



POSGRADOS

MAESTRÍA EN TELEMÁTICA

RPC-SO-01-NO.025-2021

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE LA TRANSMISIÓN
DE DATOS EN
UNA RED 100 Gb/S DSP-ASSISTED PON

AUTOR(ES)

JUAN CARLOS FRANCO ARELLANO

DIRECTOR:

GERMAN VICENTE ARÉVALO
BERMEO

GUAYAQUIL – ECUADOR
2023



Autor(es):

Juan Carlos Franco Arellano
Ingeniero Sistemas Computacionales
Candidato a Magíster en Telemática por la Universidad Politécnica
Salesiana – Sede Guayaquil.
jfranco@est.ups.edu.ec

Dirigido por:

Germán Vicente Arévalo Bermeo
Ingeniero en Electrónica
Máster en Comunicaciones Ópticas, Doctor en Ingeniería
garevalo@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2023 © Universidad Politécnica Salesiana.

GUAYAQUIL– ECUADOR – SUDAMÉRICA

Juan Carlos Franco Arellano

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE LA TRANSMISION DE DATOS EN UNA RED 100 Gb/s DSP-
ASSISTED PON

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi hijo Bruno que me está bendiciendo desde el cielo, a mis padres por haberme apoyado siempre y a una de las personas más importante de mi vida como es mi esposa Jacqueline que gracias a su gran ayuda y tenacidad he podido culminar esta maestría.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme dado salud y bendecirme en mi carrera universitaria y profesional, a mis padres Cristóbal y Grace por darme un buen ejemplo de responsabilidad y respeto, a mi esposa Jacqueline por haberme impulsado a seguir en esta nueva Carrera de especialización.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| Resumen | 8 |
| Abstract | 9 |
| 1. Introducción | 10 |
| 2. Determinación del Problema..... | 11 |
| 3.1 Justificación:..... | 12 |
| 3.2 Objetivos:..... | 13 |
| 3.2.1 Objetivo general: | 13 |
| 3.2.2 Objetivo específico: | 13 |
| 3. Marco teórico referencial..... | 14 |
| 3.1 Antecedentes | 14 |
| 3.2 Redes ópticas de acceso | 15 |
| 3.2.1 Evolución histórica y estado actual | 15 |
| 3.2.2 Tecnologías y topologías de redes ópticas pasivas (PON)..... | 17 |
| 3.2.3 Procesamiento digital de señales (DSP) en redes ópticas..... | 19 |
| 3.2.4 Uso del DSP en la compensación de las distorsiones ópticas en las redes PON | 20 |
| 3.3 Transmisión de datos en una red 100 Gb/s" | 21 |
| 3.3.1 Estándares de red | 21 |
| 3.3.2 Tecnologías de transmisión | 22 |
| 3.4 Arquitectura convencional y elementos ópticos del transceptor 100GBASE-LR4 | 23 |
| 3.5 Técnicas de procesamiento digital | 24 |
| 3.5.1 MATLAB | 26 |
| 3.5.2 OptSim | 27 |
| 3.5.2 MODULACION PAM-4..... | 28 |
| 4. Materiales y metodología..... | 30 |
| 4.1 Tipo de investigación | 30 |
| 4.2 Sistema de prueba | 30 |
| 4.2.1 Elementos del sistema 100 Gb/s DSP-Assisted PON. | 31 |
| 4.2.2 El simulador numérico empleado..... | 36 |
| 5. Resultados y discusión..... | 38 |

| | |
|----------------------|----|
| 6. Conclusiones..... | 44 |
| Referencias | 45 |

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE LA TRANSMISIÓN DE DATOS EN UNA RED 100 GB/S DSP- ASSISTED PON

AUTOR(ES):

JUAN CARLOS FRANCO

RESUMEN

En la era digital actual, las redes de comunicación y transmisión de datos han experimentado un crecimiento exponencial en términos de capacidad y eficiencia. El acceso a la información y la conectividad son fundamentales para la sociedad y los negocios, lo que hace que la demanda de redes de alta velocidad y rendimiento sea cada vez más crítica. Es por ello que el objetivo fundamental de esta investigación está centrado en estudiar el desempeño de la transmisión de datos en una red 100 Gb/s DSP-Assisted PON. Por la naturaleza del objeto de estudio, el tipo de investigación es exploratorio. Dado que el objetivo general es estudiar el desempeño de la transmisión de datos en una red 100 Gb/s DSP-Assisted PON, la investigación exploratoria permitirá a los investigadores comprender el comportamiento y las características de la red en diferentes condiciones y configuraciones. Así mismo, por el enfoque del proyecto, el tipo de Investigación es cuantitativo, ya que esta se centra en medir y analizar bit error rate, potencia recibida y eficiencia del filtro DSP.

Palabras clave:

Redes ópticas pasivas (PON), Procesamiento digital de señales (DSP), Desempeño, Simulación, Indicadores clave de desempeño (KPIs)

ABSTRACT

In today's digital era, communication and data transmission networks have experienced exponential growth in terms of capacity and efficiency. Access to information and connectivity are critical to society and business, making the demand for high-speed, high-performance networks increasingly critical. That is why the fundamental objective of this research is focused on studying the performance of data transmission in a 100Gb/s DSP-Assisted PON network. Due to the nature of the object of study, the type of research will be exploratory. Since the general objective is to study the performance of data transmission in a 100Gb/s DSP-Assisted PON network, the exploratory research will allow researchers to understand the behavior and characteristics of the network in different conditions and configurations. Likewise, due to the focus of the project, the type of research will be quantitative, since it focuses on measuring and analyzing bit error rate, received power and DSP filter efficiency.

Keywords:

Passive Optical Networks (PON), Digital Signal Processing (DSP), Performance, Simulation, Key Performance Indicators (KPIs)

1. INTRODUCCIÓN

En la era digital actual, las redes de comunicación y transmisión de datos han experimentado un crecimiento exponencial en términos de capacidad y eficiencia. El acceso a la información y la conectividad son fundamentales para la sociedad y los negocios, lo que hace que la demanda de redes de alta velocidad y rendimiento sea cada vez más crítica [1]. En este contexto, las redes ópticas pasivas (PON) han emergido como una solución ideal para afrontar el aumento de la demanda de datos, siendo la tecnología clave en la infraestructura de las redes de banda ancha. El presente estudio se enfoca en el estudio complejo del desempeño de la transmisión de datos en una red de 100 Gb/s DSP-Assisted PON (Digital Signal Processing-Assisted Passive Optical Network)[2].

La adopción de las redes PON ha sido impulsada por su capacidad para ofrecer conexiones de alta capacidad y larga distancia, así como por la eficiencia en el uso del espectro y la reducción de costes en comparación con otras tecnologías. Las PON tradicionales, como las redes GPON (Gigabit Passive Optical Network) y XG-PON (10-Gigabit-capable Passive Optical Network), han sido ampliamente implementadas en todo el mundo, ofreciendo capacidades de hasta 10 Gb/s. No obstante, con la creciente demanda de servicios de banda ancha de alta velocidad, las tecnologías PON actuales están alcanzando sus límites y se requiere una evolución hacia redes de mayor capacidad [3].

En este sentido, la red 100 Gb/s DSP-Assisted PON representa un avance significativo en la tecnología de redes ópticas pasivas, al aumentar la capacidad de transmisión de datos a 100 Gb/s [4]. Esta mejora se logra mediante la incorporación de procesamiento digital de señales (DSP) en la transmisión y recepción de datos. El DSP permite optimizar la transferencia de datos mediante métodos avanzadas de modulación y codificación, lo que aumenta la capacidad de la red y mejora la eficiencia espectral. Además, el DSP también permite una mayor flexibilidad en la configuración de la red y una mejor

adaptación a las condiciones del canal, lo que se traduce en un mejor rendimiento en términos de alcance y capacidad.

