoscientificos.com/redes/modulacion/ask>) CC By 2.0.

### 2.2.4.2 Modulación Externa

Esta técnica de modulación aparece como solución a los sistemas de comunicación óptica de alta velocidad de transmisión y largo alcance. Para este esquema de modulación se introduce un dispositivo externo denominado interferómetro de Mach Zehnder (MZI), que actúa como un interruptor controlado por la señal de entrada de datos eléctrica, basado en el efecto electroóptico, permitiendo de esta forma variar la intensidad o fase de la fuente de luz.

La separación del modulador y la fuente láser contribuye a reducir significativamente el efecto del chirp respecto de las señales moduladas directamente, evitando el deterioro de la señal óptica desde la fuente. Si, bien la modulación externa presenta grandes ventajas frente a la modulación directa es necesario mencionar que su implementación es más costosa, puesto

que se requiere de mayor cantidad de componentes complejos, cómo lo son: MZM single drive y dual drive, fuentes de voltaje, desfasadores de señal, combinadores, los cuales se encuentran embebidos en un solo encapsulado.

### **2.2.5 Transmisión Óptica Coherente**

La transmisión óptica coherente es la clave para alcanzar altas velocidades de transmisión dentro de las redes NG-PON, este tipo de redes proporcionan alta eficiencia espectral, emplean procesamiento digital de señales (DSP) para compensar los efectos no lineales de la fibra como la Dispersión Cromática (DC) y la Dispersión por Modo de Polarización (PMD) (Arevalo et al., 2019, p. 1).

Entre las ventajas más relevantes de los sistemas ópticos coherentes se tiene: redes altamente flexibles frente a los sistemas basados en modulación de intensidad, permiten aumentar la capacidad de transmisión variando el tipo de modulación e incrementando el orden M-ario del esquema de modulación, incrementan la sensibilidad del receptor de 15 a 20 dB debido al uso de procesamiento digital de señales alcanzando largas distancias de transmisión. (Albakay, 2018, p. 4)

#### **2.2.5.1 Modulador Mach-Zehnder**

Uno de los elementos principales utilizados en los esquemas de modulación externa y la base de las redes ópticas coherentes es el modulador Mach-Zehnder, conocido por sus siglas MZM. El dispositivo mitiga las limitaciones de conmutación de la modulación óptica directa, disminuyendo considerablemente el ruido insertado por la fuente laser y admite varios formatos de modulación de alto orden, mismos que implican un aumento en la capacidad de transmisión y robustez de la señal.

El MZM basa su funcionamiento en el efecto electroóptico, es decir produce un cambio en el índice de refracción en función de la variación de campo eléctrico aplicado, típicamente los

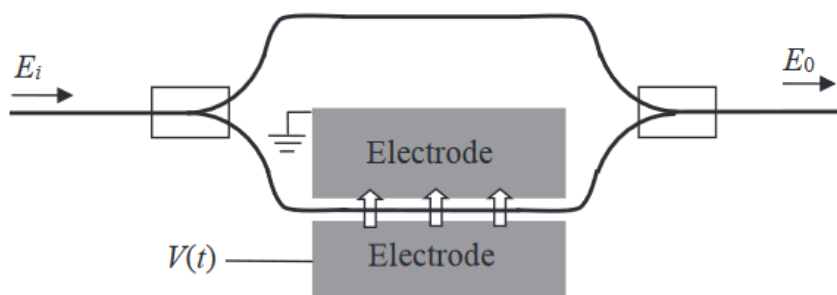
MZM están constituidos por substratos de Niobato de Litio ( $LiNbO_3$ ) debido a la baja atenuación que se presentan a las longitudes de onda destinadas a las transmisiones por fibra ópticas.(Hui, 2020a, p. 300)

### 2.2.5.2 Modulador de Intensidad

Los moduladores de intensidad están constituidos por circuitos de guía de onda planos en conjunto con un interferómetro de Mach-Zehnder, como se indica en la Figura 3. En esta configuración, la señal óptica de entrada de campo complejo  $E_i$  se divide en igual proporción por los dos brazos del interferómetro, por uno de los brazos se aplica un campo eléctrico  $V(t)$  para introducir un retraso en la fase de la señal respecto de la señal de entrada, controlando así la fase diferencial de los dos brazos. El combinador toma las dos señales de luz provenientes de los brazos del interferómetro y las combina obteniendo una señal óptica modulada en intensidad  $E_o$ .(Hui, 2020, p. 307)

**Figura 3**

*Componentes del Modulador de Intensidad.*



*Nota:* Adaptado de *Introduction to fiber-optic communications* (p. 307), por Rongqing Hui, 2020, Academic Press.

La señal óptica resultante puede ser controlada por las fases de las señales de cada brazo  $\phi_1$  y  $\phi_2$ , como se describe en la función de transferencia de campo eléctrico (ecuación 2).

Dónde cada fase de la señal  $\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} nL_1$  y  $\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} nL_2$  dependen del índice de refracción ( $n$ ), la longitud de onda ( $\lambda$ ) y la longitud de cada brazo del interferómetro  $L_1$  y  $L_2$  (Albakay, 2018, p. 30)

$$E_o(t) = \frac{e^{i\phi_1} + e^{i\phi_2}}{2} E_i(t) \quad (2)$$

Si, en la ecuación 1 se reemplazan los valores de fase de  $\phi_1 = \phi_2 = 2\pi$ , es decir, las señales se encuentran en fase, se obtiene como resultado que la señal de salida es la misma que la señal de entrada  $E_o(t) = E_i(t)$ , generando una interferencia constructiva. De manera similar, si las señales se encuentran desfasadas  $\phi_1 = 2\pi$  y  $\phi_2 = \pi$ , la señal resultante es nula  $E_o(t) = 0$ , obteniendo una interferencia destructiva. Por lo tanto, al variar el campo eléctrico  $V(t)$  se controla el desfase diferencial entre las dos señales de los brazos del interferómetro, obteniendo como resultado interferencia destructiva o constructiva de la señal óptica.

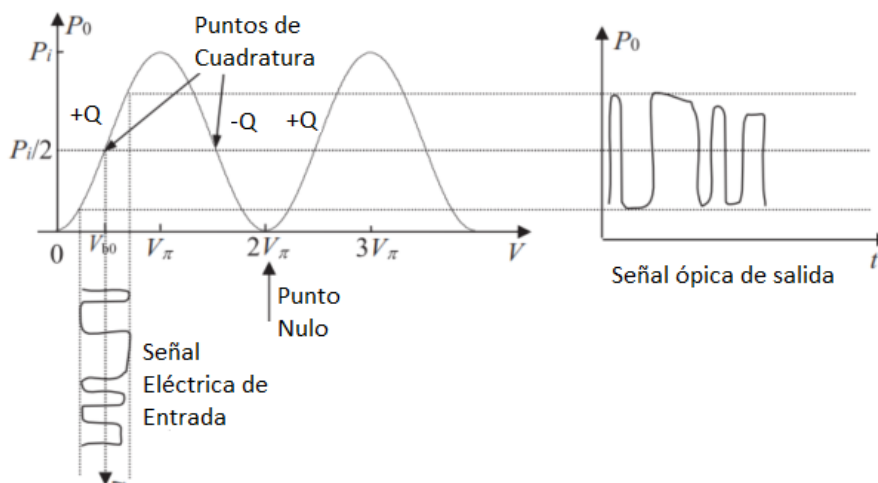
De la misma manera que se expresa el funcionamiento del modulador de intensidad en función del campo eléctrico, se puede obtener la función de transferencia del modulador en función las potencias de entrada ( $P_i$ ) y salida ( $P_o$ ), como se indica en la ecuación 3.

$$P_o = \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) P_i, \quad \text{dónde } \Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (3)$$

A este modo de operación del MZM se le conoce como push-push y permite operar en los puntos de cuadratura positiva y negativa de la función de transferencia, obteniendo a la salida del modulador señales ópticas moduladas con su máxima amplitud de potencia, cómo se indica en la Figura 4. (Hui, 2020, p. 314)

#### **Figura 4**

*Función de Transferencia del MZM*



Nota: Adaptado de *Introduction to fiber-optic communications* (p. 314), por Rongqing Hui, 2020, Academic Press.

Adicionalmente, si el MZM dispone de un driver de polarización DC de BIAS, se puede utilizar este elemento para controlar la fase inicial de las señales.

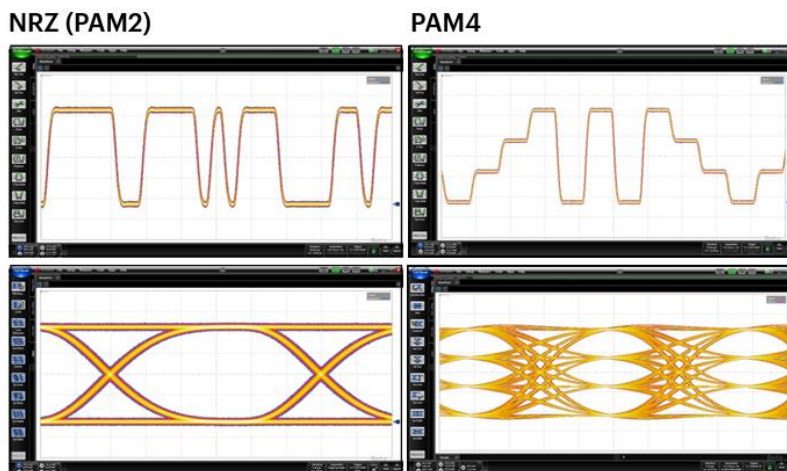
### 2.2.5.3 Modulador PAM-4

La modulación PAM-4 es una técnica que emplea cuatro niveles de amplitud diferentes para codificar los símbolos, como se observa en la **Figura 5**, de esta manera se consigue duplicar la velocidad de bits en el canal de transmisión respecto de OOK o PAM-2 sin la necesidad de duplicar el ancho de banda necesario.

El patrón de codificación de cada nivel puede ser binario o por código de Gray, siendo este último llamado también código binario reflejado en el que los símbolos sucesivos difieren de un bit binario teniendo la siguiente secuencia 00, 01, 11, 10 (Keysight, s. f., p. 4) . Sin embargo, la modulación M-PAM es más susceptible a distorsiones y ruido haciendo necesario la incorporación de técnicas de procesamiento de señales y corrección de errores que garanticen una transmisión confiable.

**Figura 5**

Modulación en Amplitud PAM-2 y PAM-4



Nota: Adaptado de *Pulse Amplitude Modulation* (p. 3), Keysight, Academic Press.

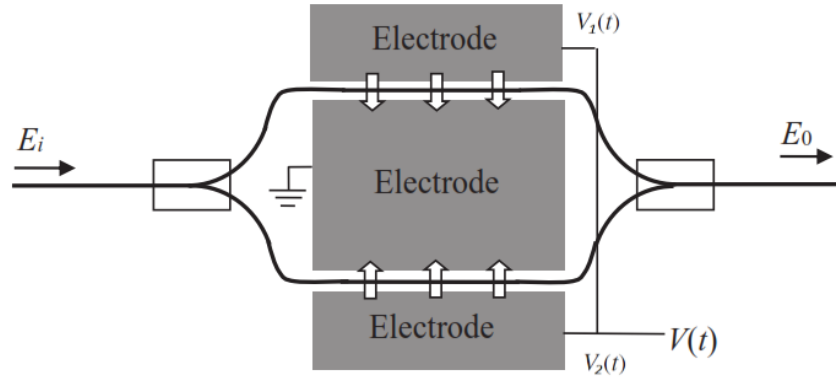
#### 2.2.5.4 Modulador de Fase

Los moduladores de campo óptico complejo resultan ser más eficientes en cuanto a la capacidad de transmisión frente a los moduladores de intensidad, debido a que este tipo de moduladores transportan información en intensidad y fase óptica.

Para la construcción de moduladores en campo óptico complejo se requiere de moduladores electroópticos de intensidad que controlen y reduzcan significativamente el efecto del chirp. Estos moduladores se conforman de un MZI con la misma longitud en cada brazo, pero con aplicación de campos eléctricos opuestos  $V_1(t) = -V_2(t)$ , como se observa en la Figura 6. A este tipo de modulador se le conoce como modulador MZM Dual Drive. (Hui, 2020, p. 316)

**Figura 6**

*Modulador Dual Drive.*



*Nota:* Adaptado de *Introduction to fiber-optic communications* (p. 310), por Rongqing Hui, 2020, Academic Press.

Mediante el uso de un MZM Dual Drive se puede implementar un modulador de fase insertando un campo eléctrico en cada uno de los brazos del modulador. En la ecuación 4, se indica la función de transferencia de campo eléctrico del MZM Dual Drive, el cual permite obtener diferentes ángulos de cambio de fase únicamente controlando el campo eléctrico  $V(t)$ . Dónde el voltaje de media onda ( $V_\pi$ ) es el voltaje requerido para inducir un cambio de fase de 180 grados o  $\pi$  radianes.d. (Albakay, 2018b, p. 30).

$$E_o(t) = \frac{e^{i\frac{v_1(t)}{V_\pi}\pi} + e^{i\frac{v_2(t)}{V_\pi}\pi}}{2} E_i(t)$$

$$E_o(t) = E_i(t) e^{j\frac{v_1(t)+v_2(t)}{2V_\pi}\pi} \cos\left(\frac{v_1(t) - v_2(t)}{2V_\pi}\pi\right) \quad (4)$$

A este modo de operación del MZM con dos drivers de control se le denomina push-pull y trabaja en el punto nulo de la función de transferencia del MZM, como se indica en la Figura 4.

### 2.2.5.5 Modulador QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)

Una vez descrito los principios de funcionamiento del MZM, configuraciones y modos de operación, a continuación, se describe el esquema básico de un modulador IQ. Los esquemas de modulación digital ampliamente utilizados en los sistemas de radio frecuencia también pueden ser empleados en los sistemas de comunicaciones ópticas, con la principal diferencia que la

frecuencia de operación de la señal portadora trabaja en el orden de los THz. (Keysight Technologies, 2018, p. 5)

En general, las modulaciones digitales M-arias incrementan la cantidad de bits por símbolo transmitido y mejoran la eficiencia espectral al usar todos los parámetros de una onda de luz para codificar información en amplitud, frecuencia y fase, de modo que cada  $n$  bits de datos de entrada se asignarán a un símbolo  $M$ , tal como se indica en la ecuación 5.

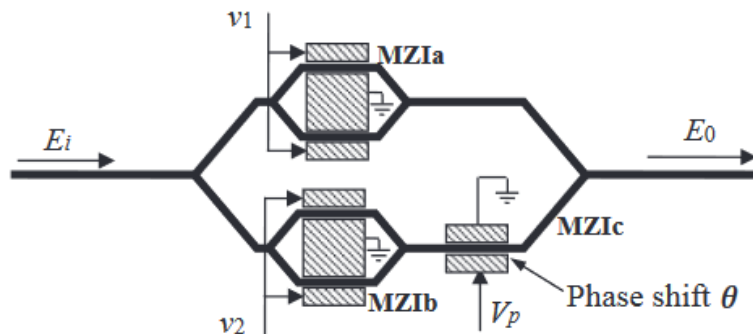
$$n = \log_2 M \quad (5)$$

Para el caso particular de QPSK, se utilizan cuatro símbolos para transportar información, es decir  $n=2$ , cada símbolo lleva dos bits de información y reduce la eficiencia espectral de la señal a la mitad respecto de las señales basadas en PAM-2 o OOK basadas en intensidad.

De manera general un modulador electroóptico QPSK se construye a partir de dos MZM Dual drive independientes que representan cada brazo del modulador en fase (I) y cuadratura (Q) y un control de fase óptico de  $\frac{\pi}{2}$  rads, cómo se indica en la Figura 7. Los MZM experimentan un cambio de fase idéntico en ambos brazos, es decir emplean el modo de operación push-pull, donde  $v(t) = v_1(t) = -v_2(t)$ .

### Figura 7

Modulador I/Q QPSK



Nota: Adaptado de *Introduction to fiber-optic communications* (p. 316), por Rongqing Hui, 2020, Academic Press.

El modulador QPSK toma el flujo de bits eléctricos entrantes y los divide en dos componentes mediante un demultiplexor para generar el flujo de las señales I y Q obteniendo modulación de fase de cada uno de los flujos en los MZM. A la salida del ramal inferior Q se le añade un desplazamiento de fase  $\frac{\pi}{2}$  a la señal modulada y se recombinan las señales en fase y cuadratura dando como resultado una señal modulada QPSK.

### 2.2.6 Detección Directa

En las redes ópticas basadas en intensidad, en el lado del receptor se requiere únicamente un fotodetector para recuperar la información, el cual se encarga de la conversión opto-eléctrica. La corriente resultante a la salida del fotodetector matemáticamente se expresa como el producto de la señal óptica recibida ( $S_{Rx}$ ) y su complejo conjugado ( $S_{Rx}^*$ ), como se indica en la ecuación 6. El resultado únicamente contiene información de amplitud de la señal. (Keysight Technologies, 2018, p. 37)

$$I_{Photo} = S_{Rx} \cdot S_{Rx}^*$$

$$I_{Photo} = A e^{i\phi_s} e^{i\omega_s} \cdot A e^{-i\phi_s} e^{-i\omega_s} = A^2 \quad (6)$$

### 2.2.7 Detección óptica coherente

A diferencia de los sistemas ópticos tradicionales basados en modulación por desplazamiento de amplitud como OOK, donde se requiere de un solo fotodetector para la detección de amplitud de portadora. Los sistemas ópticos coherentes basados en M-PSK, M-QAM y APSK, emplean técnicas más complejas y por consiguientes más costosas que permiten la detección de la fase absoluta y amplitud de la señal, pues a la salida del modulador se tiene una señal compleja con componentes en I y Q.

La detección coherente es el método más avanzado de detección ya que emplea técnicas de DSP para recuperar la información transmitida, haciéndola muy útil en sistemas de

multiplexación dónde se mejora la relación señal/ruido (SNR) por encima de la detección directa (Taylor, 2004, p. 674).

### 2.2.7.1 Detector Balanceado

Esta técnica de detección se apoya en un oscilador local de referencia ( $R$ ) en el extremo del receptor que genera una portadora óptica, la cual se combina con la señal recibida ( $S_{Rx}$ ) y se detectan con un fotodetector (ver Figura 8) (Keysight Technologies, 2018, p. 38). De esta forma la señal resultante contiene la diferencia de fase y la diferencia de frecuencia, como se indica en la ecuación 7.