Es por ello que el objetivo principal de este estudio es analizar el desempeño de la transmisión de datos en una red 100 Gb/s DSP-Assisted PON, mediante la evaluación de diversos parámetros críticos, como la capacidad de transmisión, la latencia, la eficiencia espectral y la calidad de la señal. Además, se investigarán las implicaciones de la introducción del DSP en la arquitectura de la red y las técnicas utilizadas.

2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

La demanda creciente de servicios de telecomunicaciones, impulsada por el auge de aplicaciones en línea, video streaming y el Internet de las Cosas (IoT), ha llevado a una necesidad de mejorar la capacidad y eficiencia de las redes de transmisión de datos. En este contexto, el estudio del desempeño de la transmisión de datos en una red 100 Gb/s DSP-Assisted PON es altamente relevante, ya que aborda un problema actual y de gran impacto en la industria de las telecomunicaciones.

En este sentido, el problema central del estudio radica en determinar cómo mejorar el desempeño de la transmisión de datos en una red 100 Gb/s DSP-Assisted PON para satisfacer las crecientes demandas de tráfico y garantizar la calidad de servicio a los usuarios. Aunque este problema se plantea de manera clara, es importante que el estudio también considere aspectos específicos, como la relación señal-ruido, la latencia, la tasa de error de bits y la distancia de transmisión, para obtener una visión integral del desempeño de la red. Es por ello que, para el desarrollo de esta investigación se presentan una serie de desafíos como: [5]

- Complejidad técnica: La evaluación del desempeño de una red 100 Gb/s DSP-Assisted PON requiere un alto nivel de conocimiento en óptica, procesamiento digital de señales y tecnologías de red. Esto implica un desafío en la identificación de herramientas y metodologías adecuadas para llevar a cabo el estudio.

- Limitaciones de capacidad y ancho de banda: Una de las preocupaciones principales en la implementación de redes PON de 100 Gb/s con asistencia de DSP es la limitación en la capacidad y el ancho de banda. A medida que aumenta el número de usuarios y la demanda de servicios de alta velocidad, es fundamental garantizar que el sistema pueda soportar estas cargas.

Es por ello que la investigación y desarrollo de redes 100 Gb/s DSP-Assisted PON es crucial debido a la necesidad de aumentar la capacidad de las redes ópticas de acceso para satisfacer la creciente demanda de ancho de banda. Al abordar este problema, se busca mejorar la eficiencia y el desempeño de las redes de comunicaciones, lo que tiene un impacto directo en la calidad de los servicios y aplicaciones en línea, así como en la adopción de tecnologías emergentes.

3.1 JUSTIFICACIÓN:

En la actualidad existe un crecimiento exponencial de ancho de banda por parte de los usuarios, debido a la implementación de sistemas transmisión de tipo streaming de alta y muy alta definición, como televisión digital bajo demanda, juegos en línea, videoconferencias, teletrabajo, telemedicina, etc. También influye la gran cantidad de información que están generando las redes sociales, y las crecientes soluciones de IoT.

Esto exige que los proveedores de servicios manejen redes de acceso y transporte con mayor capacidad para poder cubrir esas necesidades de banda ancha y ultra-ancha. Es en las redes de acceso donde generalmente se generan cuellos de botella, en este sentido las redes PON han cumplido un papel preponderante [6], así mismo las modulaciones complejas han permitido mejorar ciertos requisitos de desempeño, en el presente proyecto se presenta PAM-4 para la transmisión de información, se puede aprovechar su gran ventaja de duplicar la velocidad de transmisión a través de aplicación de un filtro de pre compensación solventando parcialmente esta debilidad de la codificación PAM-4.

Sin embargo, los estándares actualmente desplegados a nivel comercial de forma masiva ofrecen ancho de banda limitado, como GPON (que es la tecnología PON más

implementada en el mundo) cuya capacidad máxima es 2.5Gb/s, de modo que no soportan las capacidades que se requerirán en un futuro cercano. En consecuencia, el estudio de nuevas técnicas de transmisión como las redes PON asistidas por procesamiento digital de señales (DSP-Assisted PON), ya que buscan impulsar redes de acceso óptico de mayor velocidad, sin incurrir en costos demasiado altos. Las técnicas de compensación mediante el procesamiento digital de señales, reducen costos y complejidad. En el procesamiento de señales, el preénfasis es una técnica para defender contra el ruido anticipado, según Torres, 2020 [5] . En este proyecto de tesis se realiza el estudio y análisis a través de simulación una red DSP-Assisted PON, operante a 100 Gb/s, con esta simulación se analizará el desempeño y el costo beneficio de la implementación de esta red, en base a la reutilización de componentes existentes para la viabilidad técnica y económica del proyecto [7].

3.2 OBJETIVOS:

3.2.1 OBJETIVO GENERAL:

Estudiar el desempeño de la transmisión de datos en una red 100 Gb/s DSP-Assisted PON

3.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO:

- Estudiar el estado del arte de las redes DSP-Assisted PON.
- Estudiar y analizar los escenarios apropiados para el estudio y la simulación una red DSP-Assisted PON que sirva como marco de referencia para el análisis de desempeño de estas redes.
- Simular una red 100Gb/s DSP-Assisted PON.
- Analizar los resultados para determinar el desempeño de la red a través de indicadores claves de desempeño (KPIs).

3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 ANTECEDENTES

Las redes DSP-Assisted PON han sido un tópico de interés en tiempos recientes, debido a su capacidad de mejorar el rendimiento de las redes PON actualmente existentes, reutilizando los componentes ya implementados y ahorrando costos.

En el trabajo realizados por los autores Ferrero et al., 2018 [8] demostraron experimentalmente dos variantes de duobinario eléctrico, utilizando ecualización adaptativa para PON de alta velocidad de 25-40Gbps, mostrando la ventaja de diseñar un receptor automático de procesamiento digital de señales (DSP) en el receptor dependiendo del ancho de banda disponible y la dispersión del enlace.

Por su parte Zheng et al., 2019 [7] demostró de manera experimental la transmisión ascendente en modo de ráfaga de alto rendimiento a 25 Gb/s, logrando una rápida sincronización y recuperación de ráfagas dentro de 200ns y una sensibilidad del receptor de registro de -29.8dBm, esto con el fin de mejorar el presupuesto y la rentabilidad del enlace, para esto se utiliza un láser modulado directamente (DML) de alta potencia y bajo costo para la transmisión.

Los autores Chen et al., 2016 [9] realizaron una investigación donde se describe un esquema de transmisión flexible y rentable basado en B-IFDMA para PON de última generación, esto se emplea para habilitar canales de baja complejidad, compensación y asignación de ancho de banda flexible para múltiples servicios, demuestran la transmisión bidireccional de 25Gb/s para verificar su viabilidad de la intensidad óptica modulada.

Así mismo, los autores Steiner y Kramer 2018 [10], muestran la optimización en la asignación de bits de paridad de baja densidad (LDPC), para la corrección de errores en la implementación del estándar IEEE 802.3ca para PON's de 25Gbit/s, 50Gbit/s y 100Gbit/s.

Por otra parte, en el estándar IEEE describe la capa física para redes PON a 25 y 50 Gb/s [10], se amplía el funcionamiento de redes ópticas pasivas de ethernet (EPON) a múltiples canales de 25Gb/s, para funcionamiento tanto de manera simétrica y asimétrica para velocidades de 25/10Gb/s, 25/25Gb/s, 50/10Gb/s, 50/50Gb/s, manteniendo la compatibilidad con versiones anteriores con equipos EPON de 10Gb/s implementados.

Por su parte el autor Knittle 2020 [11], analiza la próxima generación de acceso óptico IEEE de las redes ópticas pasivas Ethernet de 50Gb/s simétricas y asimétricas, en el año 2016 durante la conferencia de comunicaciones de fibra óptica comunicaron los objetivos para la próxima generación de IEEE PON. En el 2017 redujeron el alcance de normalización de 100 Gb/s a 50Gb/s, la motivación de esta reducción giro en torno a la viabilidad técnica y económica.