**Figura 8**

*Esquema de detección coherente básico desbalanceado.*



*Nota:* Adaptado de *Everything you need to know about complex optical modulation* (p. 38), Keysight Technologies, 2018

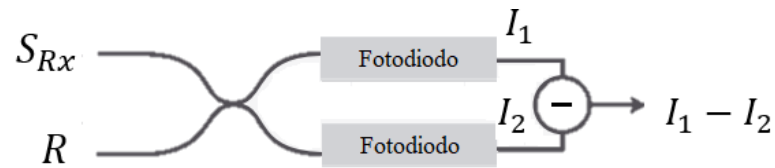
$$I_{Photo} = (S_{Rx} + R) \cdot (S_{Rx} + R)^* \quad (7)$$

$$I_{Photo} = (AS_{Rx})^2 + (A_R)^2 + 2(AS_{Rx} * A_R) \cos(\Delta\phi + \Delta\omega t); \quad \Delta\phi = \phi_{S_{Rx}} - \phi_R$$

Ahora con el propósito de eliminar los términos independientes de la fase de la ecuación 7, se emplea un receptor balanceado, es decir, la señal recibida ( $S_{Rx}$ ) y la señal local de referencia ( $R$ ) se suman por un ramal y se restan en el segundo ramal de un combinador óptico de 2x2 (ver Figura 9). Cada una de las señales resultantes es detectada por un fotodetector y se utiliza la diferencia de fase entre las dos corrientes ( $I_1$  e  $I_2$ ), cancelando así todos los términos independientes de la fase, tal como se indica en la ecuación 7.

**Figura 9**

*Receptor Balanceado.*



*Nota:* Adaptado de *Everything you need to know about complex optical modulation* (p. 39),

Keysight Technologies, 2018

$$I_1 - I_2 = (S_{Rx} + R) * (S_{Rx} + R)^* - (S_{Rx} - R) * (S_{Rx} - R)^* \quad (8)$$

$$I_1 - I_2 = 4A_{S_{Rx}} * A_R * \cos(\Delta\phi + \Delta\omega t); \quad \Delta\phi = \phi_{S_{Rx}} - \phi_R$$

Dependiendo de la frecuencia del oscilador local se puede tener dos esquemas de detección balanceados, siendo estos:

- Homodino: la frecuencia del oscilador local coincide con la frecuencia de la portadora de transmisión dando como resultado una frecuencia intermedia.
- Heterodino: la frecuencia del oscilador local debe ser diferente a la frecuencia de la señal portadora. siendo este último el más sencillo de implementar, sin embargo, presenta más desafíos en la eliminación de ruido. (Lagos Jácome & Salcedo Sotelo, 2018, p. 5)

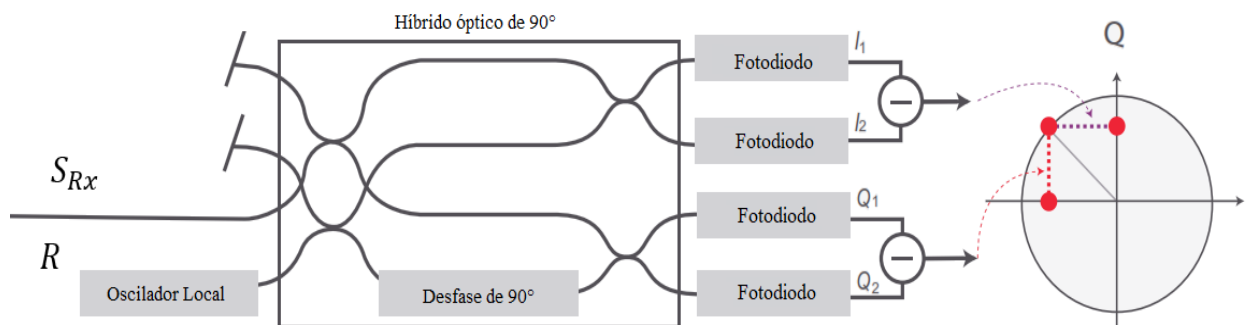
### 2.2.7.2 Detector Coherente QPSK

Para recuperar la amplitud y la fase de una señal compleja, se requieren dos detectores balanceados para las señales de I y Q. Un solo oscilador local que proporciona la señal de referencia para ambos detectores, un híbrido óptico de 90° que realiza la combinación, desfase de la portadora y adición con la señal recibida. Un conjunto de cuatro fotodetectores que generan las corrientes de salida y la diferencia de estas permiten obtener la fase de la señal transmitida. En la Figura 10 se presenta el diagrama de bloques del demodulador coherente QPSK y una representación de los símbolos recibidos en el diagrama de constelación.

Adicionalmente se añade un bloque de algoritmos DSP para estimar y compensar las distorsiones impuestas por las deficiencias físicas del medio de transmisión recuperando por completo la señal transmitida. (Torres Ferrera, 2017, p. 55)

**Figura 10**

*Esquema demodulador coherente QPSK.*



*Nota:* Adaptado de *Everything you need to know about complex optical modulation* (p. 40),

Keysight Technologies, 2018

## CAPITULO III

### 3 METOLOGÍA

#### 3.1 Tipo de Investigación

El presente trabajo se enfoca en el tipo de investigación exploratoria y cuasi experimental, debido a que se pretende recolectar información de las redes de acceso coherente en los sistemas ópticos de nueva generación y determinar un esquema de modulación multinivel complejo que permita establecer una comparación de rendimiento por medio de esquemas de simulación con los sistemas ópticos tradicionales basados en modulación de intensidad. A través de un enfoque cuantitativo se establece el performance de las redes enfatizando el Bit Error Rate (BER), diagramas de constelación, diagramas del ojo, velocidad de transmisión, atenuaciones de la red y distancia del enlace.

#### 3.2 Diseño de la Investigación

Para llevar a cabo la revisión del estado del arte de las redes de acceso complejas/coherentes en sistemas PON de nueva generación se aplica el método descriptivo. Este enfoque implica la descripción de las características más destacadas de los esquemas de modulación fundamentados en intensidad y los sistemas de modulación compleja, de manera que se identifiquen los esquemas de modulación más adecuados los cuales serán objeto de comparación.

Para cumplir los objetivos planteados se realiza un estudio cuasiexperimental con ayuda del software de simulación OptiSystem especializado en redes de comunicaciones ópticas, el cual permite comparar el desempeño de las redes ópticas de acceso complejas/coherentes frente a las redes basadas en intensidad/detección directa. Al comparar las siguientes mediciones: BER vs Potencia, porcentaje de visibilidad del diagrama de constelación y porcentaje de apertura del

diagrama del ojo, se podrá realizar un análisis y comparación cuantitativo de una red de acceso coherente frente a una red tradicional basada en modulación de amplitud.

### **3.3 Unidades de Estudio**

Las unidades de estudio se conforman de las siguientes componentes: simulaciones de transmisiones de datos en una red óptica utilizando esquemas de modulaciones PAM-4 y QPSK, resultados de BER versus potencia recibida, distancia máxima de alcance versus BER, porcentaje de visibilidad de los diagramas de constelación y diagramas del ojo.

#### **Población**

Se delimitan dos redes ópticas basadas en modulación en amplitud y desplazamiento de fase en las que se modifican los parámetros de transmisión de los moduladores (cantidad de bits, velocidad de transmisión), mientras que en la red pasiva se varían los parámetros de atenuación con el objetivo de analizar el performance de las redes.

#### **Muestra**

Conformada por la transmisión de un flujo de 2097152 bits sobre redes basadas en modulación de amplitud PAM-4 con detección directa y modulación compleja QPSK con detección coherente homodina, con variaciones de parámetros de velocidad de transmisión, distancia y atenuación, para el cálculo del BER y establecer una comparación del performance de ambos sistemas.

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

Como instrumentos de recolección de datos se utilizan los módulos de visualización y medición disponibles en el software OptiSystem y Matlab, mientras que la técnica de recolección se enfocará en la tabulación de resultados de potencia y BER para su posterior representación gráfica en función de los cambios de parámetros de velocidad de transmisión, distancia y atenuación.

### 3.5 Técnica de Análisis de Datos.

El análisis de datos se realiza mediante gráficas comparativas de potencia recibida versus BER, distancias versus BER, diagramas del ojo para la modulación en amplitud y diagramas de constelación para modulación compleja.

### 3.6 Operacionalización de Variables

**Tabla 2**

Operacionalización de Variables

| Variable                     | Tipo   | Operacionalización   | Intervalo  | Unidad       |
|------------------------------|--|--|--|--------------|
| Potencia óptica de recepción | Dependiente.<br>-Pérdidas producto de atenuación de la fibra y atenuadores ópticos.<br>-Distancia del enlace de fibra óptica y DCFs. | Representa un valor numérico que indica la cantidad de potencia óptica que recibe el extremo de recepción después de haber atrasado la red de transporte óptico. |  | dBm          |
| Bit erro Rate (BER)          | Dependiente de la potencia óptica de recepción   | Representa la cantidad de bits errados respecto de la cantidad total de bits transmitidos.   | $BER \leq 1 \times 10^{-7}$<br>$BER \leq 1 \times 10^{-3}$ | Adimensional |
| Diagrama del ojo             | Dependiente.<br>-Potencia óptica de recepción.<br>-Uso de fibras DCF.<br>-Pérdidas por DC y atenuación.                              | Representa de manera visual del estado de recepción los símbolos   |  | Adimensional |
| Diagrama de constelación     | Dependiente.<br>-Potencia óptica de recepción.<br>-Pérdidas por DC y atenuación.   | Representa de manera visual del estado de recepción los símbolos en fase y cuadratura.   |  |              |

Nota: Elaborado por el Autor.

## CAPITULO IV

### 4 DISEÑO Y COMPOSICIÓN DE LAS REDES ÓPTICAS

En el presente capítulo se describe el software a utilizar, la composición de los esquemas de modulación y demodulación directa y coherente, configuraciones realizadas y caracterización de componentes.

#### 4.1 Software de simulación OptiSystem

Es un software propietario desarrollado por Optiwave System Inc., especializado en el diseño y simulación de redes de comunicaciones sobre fibra óptica. Esta herramienta es ampliamente utilizada para modelización realista de sistemas de telecomunicaciones e investigación académica puesto que presenta gran variedad de librerías, componentes y módulos ópticos que pueden conectarse entre sí y configurarse de acuerdo con los requerimientos del sistema a implementar.

OptiSystem abarca una amplia gama de aplicaciones como el diseño de redes WDM, SONET/SDH, diseño de transmisores, canales, amplificadores y receptores. Adicionalmente contiene un componente de Matlab que permite al usuario llamar a este potente procesador de datos dentro de su entorno e incorporar co-simulaciones generando nuevos modelos y componentes.(Optiwave Corporation, 2020)

#### 4.2 Selección de esquemas de modulación

Para establecer una comparación del desempeño de las redes ópticas de acceso basadas en modulación de amplitud frente a las redes coherentes, se proponen los siguientes esquemas: una red óptica con modulación PAM-4 con detección directa y la otra con modulación compleja QPSK y detección coherente homodina, de esta forma se comparará dos señales M-arias de igual orden que transportan dos bits de información por cada símbolo.

### 4.2.1 Diagrama de bloques de la red PON con PAM-4 y Detección directa

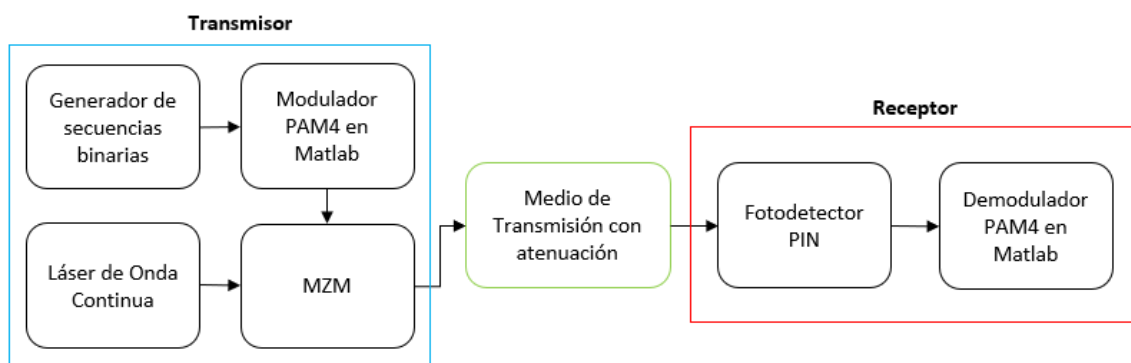
Para el diseño de la red PON con modulación PAM-4 y detección directa se toma como referencia el esquema presentado por Zapata Yacelga, 2023, p. 40, en la que se analiza el desempeño de una red óptica empleando esquemas de modulación multinivel M-PAM. Esta solución utiliza la herramienta de simulación OptiSystem en co-simulación con Matlab.

La red propuesta se compone de tres partes, las cuales se describen a continuación, mientras que en la Figura 11 se presenta la conformación de la red en diagrama de bloques.

El transmisor, se encarga de la generación de datos binarios, los cuales con ayuda de un bloque de Matlab agrupan los bits y asigna niveles en función del orden M-ario de la modulación. Estos datos ingresan a un MZM con conjunto con un láser de onda continua, obteniendo de esta forma una señal multinivel en amplitud. La red de transmisión está constituida por un tramo de fibra óptica, fibras compensadoras de dispersión cromática y un atenuador variable que emulará la degradación de la señal para evaluar la calidad de la red.

#### Figura 11

*Diagrama de bloques red PON con PAM-4 y detección directa.*



*Nota:* Adaptado de *Diseño y simulación de un enlace óptico PAM8 para conexión de Data Centers en entornos urbanos ultra-densos a 1.6 Tb/s* (p. 39) por Ricardo Zapata, 2023, PUCE.

En el receptor se utiliza un esquema de detección directa conformado por un solo fotodetector PIN encargado de la conversión opto-eléctrica y un bloque demodulador de Matlab que se encarga de recuperar la información y estimar el BER.

#### **4.2.2 Diagrama de bloques de la red PON con QPSK y Detección coherente homodina**

El diseño de la red QPSK con Detección coherente homodina, presenta mayor complejidad en referencia a la cantidad de componentes que intervienen en su construcción y su funcionamiento. Esto se debe principalmente a que los sistemas de modulación compleja transmiten información mediante la variación simultánea de la amplitud y la fase de una señal óptica, alcanzando altas velocidades de transmisión, con un ancho de banda más estrecho obteniendo un mejor rendimiento en la eficiencia espectral.

Así también, los sistemas de detección coherente al trabajar con la fase y cuadratura de la señal requieren sistemas más complejos y por lo tanto costosos que incorporan un oscilador local sintonizado a la misma o diferente frecuencia de la señal transmitida y un conjunto de fotodetectores para recuperar la señal de información. A continuación, se realiza una breve descripción de los componentes más relevantes de la red y en la Figura 12 se presenta el diagrama en bloques de la red.

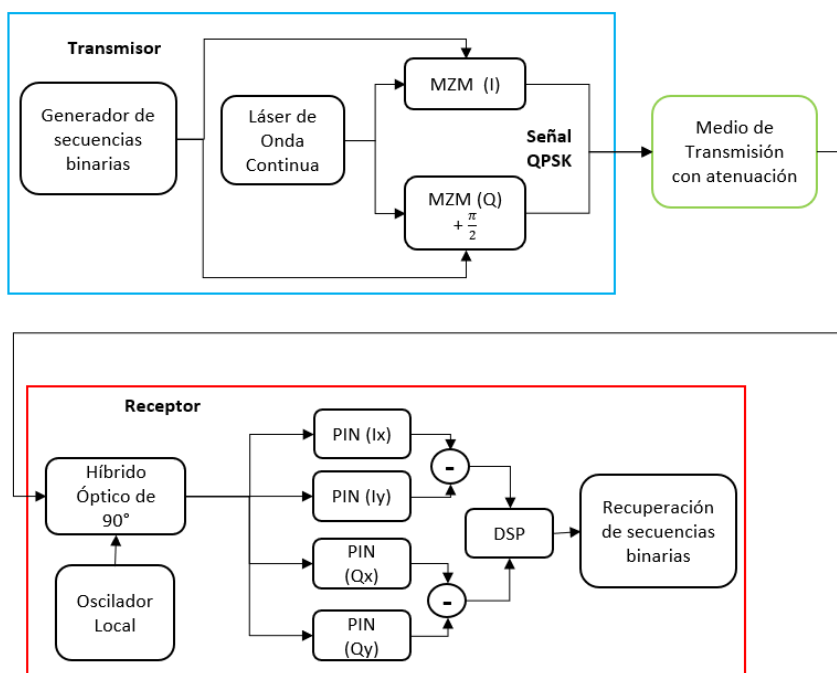
El transmisor, se encarga de la generación de datos binarios y modulación utilizando un sistema complejo QPSK, para esta operación se emplean dos MZM y un desplazador de fase que genere las señales I y Q respectivamente para luego combinarlas en un solo haz de luz y transmitir las por la fibra óptica.

El receptor para recuperar la información utiliza un conjunto de componentes, en primer lugar, se apoya de un oscilador local para generar una señal de referencia la cual permite obtener la diferencia de fase respecto de la señal recibida, separando las componentes de I y Q en dos

ramales. Estas componentes atraviesan cuatro fotodiodos que obtienen la diferencia de fase de las señales y con ayuda de una unidad de procesamiento digital se recupera la señal transmitida. En referencia a la red de transmisión, no se requiere de una fibra compensadora de dispersión cromática, sin embargo, se empleará un atenuador variable con el propósito de establecer una comparación de rendimiento de la potencia y BER.

**Figura 12**

*Diagrama de bloques de la red PON QPSK con detección coherente.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

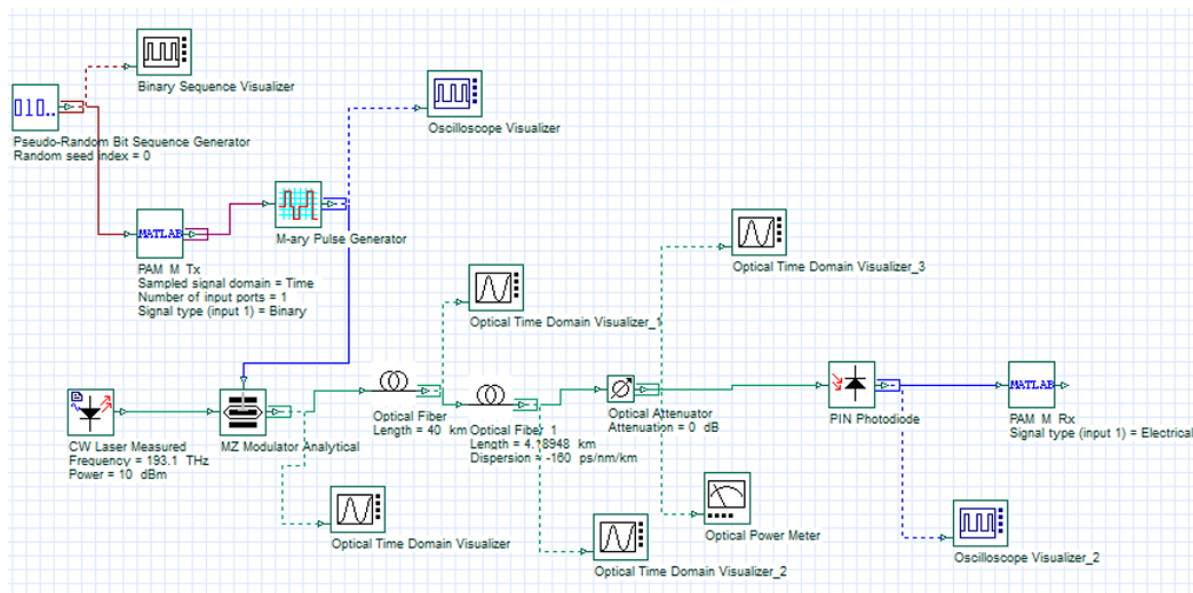
#### 4.2.3 Descripción de los componentes de la red PAM-4 con Detección Directa

En la

Figura 13 se presenta el diseño de la red en OptiSystem propuesto en el estudio de Zapata Yacelga, 2023, p. 40, del cual se hace énfasis los bloques de co-simulación con Matlab, MZM y las fibras compensadoras de dispersión cromática.