El aporte del presente trabajo está basado en la aplicación de una técnica de un filtro cero forcing de baja complejidad en el transmisor con el fin de compensar los efectos de dispersión y generar un filtrado de pre emphasis de baja complejidad en consecuencia, de bajo costo que permitiría que sea una solución plenamente factible para las redes de acceso PON actual y de inmediata generación [12].

3.2 REDES ÓPTICAS DE ACCESO

3.2.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y ESTADO ACTUAL

La evolución histórica de las redes ópticas de acceso ha sido marcada por una serie de avances tecnológicos que han permitido mejorar la capacidad, velocidad y eficiencia de las comunicaciones ópticas [13]. A continuación, se presenta un resumen de la evolución y el estado actual de las redes ópticas de acceso:

- Primeras redes ópticas (1970-1980): Los primeros experimentos con redes ópticas se llevaron a cabo en la década de 1970. En esta etapa, la tecnología óptica estaba en sus primeras fases, y las investigaciones se centraron en el desarrollo de fibras ópticas y componentes básicos, como los láseres semiconductores y los detectores de fotones [14].

- Desarrollo de las redes ópticas pasivas (1980-1990): La tecnología de redes ópticas pasivas (PON) comenzó a desarrollarse a finales de los años 80 y principios de los 90. Estas redes se basan en la idea de compartir la infraestructura de fibra óptica entre varios usuarios, reduciendo los costos de implementación y mantenimiento. Las primeras implementaciones de PON utilizaron multiplexación por división de tiempo (TDM-PON), como las redes ATM-PON y las redes Broadband-PON (B-PON) [15].
- Avances en la capacidad y eficiencia de las PON (1990-2000): Durante este período, las redes ópticas pasivas experimentaron un rápido crecimiento y desarrollo. La aparición de la multiplexación por división de longitud de onda (WDM-PON) permitió aumentar la capacidad de las redes PON al transmitir múltiples longitudes de onda en una misma fibra óptica. Además, se desarrollaron nuevos estándares como el Gigabit-PON (G-PON) y el Ethernet-PON (E-PON) que mejoraron la eficiencia y la velocidad de las comunicaciones ópticas [16].
- Consolidación de las redes ópticas pasivas (2000-2010): En esta etapa, las redes PON se convirtieron en la solución predominante para las redes ópticas de acceso, con una adopción masiva en todo el mundo. Se realizaron mejoras en los componentes ópticos y en los protocolos de comunicación, lo que permitió aumentar la capacidad y el alcance de las redes PON. Durante este tiempo, se desarrollaron estándares más avanzados, como el 10-Gigabit-capable PON (XG-PON) y el 10-Gigabit-capable symmetric PON (XGS-PON) [17].

Actualmente, las redes ópticas de acceso siguen evolucionando para enfrentar los desafíos impuestos por la creciente demanda de ancho de banda, la expansión de servicios en línea y la proliferación de dispositivos conectados. Las investigaciones en el campo de las redes PON continúan enfocándose en la mejora de la capacidad, la eficiencia y la flexibilidad de estas redes. Algunas de las tendencias y desarrollos actuales incluyen [18]:

- ✓ 100 Gb/s DSP-Assisted PON: Estas redes representan un avance significativo en la capacidad de transmisión de datos y tienen el potencial de satisfacer la creciente demanda de ancho de banda. La adopción de tecnologías como el DSP permite mejorar la calidad de las señales ópticas y optimizar la transmisión de datos en redes de alta capacidad.
- ✓ Redes PON de próxima generación (NG-PON): Los estándares NG-PON, como el NG-PON2, buscan mejorar aún más la capacidad y la eficiencia de las redes PON. Estas redes combinan la multiplexación por división de tiempo y de longitud de onda para ofrecer una mayor capacidad y flexibilidad en la asignación de recursos.
- ✓ Integración con tecnologías emergentes: Las redes ópticas de acceso también se están adaptando a las necesidades de las tecnologías emergentes, como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA) y la computación en la nube. Estas tecnologías requieren una mayor capacidad de transmisión de datos y menor latencia, lo que impulsa la innovación en el campo de las redes ópticas de acceso [17]

3.2.2 TECNOLOGÍAS Y TOPOLOGÍAS DE REDES ÓPTICAS PASIVAS (PON)

Las redes ópticas pasivas (PON) han sido ampliamente utilizadas en redes de acceso debido a su capacidad para ofrecer conexiones de alta velocidad y menor costo [19]. Existen diferentes tecnologías y topologías de PON, cada una con sus características y ventajas específicas. A continuación, se presentan algunas de las principales tecnologías y topologías de PON:

- PON basadas en multiplexación por división de longitud de onda (WDM-PON)

Las WDM-PON son redes ópticas pasivas que utilizan la multiplexación por división de longitud de onda para transmitir múltiples señales ópticas en diferentes longitudes de onda a través de una única fibra óptica. Esta tecnología permite incrementar la capacidad y la eficiencia de las redes PON al transmitir simultáneamente varias señales en paralelo. Las WDM-PON ofrecen mayor capacidad de transmisión y menor interferencia entre canales que las TDM-PON, pero suelen tener un costo más elevado debido a la necesidad de componentes ópticos más sofisticados y costosos[20].

- PON basadas en multiplexación por división de tiempo (TDM-PON)

Las TDM-PON utilizan la multiplexación por división de tiempo para transmitir múltiples señales ópticas en una única fibra óptica de forma secuencial [21]. Esta tecnología permite compartir la capacidad de la fibra óptica entre varios usuarios, reduciendo los costos de implementación y mantenimiento. Algunos de los estándares más comunes de TDM-PON incluyen:

- ✓ Broadband PON (B-PON): Utiliza el protocolo ATM (Asynchronous Transfer Mode) para transmitir datos en redes ópticas.
- ✓ Gigabit PON (G-PON): Ofrece velocidades de hasta 2,5Gbps en el sentido descendente y 1,25Gbps en el sentido ascendente, utilizando el protocolo GPON Transmission Convergence (GTC).
- ✓ Ethernet PON (E-PON): Utiliza el protocolo Ethernet para transmitir datos en redes ópticas y ofrece velocidades de hasta 1Gbps.
- ✓ 10-Gigabit-capable PON (XG-PON) y 10-Gigabit-capable symmetric PON (XGS-PON): Estas tecnologías ofrecen velocidades de hasta 10Gbps en el sentido descendente y 2,5Gbps en el sentido ascendente (XG-PON) o 10Gbps simétricos (XGS-PON). Ambos estándares son compatibles con las implementaciones anteriores de G-PON y E-PON, permitiendo una transición más sencilla hacia mayores capacidades [21].

- PON basadas en multiplexación por división de frecuencia óptica (OFDM-PON)

Las OFDM-PON son una tecnología emergente que utiliza la multiplexación por división de frecuencia óptica (OFDM) para transmitir datos en redes ópticas pasivas. Esta técnica permite una mayor eficiencia espectral, mejor rendimiento en entornos ruidosos y una mejor adaptabilidad a las condiciones de la red en comparación con las tecnologías PON basadas en TDM o WDM. Al utilizar el procesamiento digital de señales (DSP) en combinación con OFDM, las OFDM-PON tienen el potencial de ofrecer capacidades de transmisión de datos aún mayores y una mejor tolerancia a las distorsiones ópticas [22].

3.2.3 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES (DSP) EN REDES ÓPTICAS

El procesamiento digital de señales (DSP) es una técnica que se utiliza para mejorar la calidad y la eficiencia de las señales ópticas en las redes de comunicaciones. En el contexto de las redes ópticas, el DSP se emplea para compensar las distorsiones y las pérdidas que se producen durante la transmisión de señales ópticas a través de las fibras ópticas. A continuación, se abordan los conceptos básicos y las aplicaciones del DSP en redes ópticas [23].