Figura 13

Diseño de red PON PAM-4-DD en OptiSystem.



Nota: Adaptado de *Diseño y simulación de un enlace óptico PAM8 para conexión de Data Centers en entornos urbanos ultra-densos a 1.6 Tb/s* (p. 40) por Ricardo Zapata, 2023, PUCE.

#### 4.2.3.1 Matlab Component

Este bloque de OptiSystem establece comunicación con Matlab y permite realizar co-simulaciones entre ambos softwares. Para el correcto funcionamiento del bloque de Matlab se realizan dos configuraciones, la primera es identificar el nombre del archivo .m y la segunda es establecer la localización del archivo para su búsqueda y ejecución, como se indica en la Figura 14. De esta forma los bits insertados por el bloque de datos pseudo aleatorios serán procesados y modulados a través de codificación en Matlab.

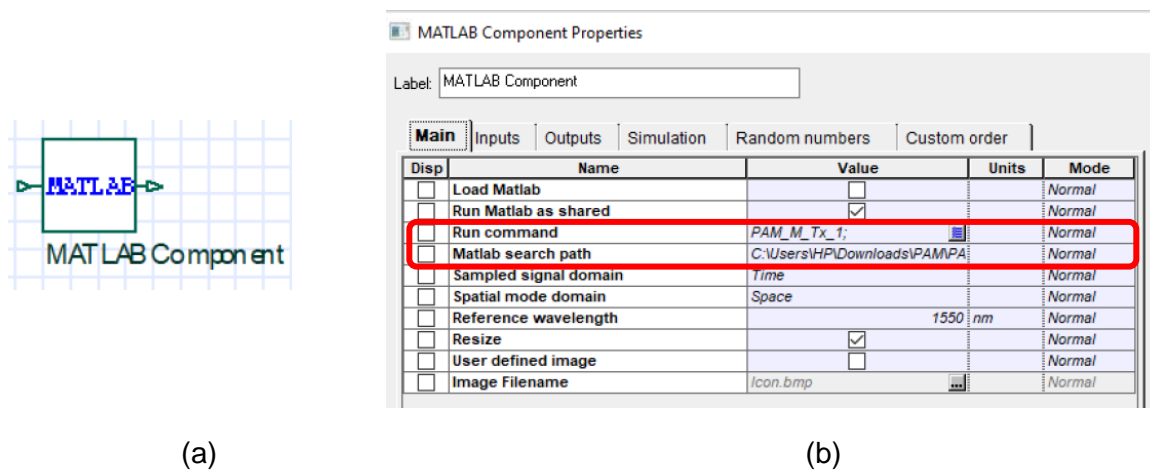
El código desarrollado en Matlab para el transmisor toma los datos aleatorios, los almacena en un vector para después crear una matriz de acuerdo con los niveles de la señal M-aria y con ayuda del comando `pammod`, perteneciente al stack del toolbox de comunicaciones,

se modula la señal en amplitud. Finalmente, la señal se retorna a OptiSystem y se inserta en el MZM para obtener la señal óptica multinivel.

En el archivo .m de transmisión se añaden valores de pre-distorsión al diagrama del ojo de tal forma que los niveles superiores presenten una mayor apertura. Para lograr este cometido se colocan los valores de 0.3 al símbolo 11 y -1 al símbolo 01.

## Figura 14

Configuraciones bloque Matlab.



Nota: (a) Bloque de Co-simulación Matlab, (b) Parámetros de configuración. Elaborado por el autor.

El bloque de demodulación procesa la señal que atraviesa el medio, con ayuda de herramientas de visualización como el diagrama del ojo se establecen los valores umbrales para proceder con la decodificación de la señal PAM-4. Al trabajar sobre Matlab se realiza el cálculo del BER y se exporta el dato a un archivo .txt. Los códigos empleados para modulación y demodulación se describen en el Anexo I.

### 4.2.3.2 MZ Modulator Analytical

Este modulador trabaja en modo de operación push-push y realiza el efecto electroóptico de la señal, es decir, convierte la señal eléctrica multinivel en una señal modulada multinivel

óptica en conjunto con una fuente láser de onda continua sintonizada a la una longitud de onda de 1550 nm.

#### 4.2.3.3 Fibra óptica

Se establece una fibra óptica G.652D con una distancia variable de 20 a 100 km. Los efectos no lineales de la fibra incorporan a través de los parámetros de dispersión cromática (CD) con un valor de  $17 \frac{ps}{nm*km}$ , una atenuación de  $0.2 dB/km$  y dispersión por modo de polarización (PMD) de  $0.04 ps/\sqrt{km}$ .

#### 4.2.3.4 Fibras Compensadoras de Dispersión (DCF)

Para mitigar el ensanchamiento de los pulsos ópticos a través de la fibra, los cuales son producto de la dispersión cromática y la PMD se añade un tramo de fibra compensadora de dispersión cuyas características principales radican en poseer un elevado índice de dispersión y signo opuesto. La cantidad de fibra compensadora a utilizar se determina por medio de las ecuaciones 8 y 9 .

$$Disp_{CD-FO} = CD \left[ \frac{ps}{nm * km} \right] x L_{FO} (km) \quad (9)$$

$$L_{DCF} = \frac{Disp_{CD-FO}}{CD_{DCF}} \quad (10)$$

#### 4.2.4 Diseño del modulador QPSK con Detección Homodina

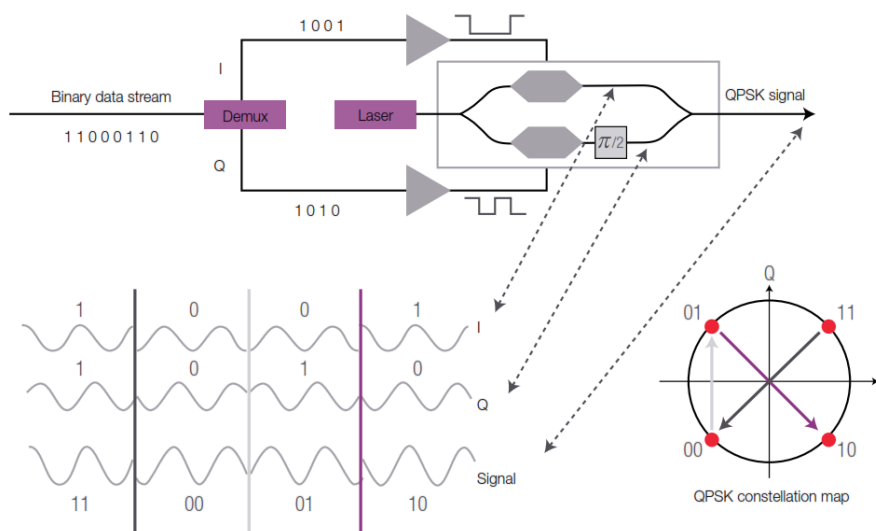
El modulador QPSK con detección coherente homodina es el esquema base para ahondar en los sistemas de comunicaciones ópticas complejos basados en IQ. Optisystem con su amplia selección de componentes permite construir un esquema detallado y explorar su funcionamiento. En las secciones a continuación se presentan los componentes utilizados y sus configuraciones.

#### 4.2.4.1 Descripción de componentes del Transmisor QPSK

En la Figura 15 se presenta el diagrama de bloques de un modulador QPSK, junto con la representación de las señales en el dominio del tiempo y el diagrama ideal de constelación. Con base en este diagrama, se especifican los componentes de OptiSystem utilizados para el desarrollo del modulador QPSK.

**Figura 15**

*Diagrama de bloques Transmisor QPSK.*



*Nota: Adaptado de Everything you need to know about complex optical modulation (p. 34),*

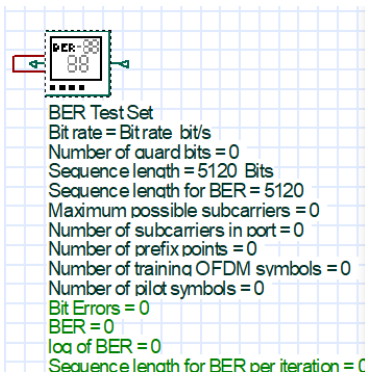
Keysight Technologies, 2018

##### 4.2.4.1.1 Generador de secuencias de bit y set de prueba

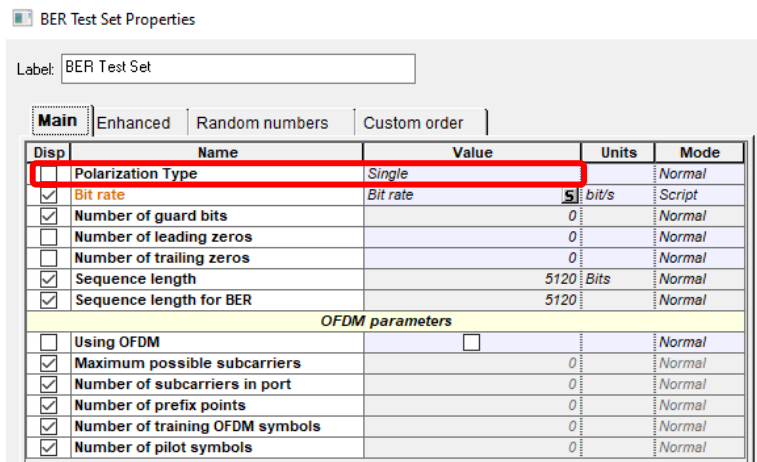
El bloque BER Test Set es el componente encargado de la generación de bits de datos de tipo aleatorio o definido por el usuario. Transmite las secuencias a través de los dispositivos bajo prueba, para luego compararlas con la secuencia de bits que recibió y calcular el Bit Error Rate del sistema. En la Figura 16, se muestra la representación del bloque y las opciones de configuración, para este caso únicamente se coloca la opción de polarización simple.

Figura 16

Configuraciones Bert Test Set.



BER Test Set  
 Bit rate = Bit rate bit/s  
 Number of guard bits = 0  
 Sequence length = 5120 Bits  
 Sequence length for BER = 5120  
 Maximum possible subcarriers = 0  
 Number of subcarriers in port = 0  
 Number of prefix points = 0  
 Number of training OFDM symbols = 0  
 Number of pilot symbols = 0  
 Bit Errors = 0  
 BER = 0  
 log of BER = 0  
 Sequence length for BER per iteration = 0



BER Test Set Properties

Label: BER Test Set

Main | Enhanced | Random numbers | Custom order

| Disp                                | Name                            | Value    | Units   | Mode   |
|-------------------------------------|---------------------------------|----------|---------|--------|
| <input type="checkbox"/>            | Polarization Type               | Single   |         | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Bit rate                        | Bit rate | 5 bit/s | Script |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Number of guard bits            | 0        |         | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Number of leading zeros         | 0        |         | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Number of trailing zeros        | 0        |         | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Sequence length                 | 5120     | Bits    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Sequence length for BER         | 5120     |         | Normal |
| <b>OFDM parameters</b>              |                                 |          |         |        |
| <input type="checkbox"/>            | Using OFDM                      |          |         | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Maximum possible subcarriers    | 0        |         | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Number of subcarriers in port   | 0        |         | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Number of prefix points         | 0        |         | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Number of training OFDM symbols | 0        |         | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Number of pilot symbols         | 0        |         | Normal |

(a)

(b)

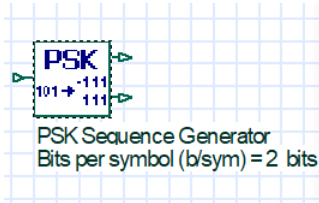
Nota: (a) Bloque Bert Test Set, (b) Parámetros de configuración. Elaborado por el autor.

#### 4.2.4.1.2 Generado de Secuencias PSK

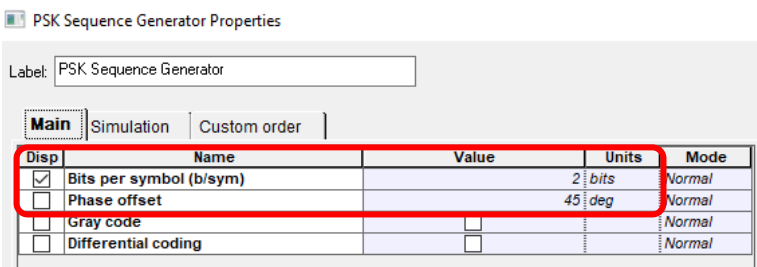
Bloque encargado de generar dos secuencias de símbolos M-arios conformados de agrupación de bits  $n = \log_2 M$ , para el caso de análisis la cantidad de bits por símbolos es de 2 bits. Las señales en paralelo a la salida del bloque PSK que se observan en la Figura 17, corresponden a las salidas I y Q, las cuales tienen un desplazamiento de fase de 45 grados.

Figura 17

Bloque PSK Sequence Generator.



PSK Sequence Generator  
 Bits per symbol (b/sym) = 2 bits



PSK Sequence Generator Properties

Label: PSK Sequence Generator

Main | Simulation | Custom order

| Disp                                | Name                    | Value | Units  | Mode   |
|-------------------------------------|-------------------------|-------|--------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Bits per symbol (b/sym) |       | 2 bits | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Phase offset            |       | 45 deg | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Gray code               |       |        | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Differential coding     |       |        | Normal |

(a)

(b)

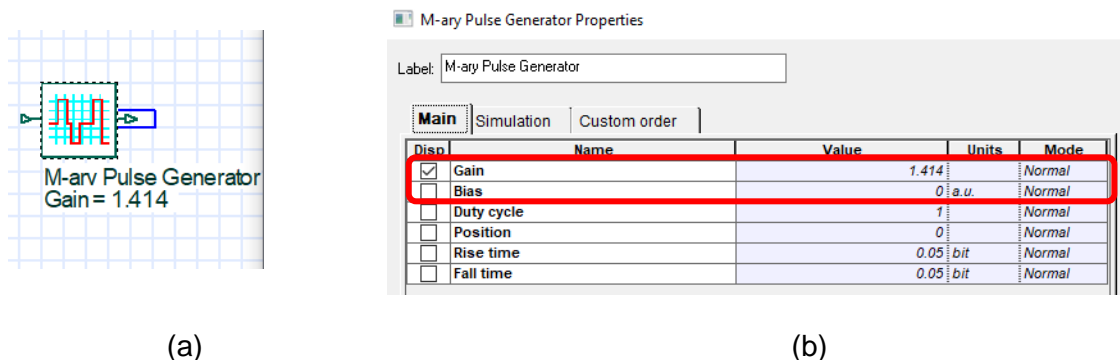
*Nota:* a) Bloque PSK Sequence Generator, (b) Parámetros de configuración. Elaborado por el autor.

#### 4.2.4.1.3 Generador de Pulsos M-arios

Elemento encargado de generar pulsos multinivel acordes con la entrada M-aria, pudiendo obtener señales QPSK, 8PSK y M-PSK. Para el caso del modulador QPSK, se aplica una ganancia de 1.414 y un Bias de 0 como se observa en la Figura 18 (b).

**Figura 18**

*Configuraciones M-ary Pulse Generator.*



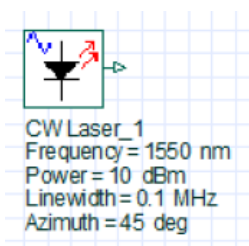
*Nota:* a) Bloque M-ary Pulse Generator, (b) Parámetros de configuración. Elaborado por el autor.

#### 4.2.4.1.4 Fuente Láser

El componente CW Laser permite la inserción de una fuente de luz de onda continua sobre la red. En este módulo se configuran los siguientes parámetros: longitud de onda de operación a 1550 nm, potencia de entrada a 10 dBm y ancho de línea de 0.1MHz, como se indica en la Figura 19. (Optiwave Corporation, 2020)

**Figura 19**

*Fuente de luz laser.*



(a)

| Disp                                | Name          | Value | Units | Mode   |
|-------------------------------------|---------------|-------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Frequency     | 1550  | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Power         | 10    | dBm   | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Linewidth     | 0.1   | MHz   | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Initial phase | 45    | deg   | Normal |

(b)

Nota: a) Bloque CW Laser, (b) Parámetros de configuración. Elaborado por el autor.

#### 4.2.4.1.5 Modulador Mach-Zehnder

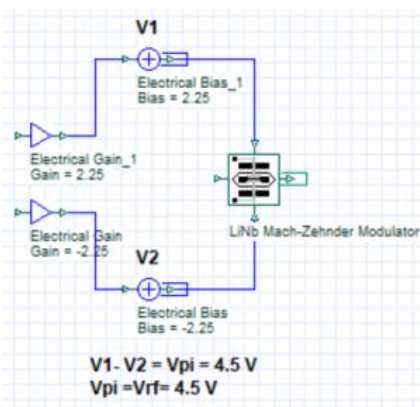
El modulador MZM de Niobato de litio, es el componente principal del transmisor y se encarga de realizar la modulación compleja QPSK. Para asegurar el funcionamiento del modulador en la configuración push-pull y en el punto de operación nulo, por las entradas eléctricas del modulador se insertarán dos señales de voltaje de RF de igual amplitud con polaridad inversa, mismos que permiten obtener el voltaje de media onda ( $V_{\pi}$ ), como se indica en la ecuación 11.

$$\text{Null Point } V_{\pi} = V_1(t) - V_2(t) \quad (11)$$

$$V_{\pi} = V_{DC-BIAS}$$

Figura 20

Modulador LiNb MZM dual drive en modo de operación push-pull.



| Disp                     | Name                        | Value                    | Units | Mode   |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------|--------|
| <b>Main settings</b>     |                             |                          |       |        |
| <input type="checkbox"/> | Extinction ratio            | 60                       | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Switching bias voltage      | 4.5                      | V     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Switching RF voltage        | 4.5                      | V     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Insertion loss              | 5                        | dB    | Normal |
| <b>voltage settings</b>  |                             |                          |       |        |
| <input type="checkbox"/> | Bias voltage1               | 0                        | V     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Bias voltage2               | 0                        | V     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Normalize electrical signal | <input type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Modulation voltage1         | 2                        | V     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Modulation voltage2         | -2                       | V     | Normal |

(a)

(b)

*Nota:* a) Bloque LiNb MZM dual drive (b) Parámetros de configuración MZM. Elaborado por el autor.

Para el caso de análisis se emplea la información del modulador comercial LN86S-FC de la marca Thorlabs. En la Figura 20, se indican los parámetros de configuración de voltaje, en dónde se establece un voltaje de 4.5 V para los parámetros de Switching bias voltaje y Switching RF (RF1 y RF2), este valor se obtiene de las especificaciones de la hoja de datos del fabricante. (Thorlabs, 2022).

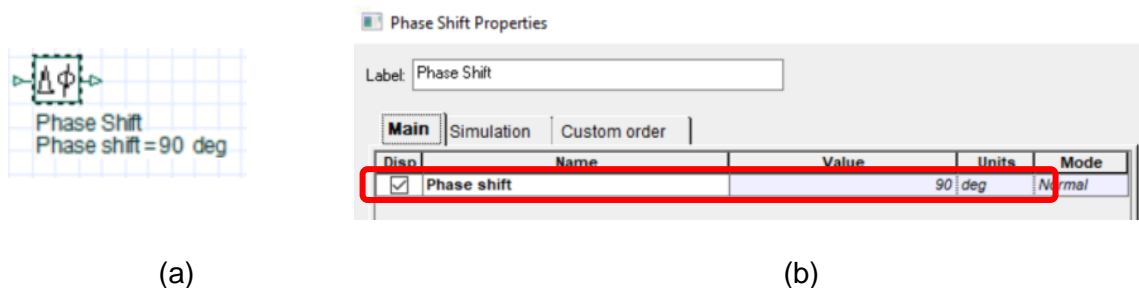
Los valores de voltaje continuo de los bloques Electrical Gain y Electrical Bias se fijan a un valor de 2.25 V, de acuerdo con la ecuación 10. Estas configuraciones se deben realizar en los dos moduladores MZM cómo se indica en el diagrama de bloques de la Figura 12.

#### 4.2.4.1.6 Desplazador de Fase

Componente necesario para realizar el desfase en adelanto o retardo de una de las señales portadoras. El parámetro para ingresar debe estar expresado en grados. Como se indica en la Figura 21 este elemento proporciona el desfase de  $90^\circ$  de la señal de cuadratura (Q) del modulador QPSK.

**Figura 21**

*Bloque de Desfase.*



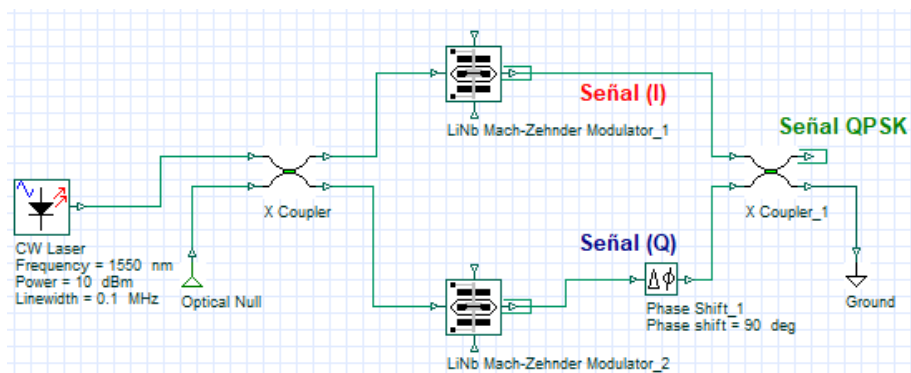
*Nota:* a) Bloque Phase Shift (b) Parámetros de configuración. Elaborado por el autor.

#### 4.2.4.1.7 Acoplador

El acoplador o combinador de 2x2 es el componente encargado de llevar la señal de luz del láser de onda continua (CW Laser) a los dos moduladores MZMs, así como también combinar las señales resultantes de fase (I) y cuadratura (Q), obteniendo por una de sus salidas la señal modulada multinivel QPSK, como se indica en la Figura 22. Si, uno de los puertos de entrada o salida del combinador no se usa es necesario conectarlo a un bloque de tierra pudiendo emplear los conectores Optical Null o Ground.

**Figura 22**

*Esquema de conexión acopladores 2x2.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

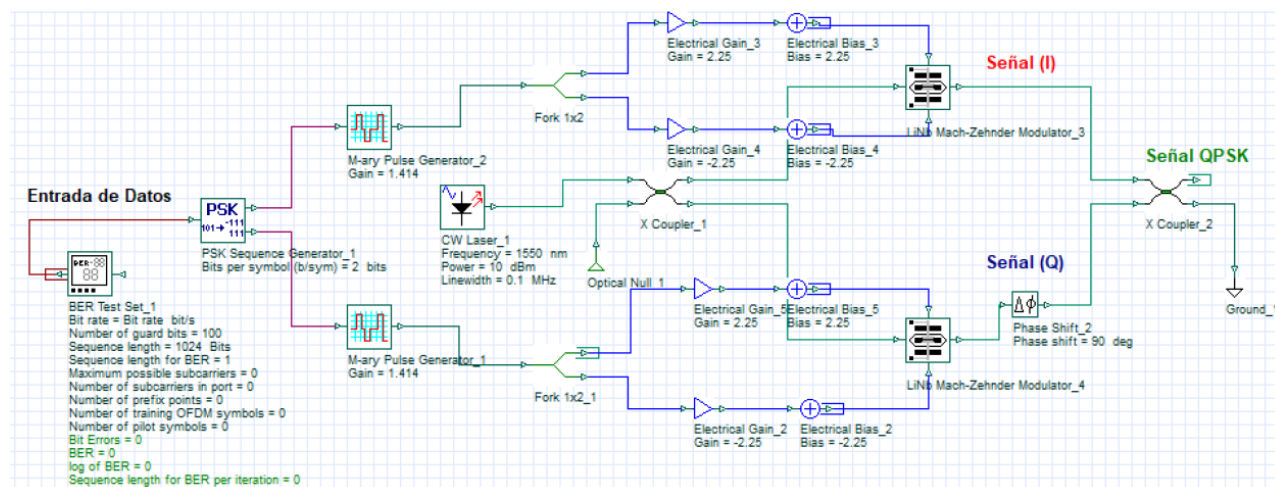
#### 4.2.4.1.8 Transmisor con modulación compleja QPSK

Una vez descrito todos los componentes del transmisor en la

Figura 23, se presenta la implementación del sistema de transmisión con modulación QPSK. Cabe mencionar que adicionalmente al diseño propuesto, se puede realizar una modificación en la inserción de la señal de datos al modulador, la cual consiste en los siguientes bloques: Pseudo Random Bit Sequence Generator, Serial to Parallel Converter, y NRZ Pulse Generator, obteniendo la señal mapeada lista para el ingreso a los MZMs.

Figura 23

Modulador QPSK complejo.



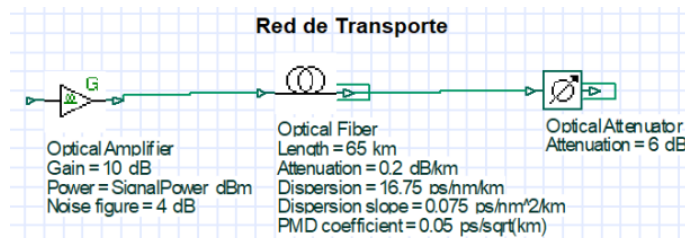
Nota: Elaborado por el autor

#### 4.2.4.2 Descripción de los componentes de la red de transporte

La red de transporte utilizará a la salida del modulador un amplificador con ganancia de 10 dB y una fibra monomodo G652.D de longitud variable entre 20 y 100 km y un atenuador variable (ver **Figura 24**). A diferencia de la red de transporte del esquema de modulación PAM-4 no se requiere de una DCF, en su lugar los efectos no lineales de la fibra se compensarán por medio del bloque de procesamiento digital de señales a través de sus algoritmos de compensación.

Figura 24

Red de Transporte.



Nota: Elaborado por el autor

### 4.2.4.3 Descripción de componentes del Detector Homodino

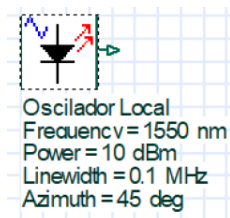
La construcción del Detector homodino se basa en el esquema presentado en la Figura 10. A la salida de los fotodetectores se incluye un bloque de procesamiento digital de señales (DSP) que permite recuperar y acondicionar los niveles lógicos para su posterior decodificación y obtención de la secuencia binaria enviada desde el transmisor. A continuación, se describen los componentes de OptiSystem utilizados para el desarrollo del demodulador QPSK.

#### 4.2.4.3.1 Oscilador Local

Al trabajar con un detector homodino, el oscilador local se compone de una fuente láser de onda continua sintonizada a la misma longitud de onda de operación del modulador. Para este caso en particular se emplea una longitud de onda 1550 nm y el mismo valor de potencia del transmisor, cómo se indica en la Figura 25.

**Figura 25**

*Oscilador Local.*



(a)

Oscilador Local Properties

Label: Oscilador Local

Main | Polarization | Simulation | Noise | Random numbers | Custom order

| Disp                                | Name          | Value | Units | Mode   |
|-------------------------------------|---------------|-------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Frequency     | 1550  | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Power         | 10    | dBm   | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Linewidth     | 0.1   | MHz   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Initial phase | 0     | deg   | Normal |

(b)

*Nota:* a) Bloque CW Laser b) Parámetros de configuración OL. Elaborado por el autor.

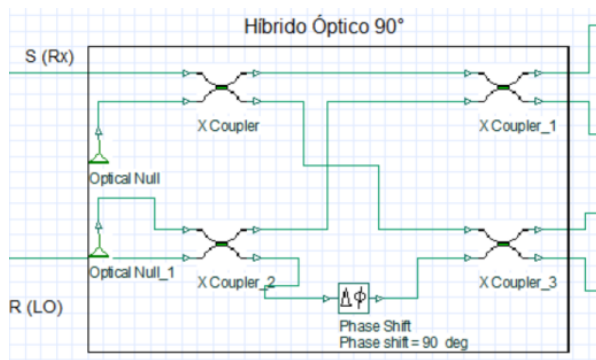
#### 4.2.4.3.2 Híbrido óptico de 90°

El híbrido óptico de 90° se compone de 4 acopladores de 2x2 con un desfasador de 90° para obtener dos detectores balanceados. Por una de las entradas de un combinador ingresa la señal óptica que atraviesa el medio de transmisión ( $S_{Rx}$ ) y es mezclada con la señal de referencia

( $R$ ) proveniente del oscilador local. Es importante acotar que los puertos ópticos de entrada de los acopladores que no requieren conexión se asocian con un puerto nulo o tierra óptica como se muestra en la Figura 26.

### Figura 26

*Componentes que conforman el Híbrido Óptico de 90°.*



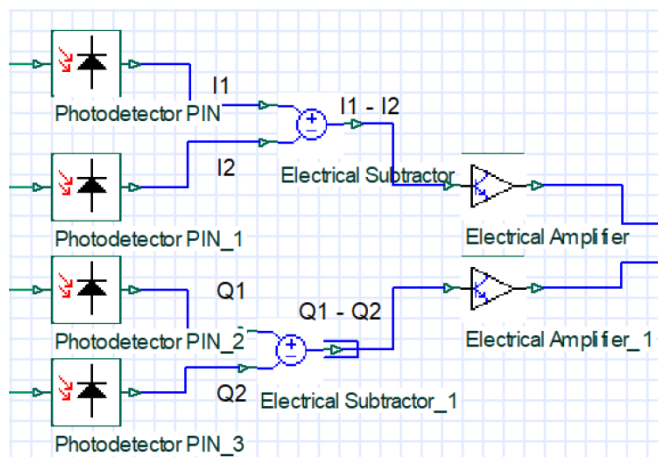
*Nota:* Elaborado por el autor.

#### 4.2.4.3.3 Fotodetectores y Sistema de Amplificación

Se requiere de dos fotodetectores por cada señal de fase y cuadratura, los cuales se encargan de realizar el proceso opto eléctrico. A la salida de estos dispositivos se procede a realizar la diferencia de corrientes  $I_1 - I_2$  y  $Q_1 - Q_2$  con ayuda de los bloques Electrical Subtractor. Con el propósito de reducir los efectos asociados al ruido se insertan amplificadores de transimpedancia (ver Figura 27) con un factor de 10 dB, los cuales elevan la amplitud de la diferencia de las señales eléctricas I y Q, y se procesarán en el bloque de DSP.

### Figura 27

*Bloque de Fotodetección y amplificación.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

#### 4.2.4.3.4 Bloque Universal de Procesamiento Digital de Señales

El bloque Universal DSP realiza filtrado, compensación al deterioro de la señal y contribuye en el proceso de recuperación de la señal de transmisión. Proporciona soporte para los siguientes formatos de modulación: BPSK, QPSK, 8PSK, 16PSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM y 256 QAM. Incluye 12 funciones y algoritmos enfocados en las etapas de preprocesamiento y recuperación de la señal, a continuación, se describen los esquemas más relevantes:

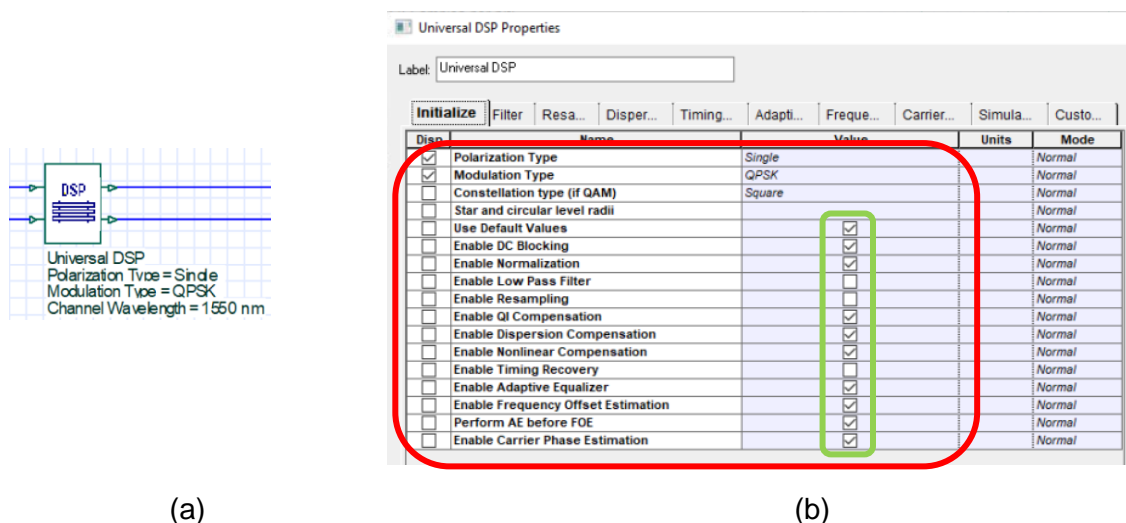
- Filtro de Bessel: se emplea un filtro de tercer orden para eliminar el ruido del canal de transmisión.
- Resampling: la señal recibida vuelve a ser muestreada a una velocidad de 2 muestras/símbolo y posteriormente se emplea interpolación lineal o cúbica para adaptar la forma de onda de la señal muestreada a la nueva frecuencia de muestreo.
- Compensación de desbalance (QI): utilizada para mitigar los desbalances de amplitud y fase de las señales I y Q, producto de inadecuados valores de voltajes de polarización, desajustes en el tiempo de respuesta del fotodiodo, posibles desalineaciones del controlador de polarización e imperfecciones del híbrido óptico de 90°.

- Compensación de dispersión cromática: conjuntamente con un filtro digital se compensan las degradaciones no lineales y efectos de automodulación de fase.
- Compensación No Lineal: mitiga los efectos de la dispersión cromática y las no linealidades de la fibra a través de un método digital de retropropagación.
- Recuperación de Tiempo: empleada para la sincronización de símbolos a través del muestreo de frecuencia y fase, el algoritmo de recuperación de tiempo determina de forma adaptativa el momento correcto para muestrear el símbolo.
- Ecuador adaptativo: compensa los problemas de dispersión cromática residual, dispersión del modo de polarización y contribuye a reducir la interferencia entre símbolos, utiliza los algoritmos Constant modulus algorithm y Radius Detected.
- Estimación de compensación de frecuencia: evita rotaciones de los símbolos en el diagrama de constelación ocasionados por la mezcla del oscilador local.
- Estimación de fase de portadora. Utiliza el algoritmo blind phase search, para recuperar y eliminar desajustes de fase entre la señal recibida y el oscilador local. (Optiwave Corporation, 2020)

Con el objetivo de evidenciar la importancia de la unidad de DSP en los sistemas de detección coherente se emplean dos configuraciones, las cuales se pueden habilitar o deshabilitar como se indica en la Figura 28 (b). En la primera configuración no se consideran mecanismos de corrección y procesamiento digital de señales, únicamente se seleccionan las opciones básicas: tipo de polarización y modulación empleada. Para la segunda configuración de color verde en la Figura 28 (b) se muestra la habilitación de 10 funciones y algoritmos de DSP que garantizarán una mejora significativa en el performance de la red.

**Figura 28**

*Configuraciones Universal DSP.*



(a)

(b)

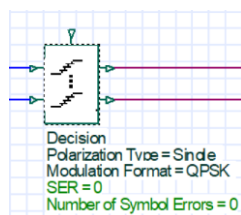
*Nota:* a) Bloque Universal DSP b) Parámetros de configuración DSP. Elaborado por el autor.

#### 4.2.4.3.5 Bloque de Decisión

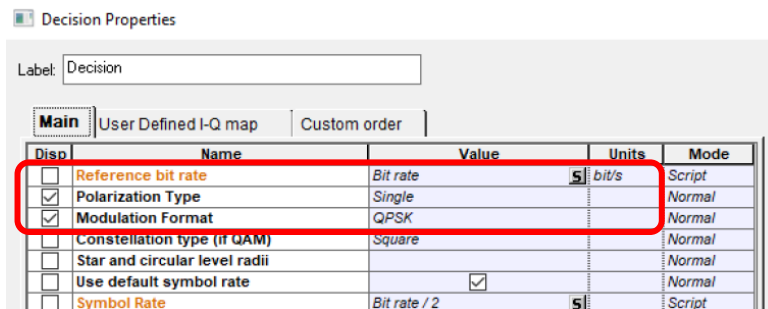
Este componente recibe las señales eléctricas provenientes del bloque Universal DSP para normalizar las amplitudes eléctricas de cada canal I y Q en la cuadrícula respectiva de M-PSK o M-QAM y toma una decisión sobre la ubicación de cada símbolo recibido en función de un umbral normalizado. Para este esquema de recepción se configuran los parámetros de polarización simple, QPSK como tipo de modulación y como referencia para el cálculo de toma de decisión se usa el bit rate configurado en el Project layout, como se indica en la Figura 29.