En este sentido el procesamiento digital de señales implica el uso de algoritmos y técnicas matemáticas para analizar, manipular y mejorar las señales ópticas. El DSP permite convertir las señales ópticas en señales eléctricas digitales, lo que facilita su procesamiento y análisis. Algunas de las principales aplicaciones del DSP en las redes ópticas incluyen:

- ✓ Compensación de la dispersión cromática: La dispersión cromática es una distorsión que ocurre cuando las diferentes longitudes de onda de una señal óptica se propagan a diferentes velocidades en la fibra óptica. El DSP puede utilizarse para compensar estos efectos y mejorar la calidad de la señal óptica.

- ✓ Compensación de la dispersión de polarización: La dispersión de polarización es otro tipo de distorsión que se produce cuando las señales ópticas experimentan diferentes retardos de propagación debido a su estado de polarización. El DSP puede emplearse para detectar y corregir estos efectos, lo que mejora la calidad de la señal.
- ✓ Mitigación del ruido óptico: El ruido óptico, como el ruido de amplificación espontánea (ASE) y el ruido de fase, puede afectar negativamente la calidad de las señales ópticas. El DSP permite identificar y reducir el impacto del ruido óptico en las comunicaciones, lo que resulta en una mayor calidad y capacidad de la señal.
- ✓ Ecuilización adaptativa: La ecualización adaptativa es una técnica que utiliza el DSP para ajustar automáticamente los parámetros de la señal óptica en función de las condiciones de la red y las características de la señal. Esto permite optimizar el rendimiento de la red y adaptarse a las variaciones en la calidad de la señal y las condiciones de propagación [23].

3.2.4 USO DEL DSP EN LA COMPENSACIÓN DE LAS DISTORSIONES ÓPTICAS EN LAS REDES PON

El DSP desempeña un papel crucial en la compensación de las distorsiones ópticas en las redes PON, particularmente en las redes de alta capacidad como las 100 Gb/s DSP-Assisted PON [24]. Al aplicar técnicas de procesamiento de señales en el dominio digital, el DSP puede mejorar la calidad y la eficiencia de las señales ópticas en las redes PON de la siguiente manera:

- ✓ Compensación de la dispersión cromática.
- ✓ Compensación de la dispersión de polarización.
- ✓ Mejora de la tolerancia a las distorsiones ópticas.
- ✓ Aumento del volumen de transmisión de datos.
- ✓ Reducción del ruido óptico y la interferencia entre canales.
- ✓ Adaptabilidad a las condiciones de la red y a las variaciones en la calidad de la señal.

3.3 TRANSMISIÓN DE DATOS EN UNA RED 100 GB/S"

La transmisión de datos a alta velocidad es esencial en la era actual de la información, donde la demanda de ancho de banda sigue creciendo debido al aumento del tráfico de datos y las aplicaciones en tiempo real. Las redes de 100 Gb/s (gigabits por segundo) han surgido como una solución para satisfacer estas necesidades [25].

3.3.1 ESTÁNDARES DE RED

El estándar IEEE 802.3ba es una extensión del estándar Ethernet que define las especificaciones técnicas para las redes de 40 y 100 Gb/s. Establece las velocidades de transmisión, los medios físicos y las distancias de enlace para garantizar la interoperabilidad entre los dispositivos de red. Las especificaciones incluyen distintas variantes, como 100GBASE-LR4 (fibra óptica monomodo para distancias de hasta 10 km) y 100GBASE-SR10 (fibra óptica multimodo para distancias de hasta 100 metros) [23].

Tabla 1 Especificaciones de diferentes transceptores 40 y 100 GbE, del estándar IEEE 802.3ba.

| Medio físico | 40 GbE | 100 GbE |
|--|--|--|
| Fibra óptica MMF OM3 ($\lambda = 850$ nm) 100 m | 40GBase-SR4 Emplea 4 fibras OM3 paralelas en cada dirección. Cada una soporta 10Gbps (con la codificación 64B/66B, resulta en una velocidad de línea de 10.3125Gbps) | 100GBase-SR10 Emplea 10 fibras OM3 paralelas en cada dirección. Cada una soporta 10Gbps (con la codificación 64B/66B, resulta en una velocidad de línea de 10.3125Gbps) |
| Fibra óptica SMF ($\lambda = 1310$ nm) 10 km | 40GBase-LR4 Emplea una fibra SMF en cada dirección. Cada una soporta CWDM con $\lambda = 1270, 1290, 1310$ y 1330 nm (basado en el grid ITU-T G.694.2). Cada λ soporta 10Gbps (con una codificación 64B/66B, resulta en una velocidad de línea de 10.3125Gbps) | 100GBase-LR4 Emplea una fibra SMF en cada dirección. Cada una soporta DWDM con $\lambda = 1295, 1300, 1305$ y 1310 nm (basado en el grid ITU-T G.694.1). Cada λ soporta 25Gbps (con la codificación 64B/66B, resulta en una velocidad de línea 28.78125Gbps) |
| Fibra óptica SMF ($\lambda = 1310$ nm) 40 km | No aplica | 100GBase-ER4 Sigue los mismos principios indicados para 100GBase-LR4. Para alcanzar 40 km se emplea tecnología SOA (Semiconductor Optical Amplifier) |

3.3.2 TECNOLOGÍAS DE TRANSMISIÓN

1. WDM (Wavelength Division Multiplexing) es una técnica que permite aumentar la capacidad de transmisión de las fibras ópticas al combinar múltiples señales ópticas en diferentes longitudes de onda. WDM se divide en dos categorías: CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) y DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). DWDM permite un mayor número de canales y longitudes de onda más cercanas, lo que resulta en una mayor capacidad y eficiencia espectral [26].
2. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) es una técnica de modulación que permite una alta eficiencia espectral y una mayor resistencia a la dispersión y las interferencias. OFDM divide el espectro en subportadoras ortogonales, lo que reduce la interferencia entre símbolos y canales adyacentes. Esta técnica es especialmente útil en entornos donde la transmisión de la señal es desfavorable, como en redes de fibra óptica de larga distancia [27].
3. La modulación de amplitud y fase, como QAM (Quadrature Amplitude Modulation) y PSK (Phase Shift Keying), permite transmitir más bits de información por símbolo, lo que aumenta la velocidad de transmisión de datos. La modulación QAM combina dos modulaciones de amplitud en cuadratura, lo que permite transmitir múltiples bits de información en un único símbolo. PSK modula la fase de la portadora para transmitir información, lo que resulta en una mayor eficiencia espectral en comparación con las modulaciones de amplitud [28].

- **Transceptores ópticos**

Los transceptores ópticos son dispositivos que convierten las señales eléctricas en señales ópticas y viceversa, lo que permite la transmisión de datos a través de fibra óptica. El transceptor óptico 100 GBASE-LR4 es un ejemplo de dispositivo que utiliza fibra óptica monomodo para transmitir datos a velocidades de 100 Gb/s en distancias de hasta 10 km. Los transceptores ópticos varían según el tipo de fibra óptica, la distancia de enlace y las características del canal, y pueden emplear tecnologías como WDM y OFDM para aumentar la capacidad y la eficiencia espectral [29].

- **Arquitecturas de red**

Las arquitecturas de red determinan el rendimiento, la confiabilidad y la escalabilidad de las redes de 100 Gb/s. Algunas arquitecturas comunes incluyen redes de área local (LAN), que interconectan dispositivos dentro de un área geográfica limitada; redes de área amplia (WAN), que conectan dispositivos en áreas geográficas más amplias; y redes ópticas de transporte (OTN), que proporcionan una infraestructura de red de alta capacidad y larga distancia para la transmisión de datos. Estas arquitecturas pueden emplear topologías de malla, anillo o estrella, entre otras, y utilizan protocolos de enrutamiento y conmutación, como OSPF (Open Shortest Path First) y BGP (Border Gateway Protocol), para gestionar el tráfico de datos y garantizar una entrega eficiente y confiable de la información [30].

3.4 ARQUITECTURA CONVENCIONAL Y ELEMENTOS ÓPTICOS DEL TRANSCEPTOR 100GBASE-LR4

El transceptor 100 GBASE-LR4 tiene un alcance de 10 km y emplea tecnología WDM para transmitir cuatro canales multiplexados a través de fibra monomodo con longitudes de onda de 1295, 1300, 1305 y 1310 nm. Se eligió la banda O porque la fibra óptica monomodo convencional muestra inferior dispersión cromática versus la banda C, lo que impide la necesidad de equipos compensadores de dispersión. No obstante, refleja un aumento de atenuación en la fibra.

Los medios funcionan a una celeridad de 25.78125Gbps y requiere emplear una configuración en banda base sin retorno a-cero (NRZ) y transformación digital on/off (OOK) con codificación 64B/66B. Esta configuración agrega 2 bits por cada octeto de bytes, lo que aumenta la localización de fallos en la transmisión. El emisor utiliza láseres de realimentación distribuida (DFB) modulados externamente mediante electro-absorción (EAM). En este escenario también se aprecia que el receptor capta la señal óptica utilizando un fotodetector tipo PIN. El dispositivo 100GBASE-ER4 (alcance

extendido) tienen igualdad de detalles técnicos y componentes, pero incluye un preamplificador óptico de semiconductor (SOA) para conseguir una distancia de hasta 40 km [30].

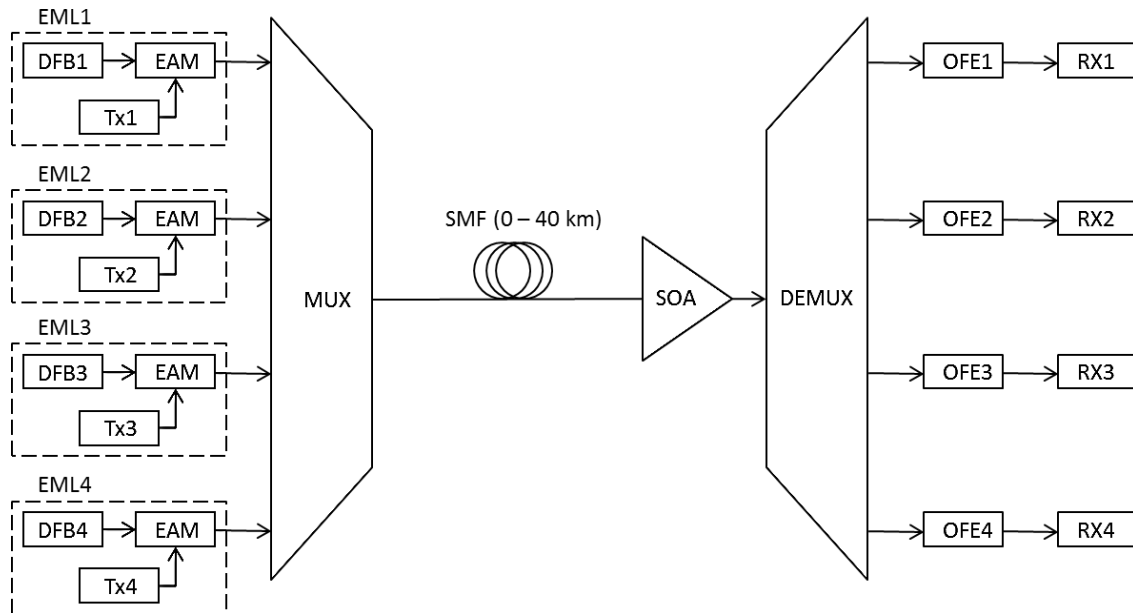


Figura 1 Diagrama del transceptor 100 GBASE-ER4.[30]

El láser DFB y el modulador de electro-absorción se combinan en una sola interfaz conocida como láser modulado externamente (EML). Los cuatro medios se multiplexan en la fibra óptica y se demultiplexan al final de esta, distribuyendo los medios a su adecuado receptor óptico (OFE). De la misma manera se mencionó en las familias de dispositivos ópticos de 100 GbE, a veces no se cumplen las especificaciones de 100 GbE debido a limitaciones tecnológicas. Esta situación lleva a que las empresas no sigan las especificaciones y desarrollen dispositivos con arquitecturas propias.

3.5 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DIGITAL

El procesamiento digital de señales (DSP) involucra el uso de técnicas matemáticas y algoritmos para manipular y analizar señales digitales [31]. Aquí hay algunas técnicas comunes de procesamiento digital de señales:

- **Filtrado:** El filtrado es una técnica que se utiliza para eliminar o atenuar componentes no deseados de una señal, como el ruido o interferencias. Existen diferentes tipos de filtros, como filtros de paso bajo, paso alto, paso de banda y de rechazo de banda.
- **Transformada de Fourier:** La transformada de Fourier es una técnica matemática que permite descomponer una señal en sus componentes de frecuencia. La transformada rápida de Fourier (FFT) es un algoritmo eficiente para calcular la transformada de Fourier discreta (DFT) de una secuencia.
- **Muestreo y cuantificación:** El muestreo es el proceso de transformar una onda analógica en una onda digital mediante la toma de muestras en intervalos regulares de tiempo. La cuantificación es el proceso de asignar un valor discreto a cada muestra, generalmente mediante la aproximación a un nivel de cuantificación predefinido.
- **Modulación y demodulación:** La modulación es el proceso de codificar información en una señal portadora, mientras que la demodulación es el proceso de recuperar la información original a partir de la señal modulada. Algunos ejemplos de técnicas de modulación digital incluyen la modulación por desplazamiento de fase (PSK), la modulación por desplazamiento de amplitud (ASK) y la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK), modulación por amplitud de pulso (PAM-M).
- **Detección y corrección de errores:** Estas técnicas se utilizan para identificar y corregir errores que pueden ocurrir durante la transmisión o almacenamiento de datos, algunos ejemplos de esto incluyen códigos de paridad, códigos de Hamming y códigos de corrección de errores hacia adelante (FEC).
- **Ecuación adaptativa:** La ecualización adaptativa es una técnica utilizada para compensar la distorsión y las interferencias en una señal de comunicación, ajustando dinámicamente los coeficientes del ecualizador para optimizar el rendimiento del sistema [31].

- Preénfasis: En el procesamiento de señales, el preénfasis es una técnica para defender contra el ruido anticipado. La idea es aumentar el rango de frecuencia más susceptible al ruido de antemano, de modo que después de un proceso ruidoso, se pueda recuperar más información de ese rango de frecuencia. La eliminación de la distorsión causada por el pre-énfasis se denomina de-énfasis, lo que hace que la salida reproduzca con precisión la entrada original [32].

3.5.1 MATLAB

Es un entorno de programación y cálculo numérico desarrollado por MathWorks. Es una herramienta poderosa y versátil ampliamente utilizada en diversas áreas de la ingeniería, ciencias aplicadas, finanzas y otros campos. MATLAB es especialmente útil para el análisis y la manipulación de datos, la visualización, la resolución de problemas matemáticos y la implementación de algoritmos [33].