**Figura 29**

*Configuraciones Bloque de Decisión.*



(a)



(b)

Nota: a) Bloque Decisión b) Parámetros de configuración Decisión. Elaborado por el autor.

En referencia a la ubicación de los símbolos en el diagrama de constelación, en la **Tabla 3** se presenta la respectiva ubicación para las componentes de fase y cuadratura.

**Tabla 3**

Ubicación de los símbolos en el diagrama de constelación

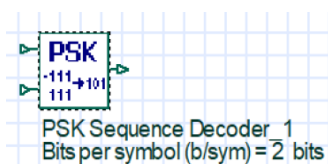
| Secuencia de Bits | I  | Q  |
|-------------------|----|----|
| 00                | 1  | 0  |
| 01                | 0  | 1  |
| 10                | -1 | 0  |
| 11                | 0  | -1 |

#### 4.2.4.3.6 Bloque Decodificador de Secuencias PSK

Una vez procesadas las señales eléctricas y determinados los umbrales de decisión, el bloque PSK Sequence Decoder recupera la señal binaria que envió el transmisor. Para realizar la correcta decodificación de datos binarios se configura la cantidad de bits por cada símbolo y el offset de fase de la señal (ver Figura 30). Al utilizar la modulación QPSK cada símbolo se compone de 2 bits.

**Figura 30**

Configuración Decodificador de Secuencias PSK.



(a)

PSK Sequence Decoder\_1 Properties

Label: PSK Sequence Decoder\_1

Main Simulation Custom order

| Disp                                | Name                    | Value | Units | Mode   |
|-------------------------------------|-------------------------|-------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Bits per symbol (b/sym) | 2     | bits  | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Phase offset            | 45    | deg   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Gray code               |       |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Differential coding     |       |       | Normal |

(b)

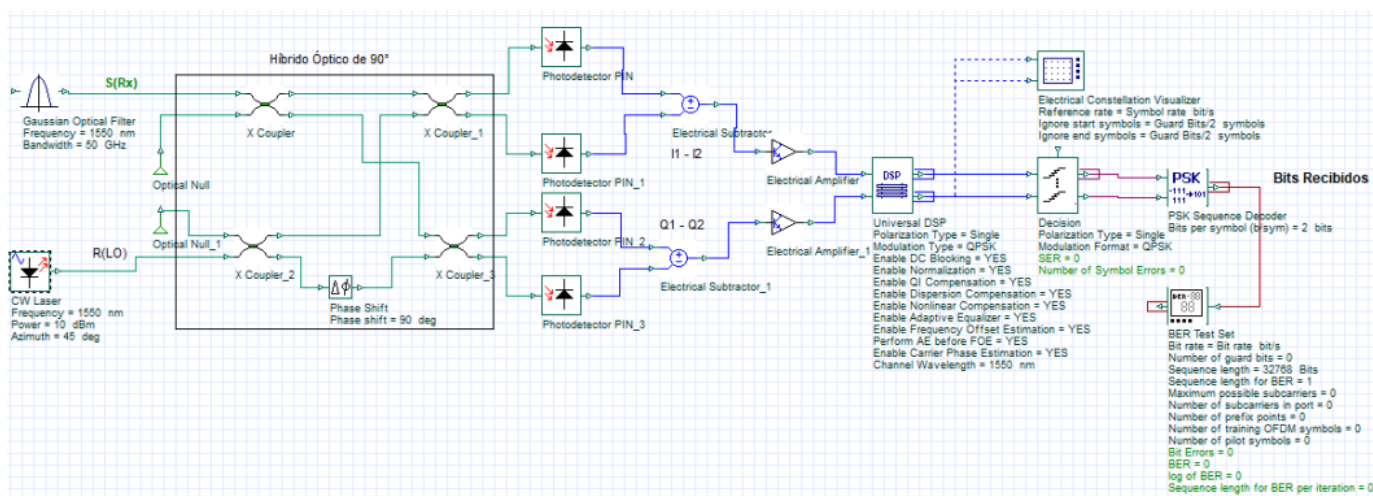
Nota: a) Bloque PSK Sequence Decoder b) Parámetros de configuración. Elaborado por el autor.

#### 4.2.4.3.7 Receptor con detección coherente homodina QPSK

Finalizada la descripción y configuración de bloques que componen al receptor coherente homodino en la **Figura 31** se presenta el esquema completo de recepción. Mientras que en la **Figura 32** se presenta el esquema completo de la red basada en QPSK con modulación compleja y detección coherente homodina.

**Figura 31**

*Receptor QPSK Coherente homodino.*



Nota: Elaborado por el autor.



#### 4.2.4.4 Descripción de Herramientas de Medición y Visualización

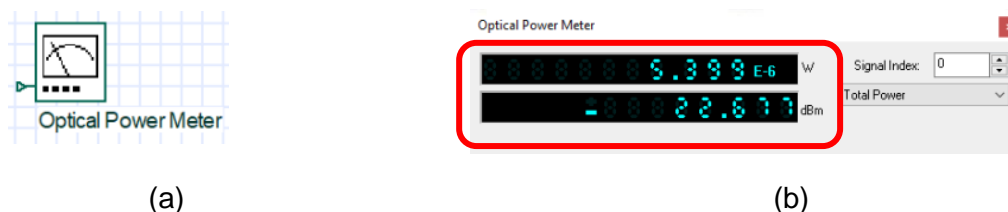
Para establecer la comparación de rendimiento de las redes se requiere de herramientas de visualización y medición tanto en OptiSystem como en Matlab para los esquemas de modulación QPSK y PAM-4 respectivamente.

##### 4.2.4.4.1 Medidor de potencia óptico

Bloque que permite visualizar los valores de potencia media de las señales ópticas expresadas en dBm y W.

**Figura 33**

*Bloque medidor de potencia óptica.*



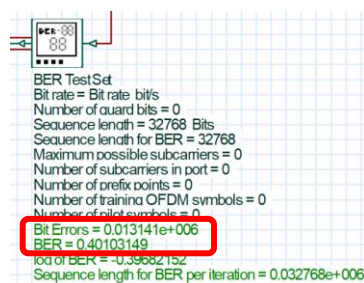
*Nota:* a) Bloque Medidor de potencia óptica b) Valor medido. Elaborado por el autor.

##### 4.2.4.4.2 BER Test Set

Este bloque además de generar los datos aleatorios también presenta la cantidad de bits errados y realiza el cálculo del BER (ver **Figura 34**). Para el cálculo de la tasa de bits errados en esta configuración no se emplean bits de guarda durante la transmisión.

**Figura 34**

*Bloque medidor de BER.*



Elaborado por el autor.

#### 4.2.4.4.3 Diagrama de constelación

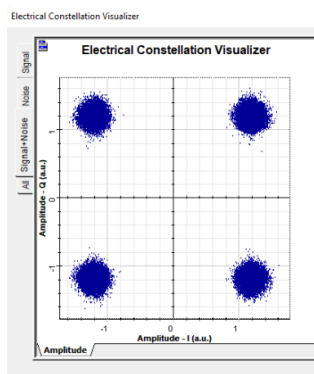
Diagrama que muestra la ubicación de las señales eléctricas en fase y cuadratura, cada una de estas señales representan los símbolos de la modulación. Este diagrama permite identificar rápidamente la calidad de la red de transmisión y el procesamiento en el receptor. Si, los símbolos recibidos se concentran en un solo punto bien definido dentro del diagrama, se interpreta como una comunicación con bajo nivel de ruido e interferencias y con un BER nulo. Caso contrario, si los símbolos recibidos se ubican de manera dispersa y no se observa un único punto de concentración se considera una transmisión con alto nivel de ruido e interferencia y un alto valor de BER. En la Figura 35 se presenta el bloque de visualización y la representación típica de símbolos para una modulación QPSK.

#### Figura 35

*Visualizador de Diagrama de Constelación*



(a)



(b)

*Nota:* a) Bloque Diagrama de Constelación b) Diagrama de constelación para modulación QPSK. Elaborado por el autor.

#### 4.2.4.4.4 Gráficas en el dominio del tiempo

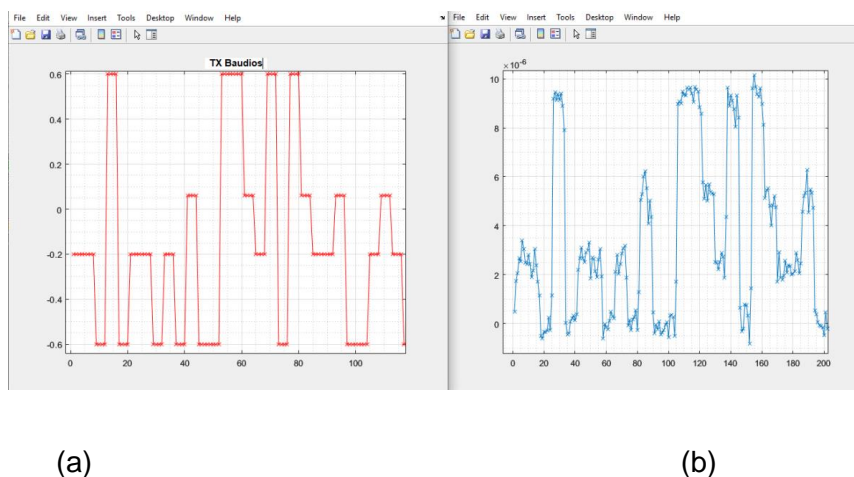
Para el esquema de modulación PAM-4 se emplea el bloque de co-simulación con Matlab, en el cual el archivo .m de demodulación toma los datos provenientes del fotodetector PIN, los

almacena y procesa, de tal forma que mediante las gráficas se pueda visualizar la representación de las señales multinivel, las cuales son de primordial importancia para establecer el tiempo inicial de detección de símbolos en el proceso de decodificación. Con ayuda de la herramienta zoom se identifica el medio tiempo de recepción de símbolo (ver Figura 36) y se coloca dicho valor en el archivo .m de recepción.

Cabe mencionar que este parámetro de tiempo de detección varía de acuerdo con la velocidad de transmisión y atenuación. Para evitar errores en la configuración de este parámetro se contrasta la información con la gráfica del archivo .m de transmisión en la que se observa la señal modulada sin degradaciones producto de las no lineales y DC de la fibra óptica.

### Figura 36

*Representación de símbolos PAM-4 en el transmisor y receptor.*



*Nota:* a) Símbolos en el Transmisor b) Símbolos en el Receptor. Elaborado por el autor.

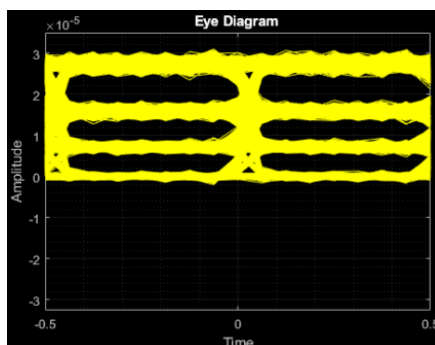
#### 4.2.4.4.5 Diagrama del ojo

Para calcular el BER en PAM-4, además de determinar el tiempo inicial de detección de símbolo, se requiere configurar en el archivo .m de recepción los valores umbrales de apertura del diagrama del ojo. Un diagrama del ojo con buena apertura indica un buen enlace con bajos niveles de ruido y con probabilidad de error de cero, conforme el diagrama del ojo se cierre se

presenta un alto BER, cercano al uno, el cual implica una transmisión deficiente con altos niveles de ruido y distorsión. Los umbrales de detección en este algoritmo no son fijos, al igual que el tiempo medio de detección de símbolo varía de acuerdo con los parámetros de la red.

### Figura 37

*Diagrama del ojo PAM-4 en el receptor*



*Nota:* Elaborado por el autor.

### 4.3 Simulación de las redes PAM-4 y QPSK

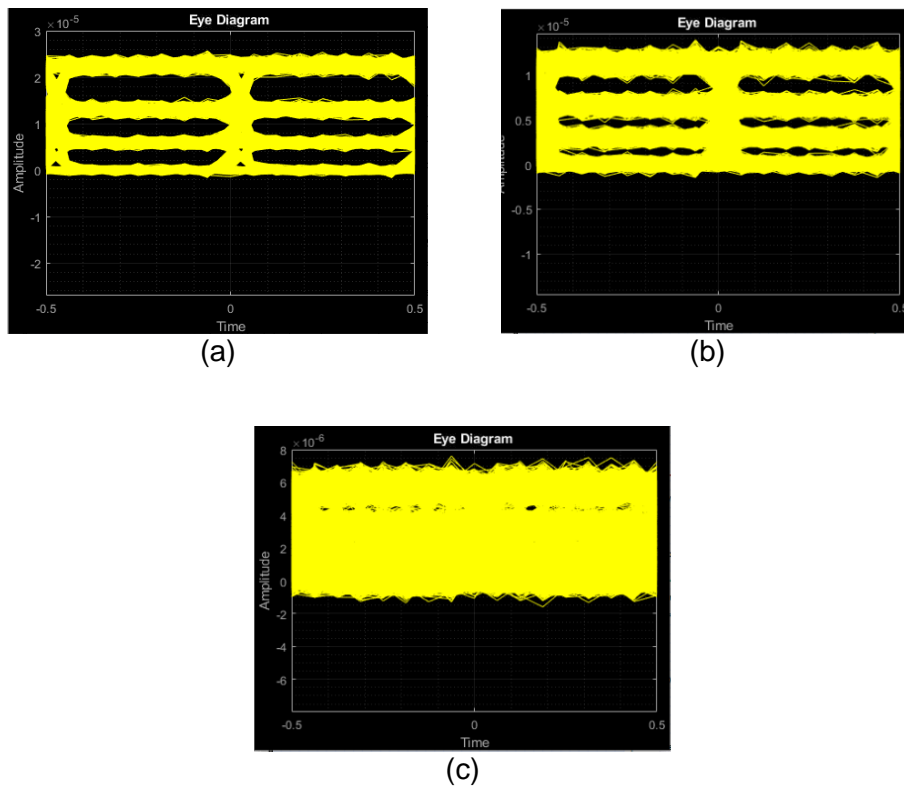
Finalizado el diseño de las redes a comparar, se realizan las pruebas de rendimiento de PAM-4 y QPSK. Para lograr este objetivo se consideran los siguientes parámetros de configuración en las simulaciones:  $2^{21}$  (2097152) bits de datos pseudo aleatorios, velocidades de transmisión de 50 Gbps y 100 Gbps, longitud del tramo de fibra óptica de 20 a 100km, atenuaciones de 3, 6 y 9 dB.

En las figuras a continuación se presentan las herramientas de visualización de los simuladores OptiSystem y Matlab que permiten estimar visualmente el performance y comportamiento de las redes. Para el esquema de modulación basada en PAM-4 se presentan los diagramas de ojo obtenidos en diferentes tramos de fibra con valores de atenuación de 3 dB, 6 dB y 9dB, mientras que para la red basada en QPSK se presentan los diagramas de constelación obtenidos a diferentes tramos de fibra óptica y atenuación utilizando mecanismos y algoritmos de DSP propios del bloque de OptiSystem.

### 4.3.1 Simulación de las redes PAM-4 y QPSK con DSP a 50 Gbps

**Figura 38**

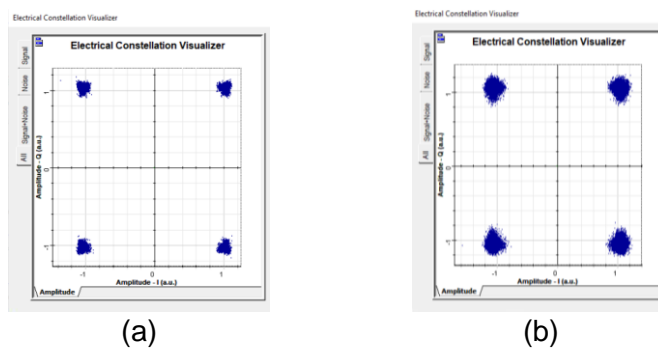
*Diagramas de ojo en transmisión a 50 Gbps con PAM-4 a 60 Km.*

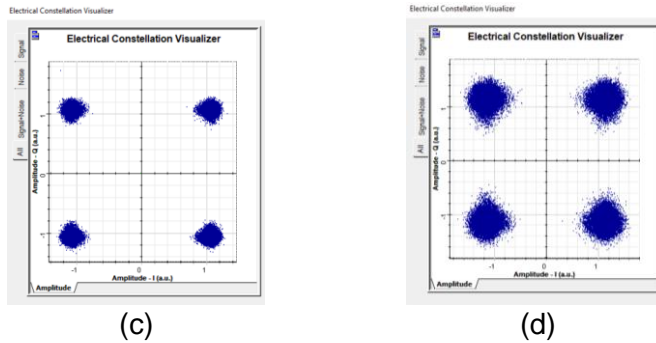


*Nota:* Símbolos a) 3dB de atenuación, b) 6dB de atenuación, c) 9db de atenuación. Elaborado por el autor.

**Figura 39**

*Diagramas de constelación QPSK con DSP a 50 Gbps a 3 dB de atenuación.*

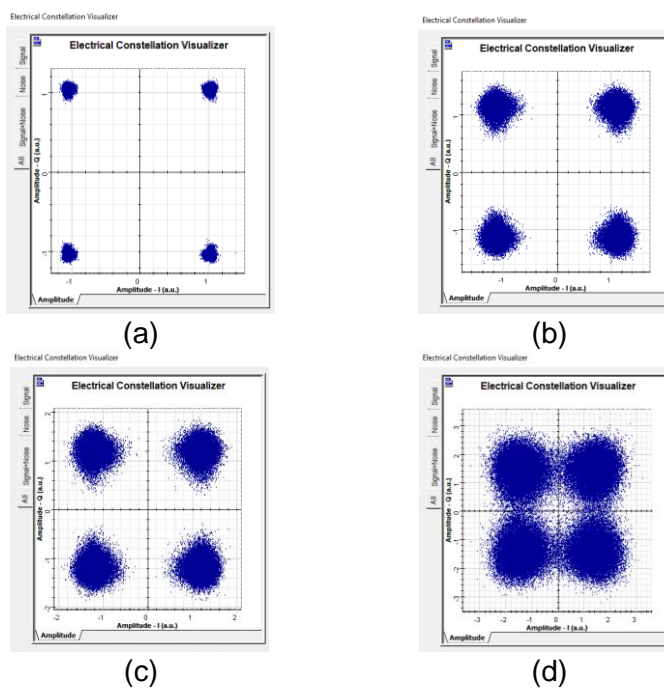




Nota: a)  $d=40$  km, b)  $d=60$  km, c)  $d=80$  km y d)  $d=100$  km. Elaborado por el autor.