Algunas características clave de MATLAB incluyen:

- ✓ Lenguaje de programación de alto nivel: MATLAB ofrece un lenguaje de programación fácil de aprender y de alto nivel que permite a los usuarios desarrollar rápidamente programas y aplicaciones.
- ✓ Funciones matemáticas y de análisis de datos: MATLAB incluye una amplia biblioteca de funciones matemáticas y de análisis de datos, que permiten realizar cálculos y análisis complejos con facilidad.
- ✓ Herramientas de visualización: MATLAB ofrece una amplia variedad de herramientas de visualización de datos, como gráficos 2D y 3D, imágenes y animaciones, lo que facilita la exploración y la interpretación de los resultados.
- ✓ Soporte para el desarrollo de algoritmos: MATLAB proporciona un entorno integrado para el diseño, desarrollo, prueba y depuración de algoritmos, lo que facilita la implementación de soluciones personalizadas.
- ✓ Compatibilidad con hardware y otros lenguajes de programación: MATLAB es compatible con una amplia gama de hardware, como tarjetas gráficas y dispositivos de adquisición de datos, y puede interactuar con otros lenguajes de programación como C, C++, Python y Java.

- ✓ Toolboxes y complementos: MATLAB ofrece una serie de toolboxes y complementos especializados que amplían sus capacidades en áreas específicas, como procesamiento de señales, comunicaciones, optimización y control, aprendizaje automático y más.
- ✓ En el contexto de las redes ópticas y DSP-Assisted PON, MATLAB puede ser utilizado para simular y analizar el comportamiento de los sistemas, desarrollar y probar algoritmos de procesamiento digital de señales, y visualizar los resultados de las simulaciones. La combinación de las herramientas de MATLAB y sus capacidades de programación permite a los investigadores e ingenieros explorar y mejorar el diseño y el desempeño de las redes ópticas de manera efectiva y eficiente [33].

3.5.2 OPTSIM

Es un software de simulación de sistemas ópticos desarrollado por RSoft Design Group (ahora parte de Synopsys). Es una herramienta de diseño y análisis que se utiliza ampliamente en la industria y la investigación para simular y optimizar la transmisión de señales ópticas en sistemas de comunicaciones ópticas, como redes de área local (LAN), redes de área amplia (WAN), y redes ópticas pasivas (PON), incluidas las redes DSP-Assisted PON vv [34].

OptSim proporciona un entorno de simulación y modelado para el análisis de sistemas ópticos que abarca desde el nivel cero hasta el nivel de enlace. Algunas de sus características clave incluyen:

- Modelado de componentes ópticos y electrónicos: OptSim permite a los usuarios modelar una amplia gama de componentes ópticos y electrónicos, como láseres, moduladores, amplificadores, receptores y dispositivos de procesamiento de señales.
- Modelado de sistemas de comunicaciones ópticas: OptSim admite modelado de sistemas de comunicaciones ópticas de alta velocidad, incluyendo sistemas WDM (Wavelength Division Multiplexing), DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), y sistemas coherentes.

- Simulación de propagación de señales y ruido: OptSim puede simular la propagación de señales y ruido en sistemas ópticos, incluyendo efectos de dispersión, atenuación, interferencia y no linealidades ópticas.
- Análisis de rendimiento y optimización: OptSim permite a los usuarios analizar y optimizar el rendimiento de los sistemas ópticos, evaluando métricas como la tasa de error de bits (BER), la relación señal-ruido óptica (OSNR) y la potencia óptica.
- Interfaz gráfica de usuario (GUI) e integración con otros softwares: OptSim proporciona una interfaz gráfica de usuario fácil de usar para diseñar y configurar sistemas ópticos, y puede integrarse con otros softwares como MATLAB para realizar análisis y procesamiento adicionales de datos.
- Para evaluar y mejorar el desempeño de una red DSP-Assisted PON, los usuarios pueden utilizar OptSim para modelar y simular el comportamiento de la red en diferentes condiciones, identificar áreas de mejora y probar nuevas técnicas de procesamiento digital de señales y diseño de sistemas ópticos [35].

3.5.2 MODULACION PAM-4

En este artículo proponemos un nuevo método para generar modulación de amplitud de pulso de radiofrecuencia (RF) con señales de cuatro niveles de amplitud (PAM4). Este método es rentable sin el uso de costosos convertidores de digital a analógico (DAC). Usando una polarización modulador multiplexor que integra dos polarizaciones moduladoras de intensidad ortogonales, las dos polarizaciones los moduladores de intensidad ortogonales son impulsados por dos niveles de señales de RF, respectivamente. Luego, al conectar en cascada una polarización controladora (PC) y un polarizador, señales ópticas RF PAM4 se puede generar. Con base en nuestro esquema propuesto, demostrar experimentalmente la generación de RF PAM4 señal a 9.07GHz. Nuestros resultados experimentales muestran que las señales RF PAM4 no tienen un deterioro evidente después transmisión de más de 80 km de fibra monomodo (SMF) [36].

Modulación de amplitud de pulso con cuatro niveles de amplitud (PAM4) el formato de modulación no requiere conversión ascendente ni conversión descendente, y el método de demodulación es simple. De esto perspectiva, las señales PAM4 son más adecuadas para los sistemas ROF, se puede utilizar para disminuir la velocidad de transmisión en la fibra óptica y componentes eléctricos, también es utilidad para extender la transmisión y distancia en el sistema de comunicación óptica [36].

Diagrama esquemático del método de generación de PAM4 en sistema ROF utilizando modulador de multiplexación de polarización. Un oscilador local (LO) generan una sinusoidal eléctrica como portadora óptica con frecuencia en f_c . La señal RF de formato OOK generada y la señal LO se mezclan y luego se dividen en dos partes, como datos 1 y datos 2. [36].

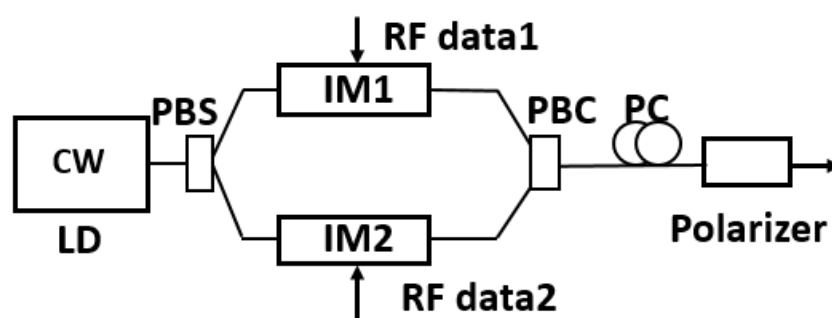


Figura 2a. Modulo generador PAM-4 [36]

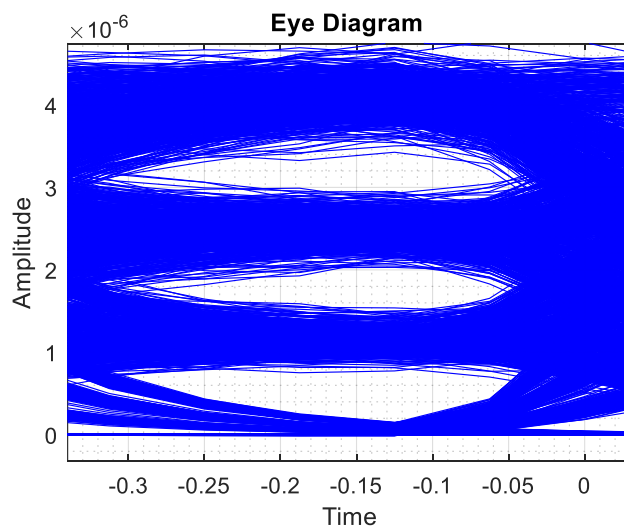


Figura 2b. Diagrama de ojo PAM-4

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Por la naturaleza del objeto de estudio, el tipo de investigación será exploratorio, dado que el objetivo general es estudiar el desempeño de la transmisión de datos en una red 100 Gb/s DSP-Assisted PON, la investigación exploratoria permitirá a los investigadores comprender el comportamiento y las características de la red en diferentes condiciones y configuraciones. Así mismo, se podrán identificar áreas de mejora en el diseño y la implementación de la red, así como oportunidades para aplicar técnicas avanzadas de procesamiento digital de señales y optimización de sistemas ópticos.

Por el enfoque del proyecto, el tipo de Investigación será cuantitativa, ya que esta se centra en medir y analizar variables numéricas. En el caso del estudio del desempeño de la transmisión de datos en una red 100 Gb/s DSP-Assisted PON, los investigadores medirán variables clave como la tasa de error de bits (BER), la potencia de recepción a distintas atenuaciones en un rango de 15 a 21 dB.

La investigación cuantitativa implica el uso de herramientas y técnicas estadísticas para analizar los datos recopilados. En este caso, se emplearán análisis de regresión, pruebas de hipótesis y otros métodos estadísticos para evaluar el desempeño de la red y determinar las relaciones entre las variables.

4.2 SISTEMA DE PRUEBA

La estructura del sistema 100 Gb/s DSP-Assisted PON en estudio, que se compone de: emisor eléctrico, emisor óptico, fibra óptica, receptor óptico y receptor eléctrico. Se detallan los componentes y parámetros de cada bloque. Se hace una breve descripción del software utilizado para simular el sistema en cuestión, a través de una ejecución paralela llevada a cabo en los programas OptSim y Matlab. También se exponen las variables establecidas en la ejecución paralela.

A partir de la ejecución del escenario de estudio, se presentan gráficas donde su parámetro en el eje de las abscisas es la potencia recibida (dBm) y en las ordenadas el BER, considerando que por la cantidad de datos enviados, su rango aceptable mínimo será entre 10^{-3} y máximo 10^{-6} , dada por la siguiente expresión:

$$BER = \frac{\text{bits erróneos}}{\text{bits enviados}}$$

Lo cual, para la presente investigación el máximo *bit error rate* (BER) se calculará enviando 106494 bits, suponiendo un solo bit de error que da $BER_{m\acute{a}x} = 9,39 \times 10^{-6}$.

4.2.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA 100 GB/S DSP-ASSISTED PON.

El sistema empleado en esta prueba es un sistema electro-óptico 100 Gb/s DSP-Assisted PON, que simula un canal de 20km y transfiere en SMF en la banda C. La Figura 3 muestra un diagrama de bloques del sistema. En primer lugar, se encuentra el transmisor eléctrico (CCM1) que corresponde a la co-simulación de Matlab, en el primer escenario se genera una secuencia de bits, los cuales se codifican en formato PAM-4, en el segundo escenario a esta secuencia de bits codificada se aplicará un filtro *pre-emphasis*. Para la modulación óptica en intensidad (loadmod1) por un lado se tiene la señal eléctrica (CCM1) y por otro, se añadirá un láser de onda continua (laslor1), seguido por una fibra SMF que trabaja a 1550 nm y posee una distancia de 20km. La señal óptica ingresa a un compensador de dispersión (grating_ideal1), al cual se conecta un bloque de atenuación (oatten1) para finalmente, convertir la potencia óptica en fotocorriente mediante un fotodiodo tipo PIN. La representación de los bits obtenidos, ingresan en un bloque conocido como receptor eléctrico (CCM2) donde se realizan las operaciones inversas del transmisor.

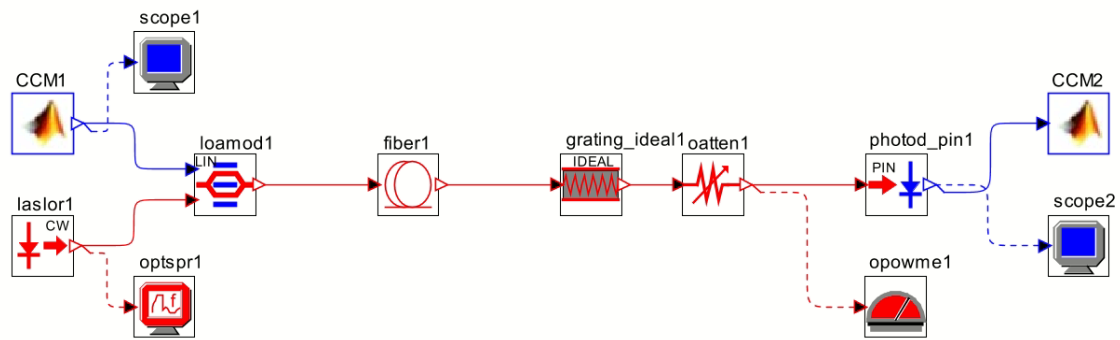


Figura 3 Diagrama de bloques del sistema bajo prueba.

✓ Transmisor eléctrico

En la figura 4 se puede observar el bloque de simulación con Matlab (CCM1), en la programación de este medio se emplea un proceso pseudo-aleatorio de bits (PRBS) de 106494 como fuente de información binaria. Esta secuencia se codifica con modulación PAM-4, donde se utiliza 4 niveles de señal para la transmisión; En la simulación, la señal pseudo-aleatoria se clasificarán en 4 niveles lógicos (-3, -1, 1, 3) donde cada periodo de símbolo representa dos bits de información (00, 01, 10, 11). En el primer escenario se aplica la modulación PAM-4 junto con pre-distorsión de los niveles intermedios, en el segundo escenario la misma modulación es aplicada sin embargo se añade un filtro de pre-énfasis digital de un polo/un cero (one pole – one zero). Al transmitir dos bits por símbolo, PAM-4 reduce a la mitad la velocidad de la señal, lo cual para la presente investigación daría un aproximado de 2 x 50Gbps, lo cual duplica de forma efectiva la velocidad de datos dentro de una red PON, siendo útil para transmisiones de corta y larga distancia.

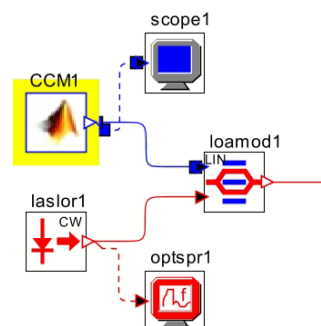


Figura 4 Bloque del transmisor eléctrico

✓ Transmisor óptico

En el transmisor óptico, se utiliza un láser de onda continua simplificada (CW) como se observa en la figura 5, el láser de onda continua convierte la potencia de bombeo de entrada con baja coherencia en una señal de salida óptica altamente coherente que es constante en amplitud y longitud de onda, limitada solo por las pérdidas de cavidad óptica, para considerar el ruido de fase se genera una forma de línea conocida como emisión de Lorentz cuyo ancho de línea completo a la mitad del máximo (FWHM) se especifica por los parámetros que se encuentran en la tabla. Esta estructura opera en un rango de 193.41447 - 193.41467 THz, con un ancho de línea de 10 MHz. La potencia manejada por el láser es del orden de unidades de miliWatts y la longitud de onda de operación es de 1550 nm (193.55 THz).

Tabla 2: Parámetros de transmisor óptico.

| Parámetro | Valor | Unidad |
|---|-----------|--------|
| Global | | |
| Frecuencia Central | 193.41457 | THz |
| Potencia láser | 8 | dBm |
| Longitud de onda de emisión central (operación) | 1550 | nm |
| Ancho de línea | 10 | MHz |

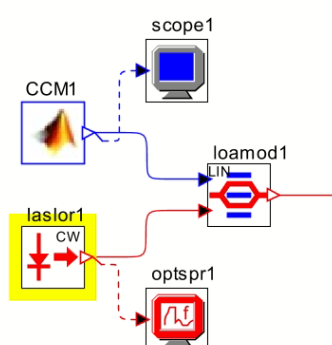


Figura 5 Bloque de Láser

✓ Fibra óptica

Después de que la señal eléctrica PAM-4 se modula ópticamente, se transmite a través de una fibra óptica monomodo convencional (SMF) como se observa en el diagrama de simulación de la figura 6. Las características de esta fibra como se observa en la tabla a continuación, operaran a una longitud de onda de 1550 nm, incluyen un coeficiente de atenuación de 0.2 dB/km, dispersión cromática de -17 ps/(nm·km), pendiente de dispersión de 0.07 ps/(nm²·km), $A_{eff} = 80$ pm², dispersión por modo de polarización (PMD) de 0.1 ps/ \sqrt{km} , el índice de no linealidad de 1.26677 W/km. Estos parámetros se seleccionaron según las recomendaciones de la ITU-T G.652.