### Figura 40

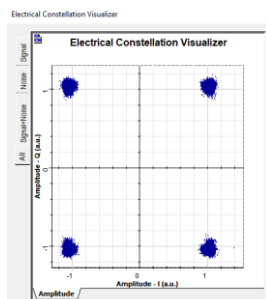
Diagramas de constelación QPSK con DSP a 50 Gbps a 6 dB de atenuación.



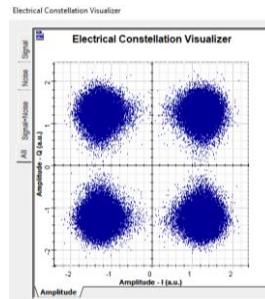
Nota: a)  $d=20$  km, b)  $d=60$  km, c)  $d=80$  km y d)  $d=100$  km. Elaborado por el autor.

### Figura 41

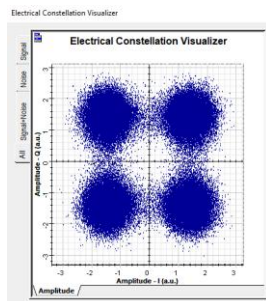
Diagramas de constelación QPSK con DSP a 50 Gbps a 9 dB de atenuación.



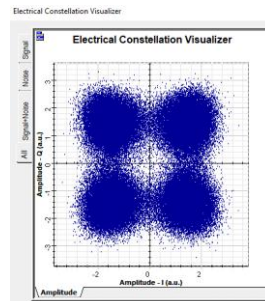
(a)



(b)



(c)



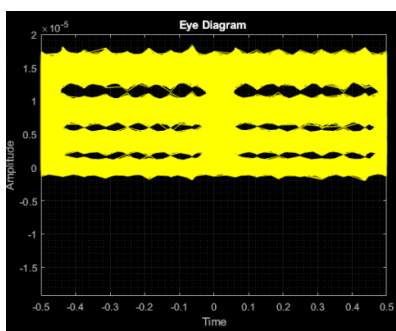
(d)

Nota: a)  $d=20$  km, b)  $d=60$  km, c)  $d=80$  km y d)  $d=100$  km. Elaborado por el autor.

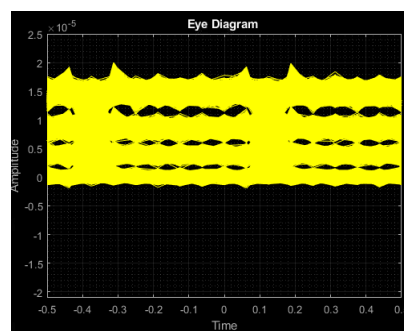
### 4.3.2 Simulación de las redes PAM-4 y QPSK a 100 Gbps

Figura 42

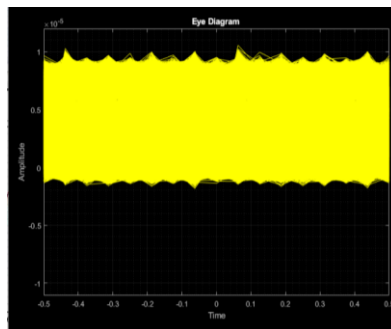
Diagramas de ojo en transmisión a 100 Gbps con PAM-4 a 40 Km.



(a)



(b)

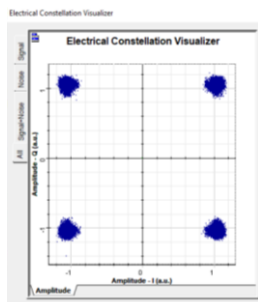


(c)

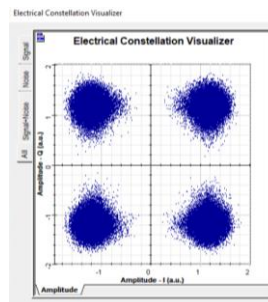
Nota: Símbolos a) 3dB de atenuación, b) 6dB de atenuación, c) 9db de atenuación. Elaborado por el autor.

### Figura 43

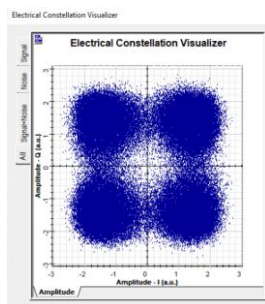
Diagramas de constelación QPSK con DSP a 100 Gbps a 3 dB de atenuación.



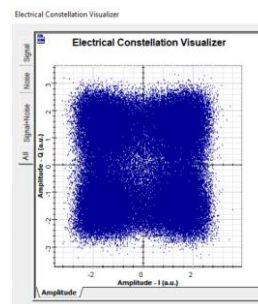
(a)



(b)



(c)

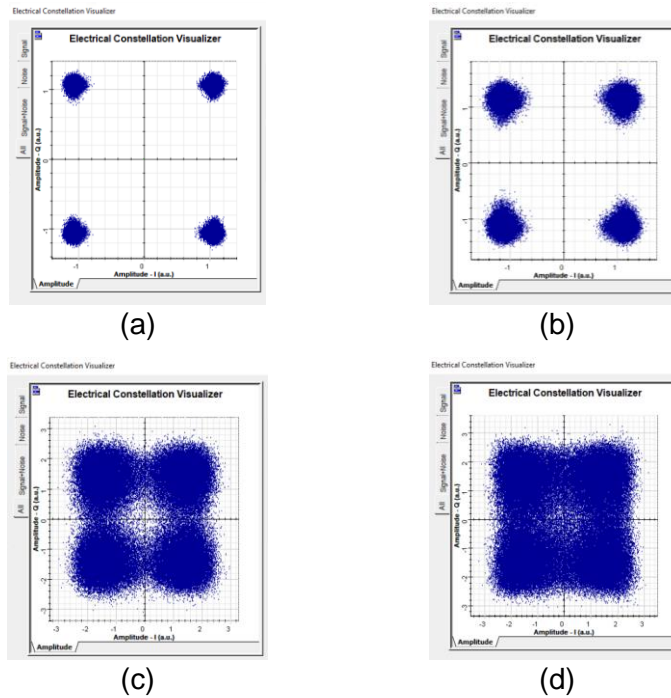


(d)

Nota: a) d=60 km, b) d=80 km, c) d=100 km y d) d=120 km. Elaborado por el autor.

### Figura 44

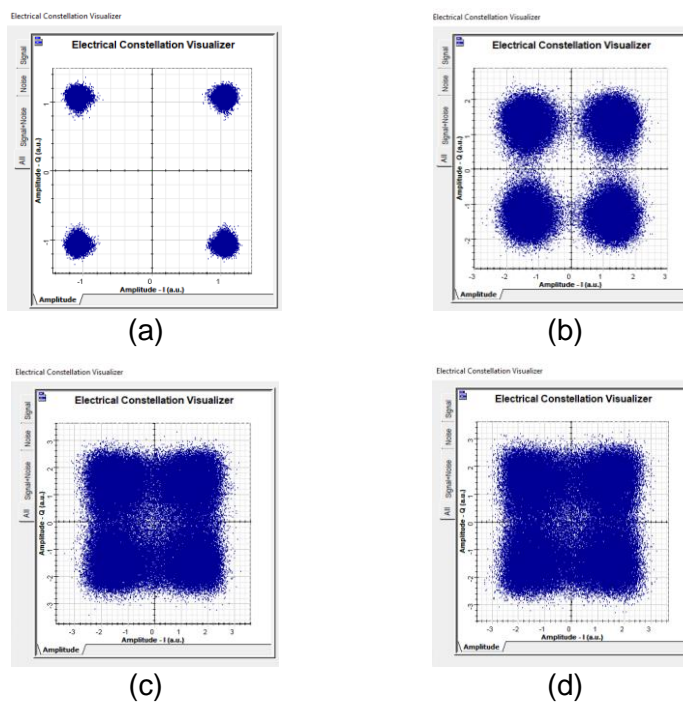
Diagramas de constelación QPSK con DSP a 100 Gbps a 6 dB de atenuación.



Nota: a)  $d=20$  km, b)  $d=60$  km, c)  $d=80$  km y d)  $d=100$  km. Elaborado por el autor.

### Figura 45

Diagramas de constelación QPSK con DSP a 100 Gbps a 9 dB de atenuación.



Nota: a)  $d=20$  km, b)  $d=60$  km, c)  $d=80$  km y d)  $d=100$  km. Elaborado por el autor

## CAPITULO V

### 5 ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis de resultados obtenidos en OptiSystem en co-simulación con Matlab. Se analizan tres escenarios, el primero presenta una red con modulación basada en modulación de amplitud PAM-4 con compensador de dispersión y detección directa, el segundo escenario presenta una modulación compleja QPSK con detección coherente sin DSP y el tercer escenario muestra una modulación compleja QPSK con detección coherente en conjunto con esquemas y algoritmos de procesamiento digital de señales.

Las velocidades de transmisión a considerar son 50 Gbps y 100 Gbps correspondientes a los valores propuestos por las redes de nueva generación NGPON y NGPON2, para cada uno de estos parámetros se envían 2097152 bits de datos pseudoaleatorios y se comparan los resultados del BER en función de la potencia óptica recibida, la cual se obtiene del bloque power meter para cada de las iteraciones, así como también la distancia alcanzada por el enlace versus el BER.

#### 5.1 Resultados con velocidad de transmisión a 50 Gbps con 3dB de atenuación

Los resultados obtenidos de BER versus potencia recibida de PAM-4 frente a los dos escenarios de QPSK se presentan en la Figura 46, en la que se identifica que QPSK con DSP presenta el mejor rendimiento, debido a que para alcanzar un BER en el orden de  $10^{-7}$  se requiere una potencia mínima de recepción de -21.6 dBm respecto a PAM-4 que requiere de -18.6 dBm, generando una diferencia de potencia de 3 dBm. Al emplear QPSK sin DSP se requiere de una potencia de -13.6 dBm, ocasionando una penalidad de 8 dBm para alcanzar el mismo rendimiento. La Tabla 4 muestra un resumen de la potencia óptica recibida y la penalidad del receptor para PAM-4 y QPSK con DSP.

**Tabla 4**

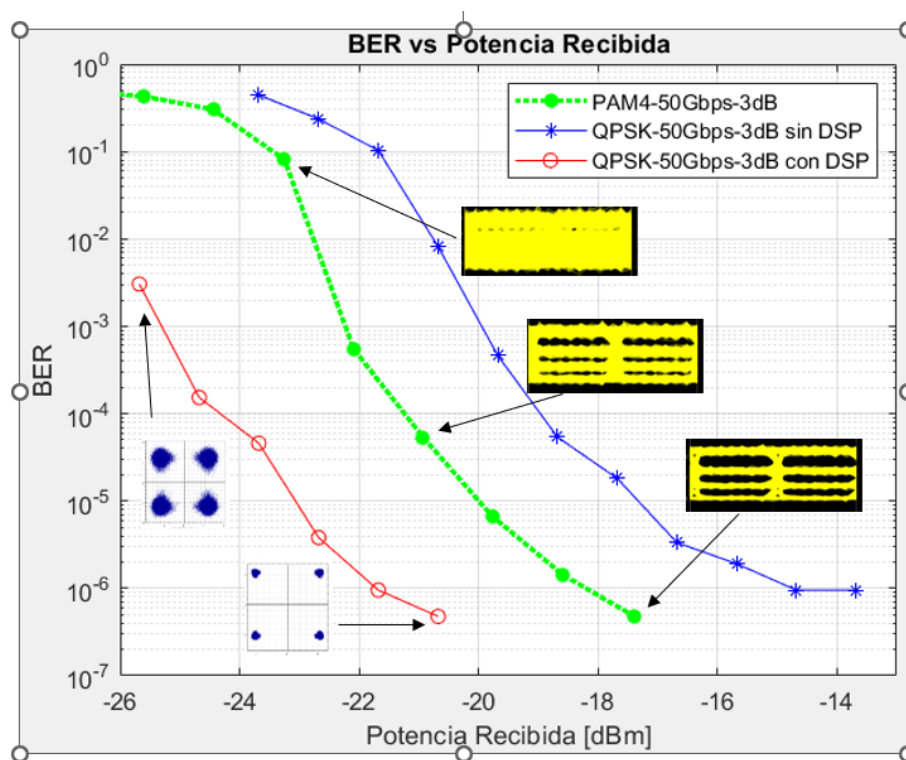
*Comparación numérica de las redes ópticas PAM-4 y QPSK con DSP a 3dB.*

| Tipo de Red                        | BER       | Potencia de Recepción | Penalidad |
|------------------------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| PAM-4 con detección directa        | $10^{-7}$ | -18,6 dBm             | 3 dB      |
| QPSK con DSP y detección coherente | $10^{-7}$ | -21,6 dBm             |           |

En la Figura 46 también se observan los diagramas de constelación para QPSK con DSP y los diagramas de ojo para PAM-4 los cuales proporcionan una representación visual de la distinguibilidad de los símbolos.

**Figura 46**

*BER vs Potencias Recibida 50 Gbps-3dB.*



Elaborado por el autor.

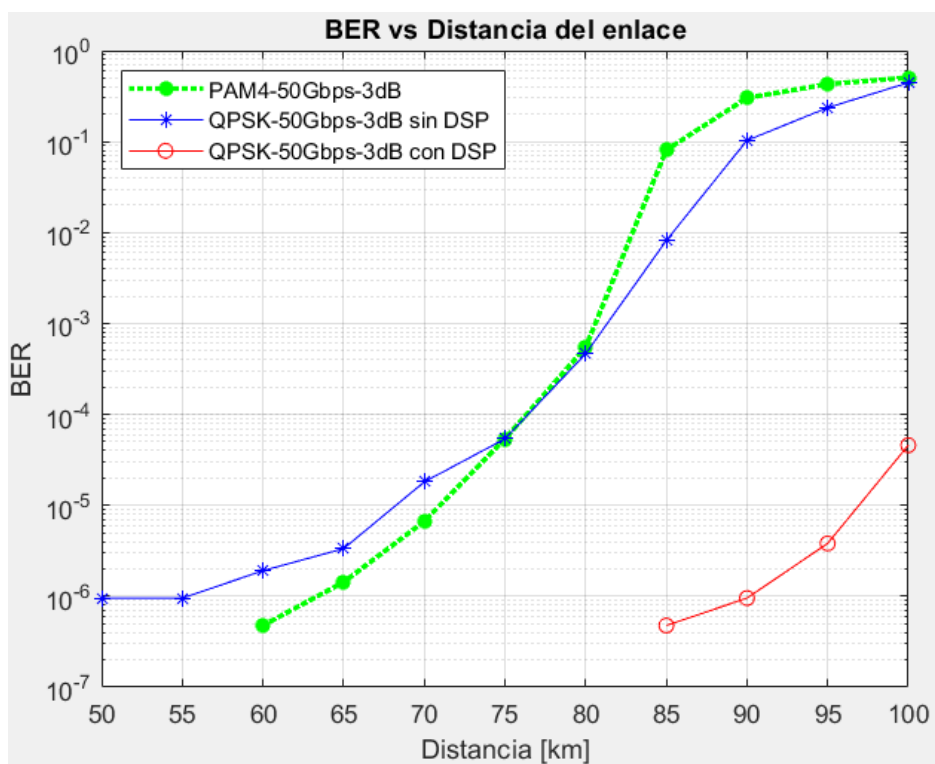
Conforme se reduce la potencia de recepción e incrementa la distancia del enlace, los símbolos se encuentran más dispersos aumentando de manera general el BER, el EVM en los

diagramas de constelación, mientras que en los diagramas del ojo se evidencia el cierre vertical indicando la presencia de ISI producto de la dispersión cromática y efectos no lineales de la fibra óptica.

Los resultados del alcance máximo de las redes utilizadas se presentan en la Figura 47 en la que se indica que el sistema basado en PAM-4 alcanza una distancia máxima de 60 km antes de obtener un BER de  $10^{-7}$ , mientras que el sistema de QPSK con DSP logra alcanzar una distancia máxima de 85 km, permitiendo extender la red de fibra óptica 25 km más previo a obtener errores en la transmisión.

**Figura 47**

*BER vs Distancia del enlace 50 Gbps-3dB.*



Elaborado por el autor.

De las figuras 46 y 47 se determina que en los esquemas de modulación compleja y de detección coherente al no utilizar técnicas de DSP presentan un rendimiento deficiente frente a

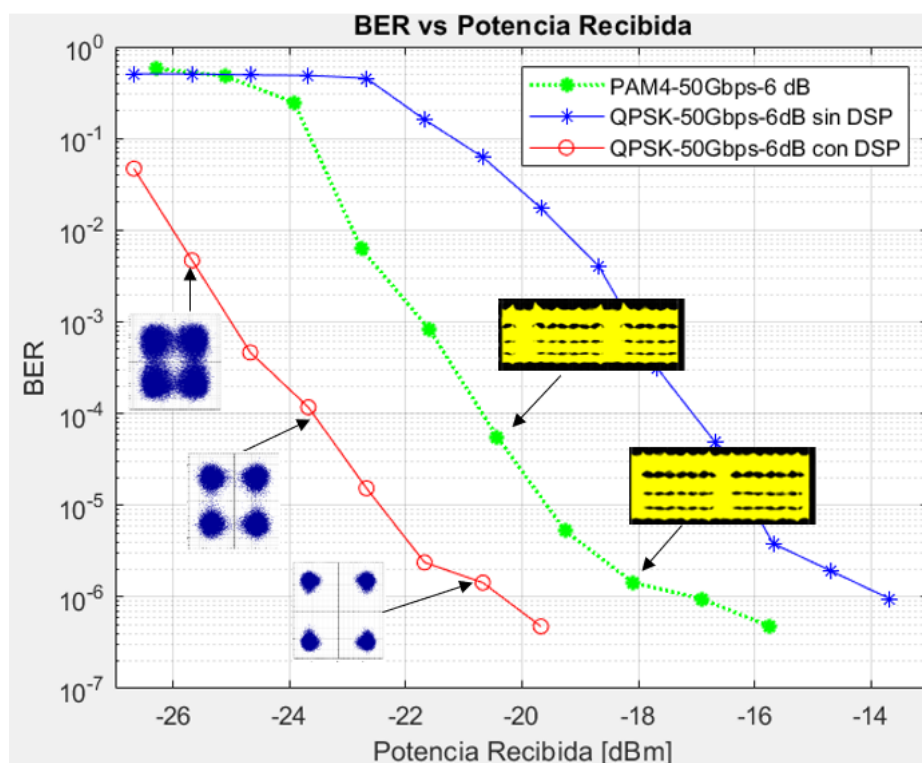
los sistemas basados en modulación de intensidad y detección directa. Para obtener un BER de  $10^{-7}$  la red QPSK sin DSP presenta una penalidad de 5 dBm respecto de PAM-4.

## 5.2 Resultados con velocidad de transmisión a 50 Gbps con 6dB de atenuación

Conforme se incrementa el valor de atenuación en la red de transporte, el desempeño de PAM-4 disminuye respecto de QPSK con DSP. Para obtener un BER de  $10^{-7}$  se obtiene una potencia de recepción de -15.7 dBm en PAM-4 y para QPSK con DSP -19.6 dBm, como se indica en la Figura 48.

**Figura 48**

*BER vs Potencia Recibida 50 Gbps-6dB.*



Elaborado por el autor.

En la Tabla 5 se muestra un resumen de la potencia óptica recibida y la penalidad del receptor para PAM-4 y QPSK con DSP con 6 dB de atenuación

**Tabla 5**

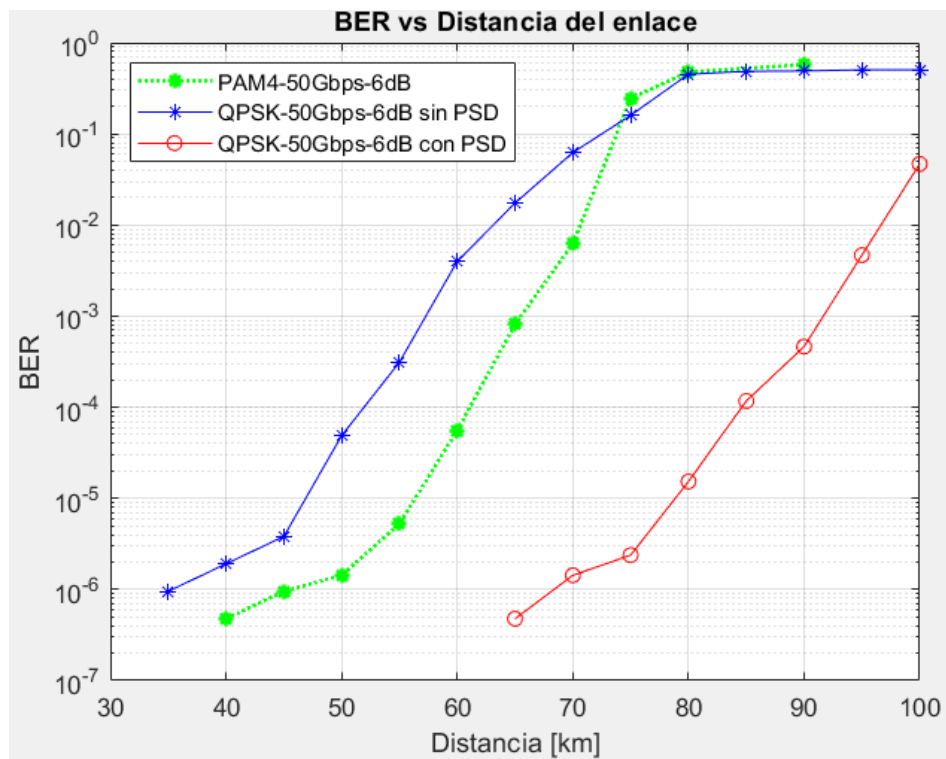
Comparación numérica de las redes ópticas PAM-4 y QPSK con DSP a 6dB.

| Tipo de Red                        | BER       | Potencia de Recepción | Penalidad |
|------------------------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| PAM-4 con detección directa        | $10^{-7}$ | -15,7 dBm             | 3,9 dB    |
| QPSK con DSP y detección coherente | $10^{-7}$ | -19,6 dBm             |           |

La red basada en PAM-4 es más afectada por la atenuación y DC, a través de los diagramas de ojo superpuestos en la Figura 48 se evidencia el cierre parcial de los mismos producto de la presencia de ISI y jitter, este tipo de red al no emplear algoritmos de filtrado, reshaping, resampling y sincronización reduce el performance respecto de QPSK con DSP.

**Figura 49**

BER vs Distancia del enlace 50Gbps-6dB.



Elaborado por el autor.

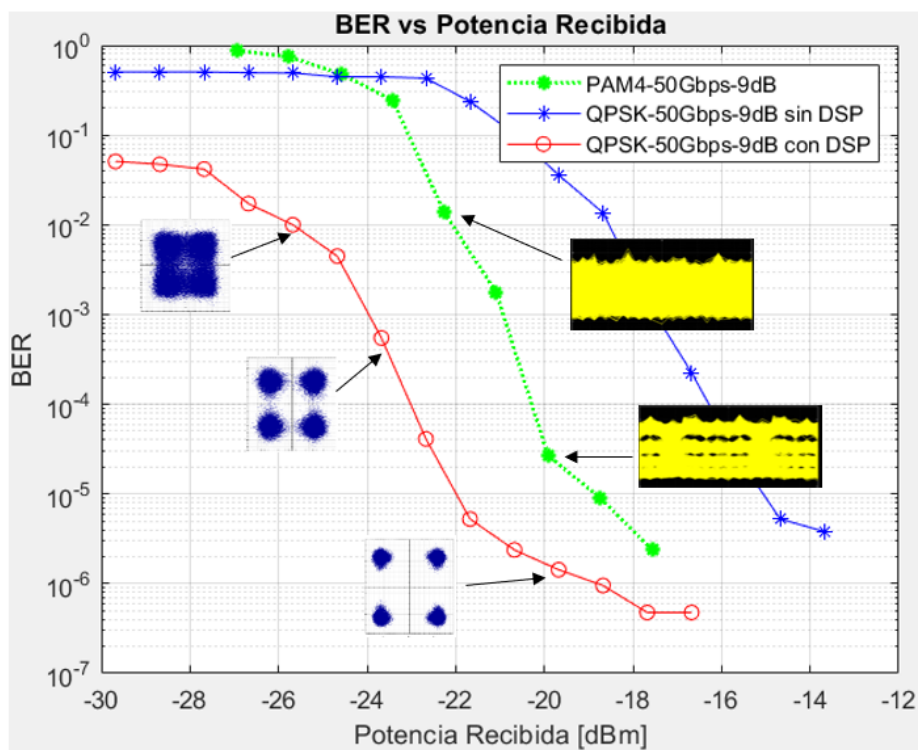
En la Figura 49 se observa que al aplicar 6 dB de atenuación sobre las redes planteadas se presenta una reducción de 20 km de distancia del enlace respecto del escenario anterior. Así mismo, la red basada en QPSK con DSP alcanza 25 km más de distancia respecto de PAM-4 previo a presentar un BER de  $10^{-7}$ .

### 5.3 Resultados con velocidad de transmisión a 50 Gbps con 9dB de atenuación

Al incrementar a 9dB de atenuación sobre los tres escenarios se observa un deterioro significativo en el performance, la Figura 50 indica que los diagramas de ojo de PAM-4 ya no presentan una apertura considerable en sus ojos ocasionando el incremento del BER a un orden de  $10^{-6}$  respecto de QPSK con DSP que aún mantiene un BER de  $10^{-7}$ , no obstante, se evidencia mayor dispersión de los símbolos en los diagramas de constelación.

**Figura 50**

*BER vs Potencia Recibida 50 Gbps-9dB.*



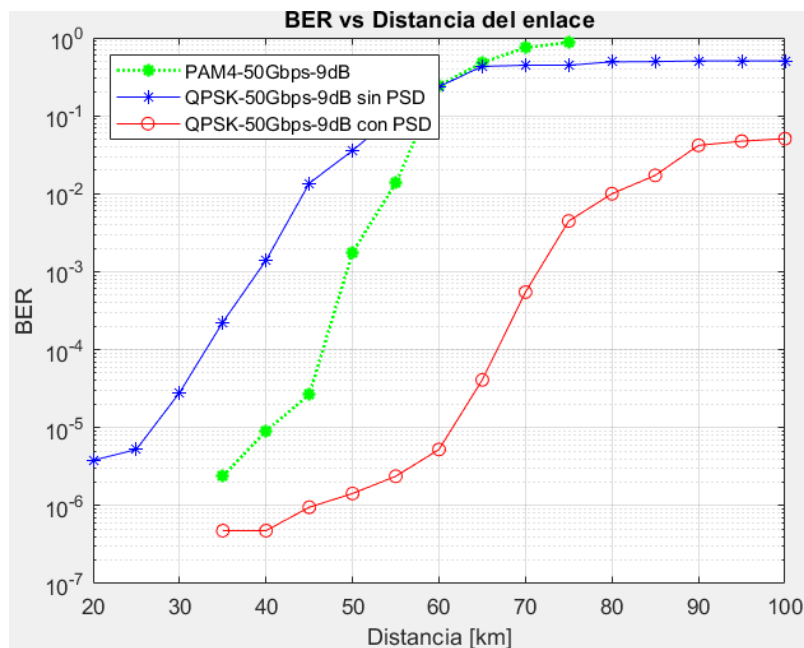
Elaborado por el autor.

Los resultados de QPSK sin DSP presentan una penalidad de 4 dB frente a PAM-4 y de 7 dB respecto de QPSK con DSP para un BER de  $10^{-6}$ . Por lo tanto, es imperativo utilizar algoritmos de procesamiento digital de señales en los esquemas basados en detección coherente, de esta manera se puede obtener mayor sensibilidad en el receptor debido a que pueden procesar los bajos niveles de potencia, además de compensar y corregir los efectos del canal óptico. Sin embargo, esta mejora en el rendimiento se traduce en complejidad en el sistema además de incremento en costos de implementación y mantenimiento.

Las curvas de distancia del enlace se presentan en la Figura 51 y se determina que la red basada en QPSK con DSP alcanza una distancia máxima de 60 km considerando un BER de  $10^{-6}$ , así también PAM-4 alcanza 40 km de distancia teniendo una reducción de cobertura de 20km de distancia. Al no hacer uso de algoritmos de DSP se puede evidenciar que a tan solo 20 km de distancia del enlace ya se presentan errores en la transmisión en el orden de BER  $10^{-6}$ .

**Figura 51**

*BER vs Distancia del enlace 50 Gbps-9dB.*



Elaborado por el autor.

## 5.4 Resultados con velocidad de transmisión a 100 Gbps con 3dB de atenuación.

Una vez determinada la importancia del uso de DSP en los esquemas de detección coherente, se procede a incrementar la velocidad de transmisión a 100 Gbps y se evalúa el rendimiento de las redes que emplean modulación en intensidad y detección directa frente a las redes de modulación compleja y detección coherente.

En la cobertura en términos de distancia.

**Figura 52** se observan las curvas de BER versus la potencia recibida de la cual se identifica que la red QPSK con DSP alcanza un BER en el orden de  $10^{-6}$  con una potencia de recepción de -14.52 dBm, mientras que para lograr el mismo BER con PAM-4 se tiene una penalidad cercana a 3 dB. La Tabla 6 presenta un resumen de los valores de potencia óptica recibida y la penalización correspondiente en el receptor

**Tabla 6**

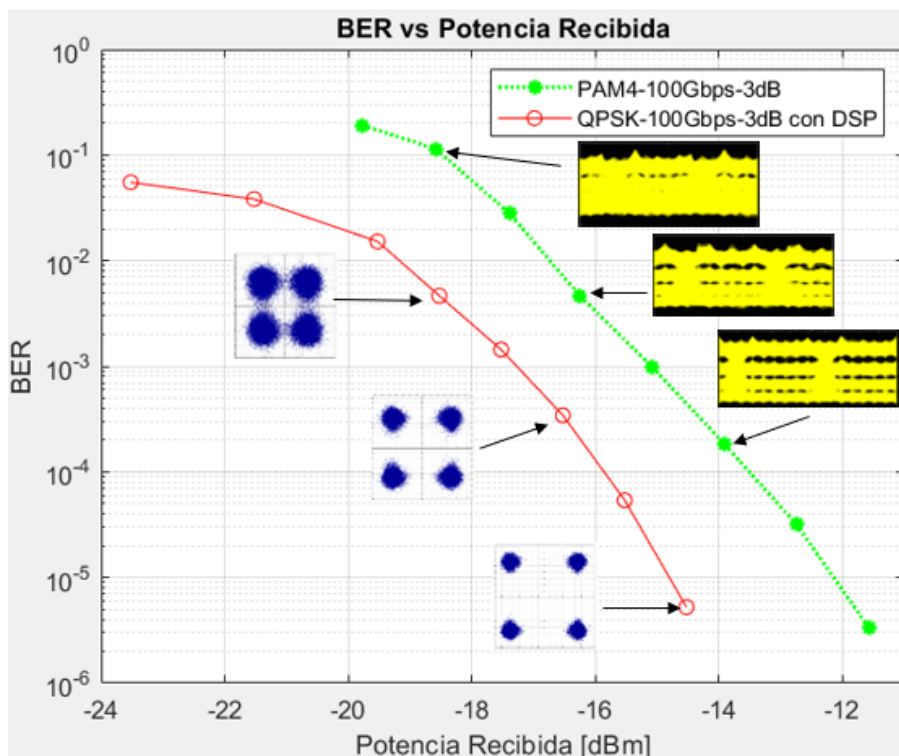
*Comparación numérica de las redes ópticas PAM-4 y QPSK con DSP a 3dB.*

| Tipo de Red                        | BER       | Potencia de Recepción | Penalidad |
|------------------------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| PAM-4 con detección directa        | $10^{-6}$ | -14.52 dBm            | 2,96 dB   |
| QPSK con DSP y detección coherente | $10^{-6}$ | -11.56 dBm            |           |

En análisis de los diagramas de ojo de PAM-4 indica que a medida que aumenta la velocidad de transmisión, se produce un incremento en el ISI producto de la dispersión cromática. No obstante, la red QPSK con DSP muestra mayor capacidad de tolerancia al ruido y al mismo tiempo se ve menos afectada por los efectos de la DC, permitiendo alcanzar altas velocidades de transmisión y mayor cobertura en términos de distancia.

Figura 52

*BER vs Potencia Recibida 100 Gbps-3dB.*



Elaborado por el autor.

### 5.5 Resultados con velocidad de transmisión a 100 Gbps con 6dB de atenuación.

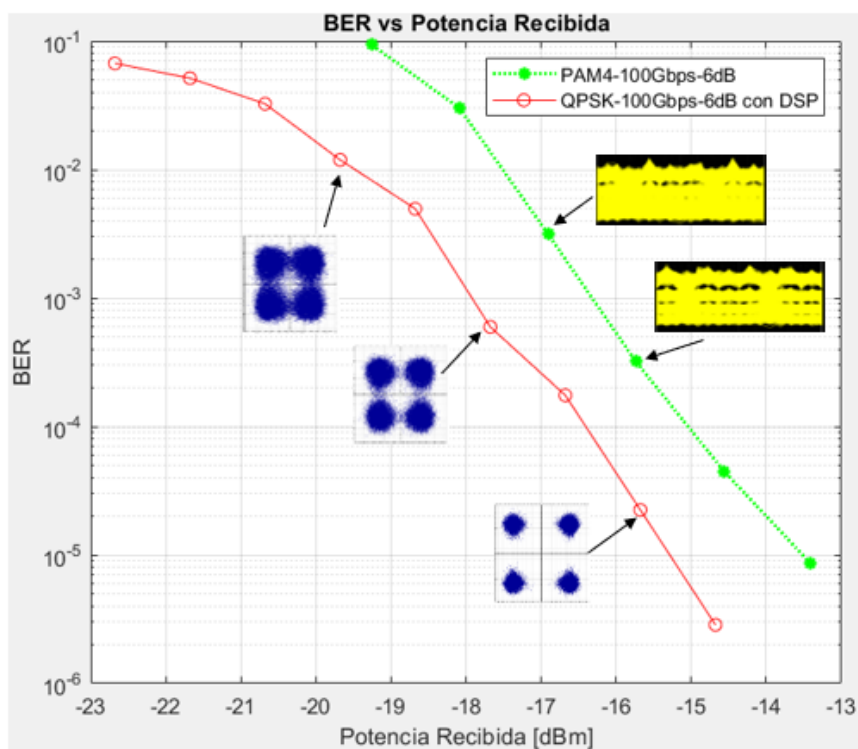
Al igual que en el caso anterior, en la Figura 53 se observa una mayor distorsión en los diagramas del ojo para el esquema de PAM-4, además de la reducción de potencia de recepción en 1 dB. Es relevante destacar que por debajo de los -17 dBm de potencia las aperturas del ojo ya no son visibles pues se experimenta una considerable dispersión que dificulta la determinación de los umbrales de los ojos mismos que son necesarios para el cálculo del BER.

Para obtener un BER en el orden de  $10^{-6}$  se requiere de una potencia de recepción de -14.6 dBm para la red de QPSK con DSP y -13.4 dBm en el caso de la red de PAM-4, lo que

representa una penalización de 1.2 dB. Si, se considera un BER en el orden de  $10^{-3}$  PAM-4 tiene una penalización de potencia de 1.7 dB respecto de QPSK con DSP, sin embargo, para este valor de BER se deben emplear en ambos casos técnicas de FEC o a su vez bits de guarda en QPSK que mejoren el rendimiento de la red.

**Figura 53**

*BER vs Potencia Recibida 100 Gbps-6dB.*



Elaborado por el autor.

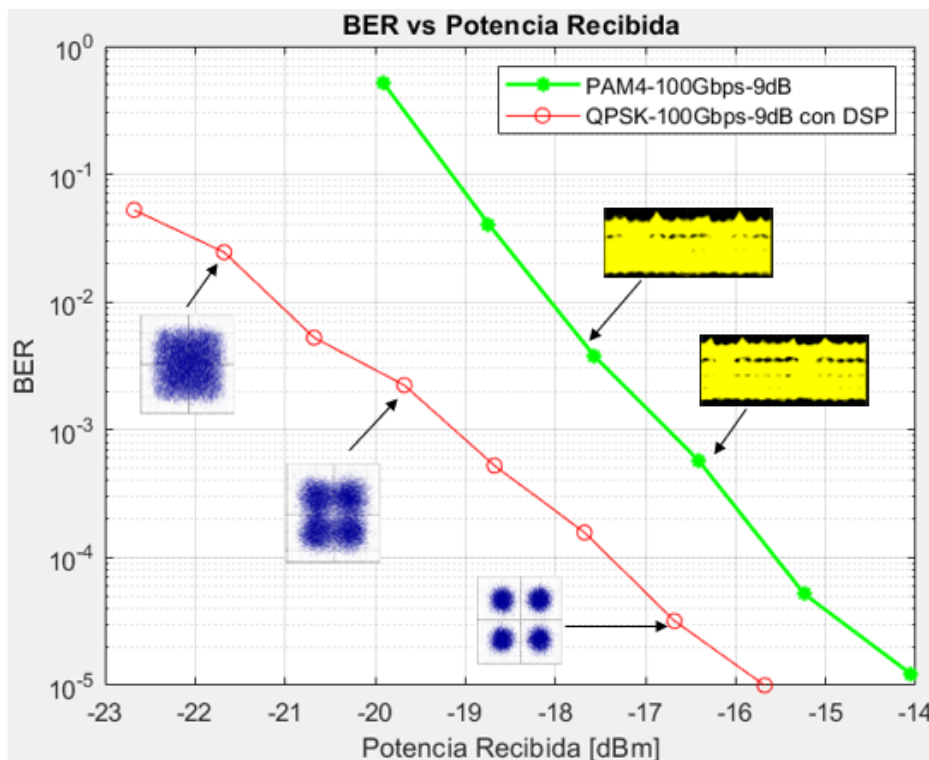
## 5.6 Resultados con velocidad de transmisión a 100 Gbps con 9dB de atenuación.

A 100 Gbps y 9dB de atenuación en la red de transporte, la red QPSK con DSP supera el rendimiento de la red basada en PAM-4. Esto se debe a que, bajo las mismas condiciones de distancia, atenuación, presencia de ruido y distorsión alcanza un mejor desempeño como se

indica en la Figura 54. Se observa que la diferencia entre las curvas del BER para las redes PAM-4 y QPSK con DSP es aproximadamente de 2.5 dB, correspondientes a un BER de  $10^{-5}$ .

**Figura 54**

*BER vs Potencia Recibida 100 Gbps-9dB.*



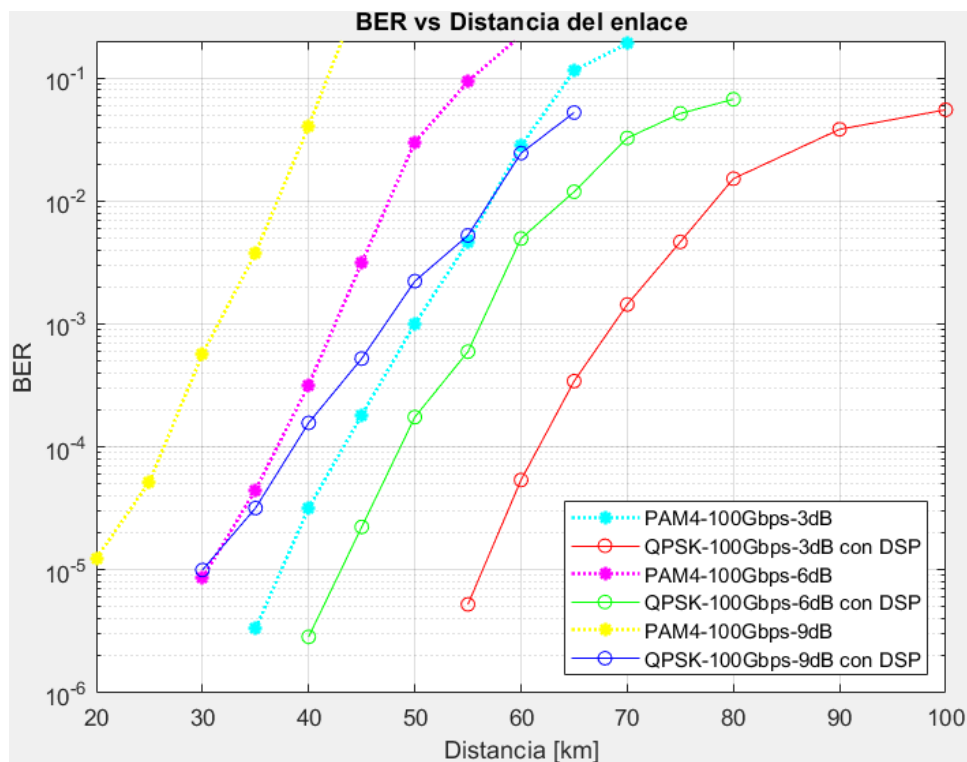
Elaborado por el autor.

En la Figura 55, se muestra una comparación del alcance de cobertura de la conexión en términos de distancia. Para un BER en el orden de  $10^{-3}$  se puede identificar que las redes que utilizan QPSK con DSP logran un mayor alcance obteniendo alcances de 70 km, 55 km y 47 km para valores de atenuación de 3, 6 y 9 dB, respectivamente. En contraste, las redes que emplean modulación por intensidad experimentan una disminución en el alcance de la red, por ejemplo, para PAM-4 con atenuación de 3dB la distancia máxima es de 50 km, lo que presenta una disminución de 20 km respecto a los sistemas de modulación compleja. El escenario menos

eficiente se observa en PAM-4 con 9 dB de atenuación, ya que solo logra alcanzar una distancia de 30 km antes de obtener un BER de  $10^{-3}$ .

**Figura 55**

*BER vs Distancia del enlace 100 Gbps.*



Elaborado por el autor.

En términos generales, los resultados obtenidos en los diversos escenarios evaluados a velocidades de 50 Gbps y 100 Gbps que esperan alcanzar las redes de nueva generación indican que los sistemas de detección coherente requieren de menor potencia óptica de recepción para procesar y recuperar la información transmitida.

Así también, las soluciones convencionales basadas en modulación de intensidad y detección directa presentan limitaciones en cuanto al rendimiento para altas tasas de transmisión y amplias áreas de cobertura. Para mejorar el rendimiento de PAM-4 de acuerdo con Jaramillo Cisneros, 2022, p. 36, se recomienda emplear pre-distorsión en la generación de los símbolos

modulados a la salida del MZM de forma que a altas velocidades de transmisión presente un mejor rendimiento.

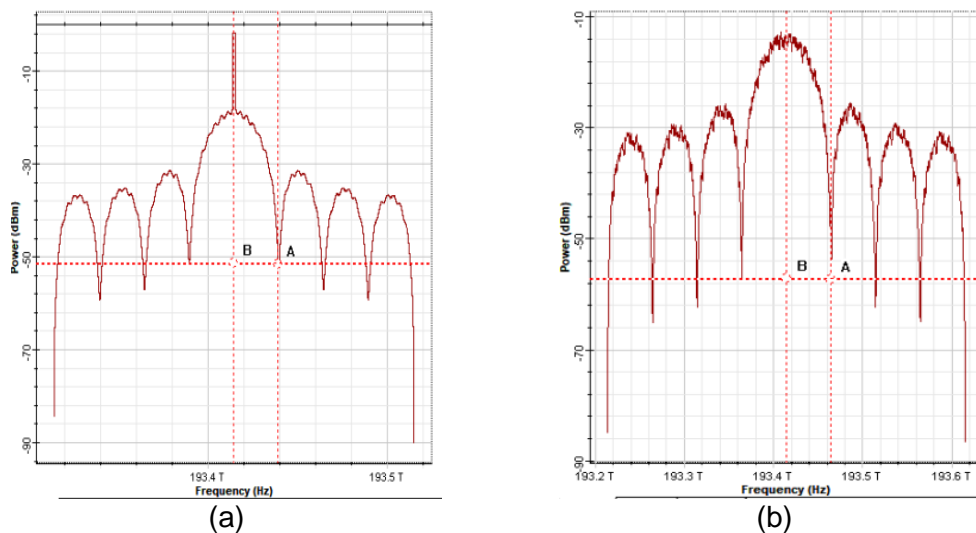
La flexibilidad ofrecida por los sistemas de modulación compleja y detección coherente no solo mejoran la resistencia de la señal que se va a transmitir, sino que también optimiza el uso del ancho de banda disponible en el canal.

## 5.7 Análisis de eficiencia espectral

En lo que respecta a la eficiencia espectral, las redes analizadas presentan la misma eficiencia espectral ya que comparten el mismo nivel de M-ario de modulación, como se indica en la **Figura 56**. Sin embargo, al incorporar doble polarización a los sistemas de modulación complejos como QPSK (DP-QPSK), se logra un aumento significativo del sistema pues permite la transmisión de dos señales independientes de forma simultánea, que aporta en brindar una mayor flexibilidad en la topología de las redes PON debido a que estas se podrán adaptarse a los requerimientos de anchos de banda de los usuarios, finalmente mejoran la eficiencia espectral, lo cual es esencialmente valioso en las redes de nueva generación.

**Figura 56**

Eficiencia espectral PAM-4 vs QPSK.



*Nota:* a) PAM-4, b) QPSK con DSP. Elaborado por el autor



## CAPITULO VI

### 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

En el presente estudio, a través de la herramienta de simulación OptiSystem en co-simulación con Matlab, se comparó el desempeño de las redes PON fundamentadas en esquemas de modulación de intensidad y detección directa frente a las redes que utilizan modulación compleja y detección coherente. Los resultados numéricos obtenidos a partir de diversas métricas como velocidad de transmisión, atenuación y distancia del enlace indican de manera concluyente que la red basada en QPSK con algoritmos de procesamiento digital de señales y detección coherente supera en rendimiento al esquema de red de PAM-4

Para optimizar el rendimiento de las redes que utilizan modulación de intensidad, se requiere implementar pre-distorsión de la amplitud de los símbolos a transmitir, además de la inclusión de fibras compensadoras de dispersión, las cuales tiene un papel fundamental al mejorar la eficiencia de la red en términos de BER permitiendo alcanzar mayores distancias en términos de cobertura, así como la calidad y confiabilidad de la transmisión de los datos.

Las soluciones basadas en acceso coherente representan una solución atractiva para las redes NGPON de alta capacidad debido a su alta sensibilidad y funcionalidades de DSP que compensan los efectos no lineales y de distorsión producidos en el medio de transmisión. No obstante, los mayores retos que deben enfrentar las redes ópticas complejas con detección coherente son el costo de implementación, actualización de infraestructuras de redes y mantenimiento, además de la complejidad y compatibilidad con los sistemas existentes.

De acuerdo con los resultados obtenidos se evidenció que los sistemas de detección coherente requieren de menos potencia en el receptor respecto de los sistemas de detección directa. Las gráficas del BER de PAM-4 respecto de QPSK con DSP demuestran una penalidad promedio cercana a los 3dB de potencia para una velocidad de transmisión de 50 Gbps con un

BER de orden de  $10^{-7}$ , así también se evidenció una penalidad cercana a 2 dB a una velocidad de transmisión de 100 Gbps, con un BER por debajo de  $10^{-5}$ .

Para las redes evaluadas se determina que la eficiencia espectral para los diferentes tipos de redes es el mismo, sin embargo, si se requiere optimizar la eficiencia espectral y optimizar el recurso limitado del ancho de banda se debería incrementar el índice de modulación tanto para la modulación basada en amplitud como la modulación por desplazamiento de fase.

## 6.2 Recomendaciones

Las redes coherentes pueden apoyarse de la inteligencia artificial, ya sea para el procesamiento digital de señales como en aspectos de gestión y planificación de la red, se recomienda realizar co-simulaciones con Matlab que empleen nuevos algoritmos que optimicen el procesamiento digital de las señales en el demodulador coherente.

Se recomienda para futuros estudios realizar multiplexación de señales moduladas en M-PSK con el propósito de incrementar la capacidad del canal para contrastar el alcance teórico de las redes de nueva generación.

Con el propósito de mejorar la eficiencia espectral de las redes complejas con detección coherente se recomienda realizar esquemas de doble polarización y determinar el performance a velocidades de transmisión superior a los 100 Gbps.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Ortiz, M. E. (2019). Evaluación experimental de técnicas de modulación Directa y externa utilizando los equipos del Laboratorio de comunicaciones ópticas del DETRI” [bachelorThesis, Quito, 2019.]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19954>
- Albakay, N. (2018a). Design and Analysis of Binary Driven Coherent M-ary Qam Transmitter for Next Generation Optical Networks. University of Nebraska.
- Albakay, N. (2018b). Design and Analysis of Binary Driven Coherent M-ary Qam Transmitter for Next Generation Optical Networks [PhD Thesis]. University of Nebraska.
- Arevalo, G., Cardenas, D., Cachimuel, R., & Rivadeneira, L. (2019). 10 Gb/s Non-Coherent DPSK PON for Next Generation Networks, BER performance. 2019 IEEE Fourth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), 1-4.  
<https://doi.org/10.1109/ETCM48019.2019.9014863>
- Celi Izquierdo, B. A. (2022). Análisis técnico comparativo de las redes de acceso de nueva generación: Análisis técnico comparativo de las redes de acceso XGS-PON versus NG-PON2. [bachelorThesis, Quito : EPN, 2022.].  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22654>
- Hidalgo Moreta, G. S. (2016). Diseño, simulación y pruebas de un laboratorio de sistemas de comunicaciones ópticas usando Matlab Communications System Toolbox, Simulink y OptiSystem [bachelorThesis, Quito, 2016.].  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15323>
- Hui, R. (2020a). Introduction to fiber-optic communications. Academic Press.
- Hui, R. (2020b). Introduction to fiber-optic communications. Academic Press.
- Jaramillo Cisneros, B. R. (2022). Diseño y simulación de una red PAM4—PAM8 PON, para proveer servicios de acceso de alta velocidad [masterThesis, PUCE - Quito].  
<http://repositorio.puce.edu.ec:80/handle/22000/21241>

- Keysight. (s. f.). Pulse Amplitude Modulation (PAM). Keysight. Recuperado 19 de julio de 2023, de <https://www.keysight.com/us/en/solutions/high-speed-digital-system-design/pulse-amplitude-modulation-pam4.html>
- Keysight Technologies. (2018, octubre 23). Everything You Need to Know About Complex Optical Modulation | Keysight Blogs. <https://www.keysight.com/blogs/inds/2018/10/22/everything-you-need-to-know-about-complex-optical-modulation>
- Lagos Jácome, L. E., & Salcedo Sotelo, C. A. (2018). Implementación y caracterización de un prototipo de sistema de transmisión coherente en redes ópticas pasivas. [bachelorThesis]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15868>
- Optiwave Corporation. (2020). OptiSystem. [https://www.mathworks.com/products/connections/product\\_detail/optisystem.html](https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/optisystem.html)
- Taylor, M. G. (2004). Coherent detection method using DSP for demodulation of signal and subsequent equalization of propagation impairments. IEEE Photonics Technology Letters, 16(2), 674-676. <https://doi.org/10.1109/LPT.2003.823106>
- Thorlabs. (2022). LN86S-FC 20 Gb/s IQ Modulator, FC/PC Connectors. <https://www.thorlabs.com>
- Torres Ferrera, P. (2017). High-speed short-reach optical communication systems over single mode fiber [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://repositorio.unam.mx>
- Velásquez, J. (2019). Next generation optical access networks and coexistence with legacy PONs [Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. En TDX (Tesis Doctorals en Xarxa). <https://www.tdx.cat/handle/10803/667428>
- Zapata Yacelga, R. I. (2023). Diseño y simulación de un enlace óptico PAM 8 para conexión de Data Centers en entornos urbanos ultra-densos a 1.6 Tb/s [masterThesis, PUCE - Quito]. <http://repositorio.puce.edu.ec:80/handle/22000/21254>

## ANEXOS

### Anexo I: Código empleado para modulación de intensidad PAM-4

```

%Script para envío de símbolos PAM-4
close all
d=InputPort1.Sequence;

M=4; %Número de niveles
if M==8
    dim=floor(length(d)/3)*3;
    d=d(1:dim);
end
N=length(d);%longitud data

cd 'C:\Users\' %poner aquí el directorio donde está la carpeta "PAM-M-Optisystem"
save SignalTx.mat d -mat

BitsTx=double(d)';
save TX_bits.txt BitsTx -ascii
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);%Modulación PAM-M

if M==4
%-----pre-distorsión para PAM 4-----
    a1(a1==1)=0.3; % predistorsión del nivel 1
    a1(a1==-1)=-1; % predistorsión del nivel -1
%-----
end
nrz=(0.2*rectpulse(d,Ns))';
pam=(0.2*rectpulse(a1,Ns))'; %señal PAM muestreada

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

figure(2)
plot(pam,'r-x')
if M==4
    ylim([-1,1])
else
    ylim([-2,2])
end
title('TX Baudios')
grid on
grid minor

BitRate=InputPort1.BitRate/log2(M);% revisar si se puede borrar
OutputPort1.Sequence=a1;
OutputPort1.BitRate=BitRate;

```

**Anexo II:** Código empleado para demodulación de intensidad PAM-4.

```

M=4; % número de niveles
if M==4
    Ns=8; % número de muestras por baudío para PAM4

else
    Ns=12; % número de muestras por baudío para PAM8
end
%Ns=12; % número de muestras por baudío

SignalRx=InputPort1; % la señal recibida se guarda en la variable SignalRx
%d=InputPort1.Sequence;
cd 'C:\Users\' %poner aquí el directorio donde está la carpeta "PAM-M-Optisystem"
save SignalRx.mat SignalRx -mat
% data=load('SignalRx.mat')
sig=real(SignalRx.Sampled.Signal);
noi=real(SignalRx.Noise.Signal);
B1=sig+noi;

figure(3)
plot(B1,'-x')
grid on
grid minor % %
%-----DIAGRAMA DE OJO----- %
eyediagram(B1(1:floor(length(B1))),Ns*2);
grid on
grid minor
%-----

vect1=[];
PAM=[];
bitsRx=[];

revnivelRX=[];
for t=5:Ns:length(B1)
    %t=11
    if M==8
        % HUMBRALES PARA DECODIFICACIÓN DE LA SEÑAL PAM 8:
        v7 = 5.95e-5;
        v6 = 5e-5;
        v5 = 4.1e-5;
        v4 = 3.2e-5;
        v3 = 2.3e-5;
        v2 = 1.34e-5;
        v1 = 0.4e-5;
    end
end

```

```

elseif M==4
    % HUMBRALES PARA DECODIFICACIÓN DE LA SEÑAL PAM 4 a 100Gbps:
    v3 = 1.75e-5;% v3 = 4.35e-5; % v3 = 5.5e-5;
    v2 = 9.5e-6;%v2 = 2.6e-5; % v2 = 3.3e-5;
    v1 = 3e-6;%v1 = 1e-5;% v1 = 1.25e-5;

    if B1(t) > v3
    % PAM=[PAM 3];
        bitsRx=[bitsRx 1 0];

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

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

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

        end

    end
end

bitsRx=bitsRx';

save RX_bits.txt bitsRx -ascii

bitsTx=load('TX_bits.txt');
bp = 0;
if length(bitsRx)~=length(bitsTx)
    if length(bitsRx)>length(bitsTx)
        bitsRx=bitsRx(1:length(bitsTx));
        save RX_bits_adj.txt bitsRx -ascii
    elseif bp+length(bitsRx)==length(bitsTx)
        bitsTx=bitsTx(bp+1:length(bitsTx));
    else
        bitsTx=bitsTx(bp+1:length(bitsRx)+bp);
    end
end

numerr=biterr(bitsTx,bitsRx);
ber=numerr/length(bitsTx);

save BER.txt ber -ascii

OutputPort1.Sequence=bitsRx';

```