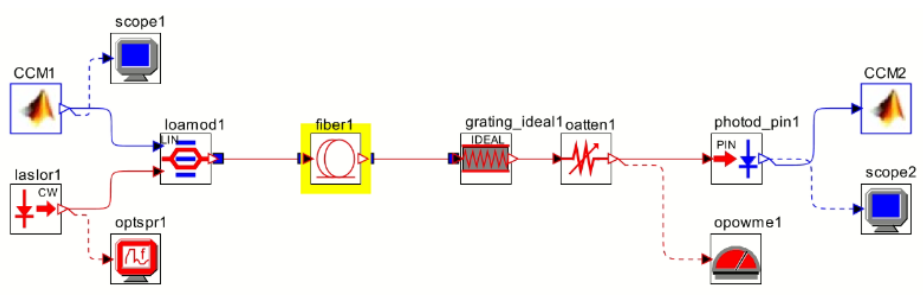


Figura 6 Bloque de canal fibra óptica 20Km

Tabla 3: Parámetro de la fibra óptica.

| Parámetro | Valor | Unidad |
|-------------------------------|----------------------|-----------------|
| Global | | |
| Distancia | 20 | Km |
| Pérdidas | | |
| Longitud de onda de operación | 1550 | nm |
| Pérdidas | 0.2 | dB/Km |
| Dispersión | | |
| Dispersión | 17 | ps/nm · Km |
| Efectos avanzados | | |
| Coefficiente de no linealidad | 1.26677 | 1/W /km |
| Índice de refracción | $2.5 \cdot 10^{-20}$ | |
| Área efectiva del núcleo | $80 \cdot 10^{-12}$ | m ² |
| PMD | 0,1 | ps/ \sqrt{km} |

Para imitar los resultados experimentados por los pulsos ópticos al transmitirse a través de la fibra óptica, el programa empleado muestra la ecuación no lineal de Schrödinger de la fibra óptica mediante el método de Fourier de paso dividido simétrico. Este enfoque reconoce que la difusión del campo óptico sobre una menor distancia h , la dispersión y los resultados no lineales podrían ejecutarse de forma independiente, por ende, se resuelve el término dispersivo y el no lineal de forma separada mediante un algoritmo iterativo. La fórmula de propagación de un pulso en la fibra está definida por la función $A(z, T)$, donde z representa la distancia y T el ancho temporal del pulso [10].

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

- Dispersión
- Pérdidas (atenuación)
- Efecto Kerr (no linealidades)

✓ Receptor óptico

Luego de que la señal óptica se transmitió a lo largo de 20 km de fibra óptica, se emplea un compensador de dispersión con un valor de -340 ps/nm para cancelar la dispersión cromática seteada en $17 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ de algunos elementos ópticos, seguido la señal óptica atraviesa un bloque de atenuación que operara en un rango entre 15 y 20 dB. La forma de la señal óptica se detecta directamente utilizando un fotodiodo PIN comercialmente disponible con un ancho de banda de 75GHz, una responsividad de 0.8751 A/W y una corriente oscura de 0.1nA, este elemento convierte la señal óptica en eléctrica. Los bloques anteriormente mencionados se pueden observar en la figura 7.

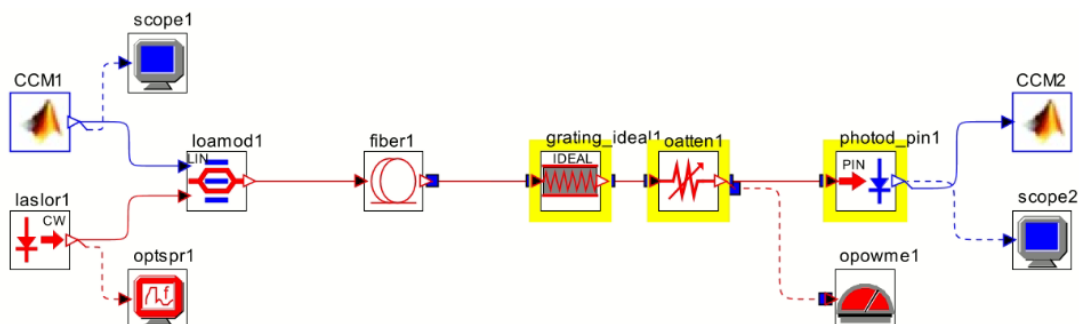


Figura 7 Bloque Receptor Óptico

✓ Receptor eléctrico

En el receptor eléctrico se llevan a cabo operaciones inversas a las del transmisor eléctrico en una secuencia opuesta, como se observa en la figura 8. En primer lugar, se selecciona la muestra de inicio de los datos de recepción, se ha programado el código para la obtención del diagrama del ojo para determinar los umbrales de clasificador de PAM-4. Finalmente, los datos recibidos son comparados con los datos enviados para el cálculo del BER.

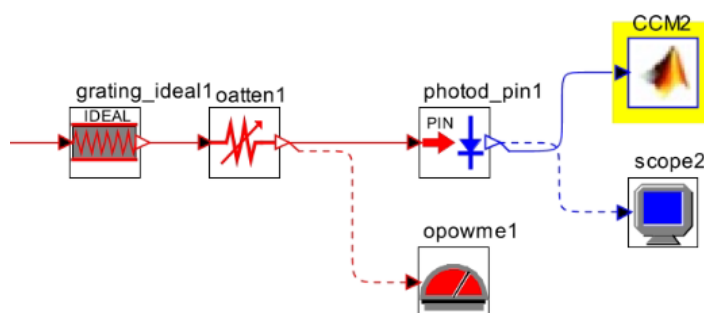


Figura 8 Bloque del receptor eléctrico

4.2.2 EL SIMULADOR NUMÉRICO EMPLEADO

En la simulación del sistema bajo prueba, se utilizaron dos programas: Matlab y OptSim. Matlab es un programa dedicado a solucionar problemas científicos y de ingeniería, se utilizó para simular el transmisor y receptor eléctricos, donde se produce y recibe la señal PAM-4. En Matlab se ejecuta el procesamiento de la señal, incluyendo la inserción del filtro pre-énfasis para mejorar el desempeño del sistema de comunicación óptica (PON). Por otro lado, OptSim es un software utilizado para plantear nuevos sistemas fotónicos y subsistemas para sistemas de transmisión ópticos de acceso, metro y larga distancia. En el caso del sistema bajo prueba, se utilizó OptSim para simular el transmisor, la fibra y el receptor ópticos a través de la unión de módulos ópticos como láser de onda continua (CW), modulador óptico en intensidad, fibra óptica monomodo (SMF), compensador de dispersión (grating_ideal1), bloque atenuador (oatten1) y fotodiodo (PIN). Cada módulo resuelve la ecuación de transferencia para el campo óptico de entrada, los parámetros de co-simulación del sistema se observan en la tabla 4.

Dado que Matlab puede trabajar en co-simulación con otro software, se integró con OptSim, mediante la utilización del bloque CCM1 y CCM2 como lo muestra la figura 3. Esta combinación de programas permitió llevar a cabo la simulación del sistema de manera eficiente y precisa, aprovechando las fortalezas de cada uno para lograr un resultado óptimo en el análisis del sistema comunicación óptico (PON).

Tabla 4 Parámetros de co-simulación.

| Parámetro | Valor | Unidad |
|---|--------------|---------------|
| Global | | |
| Tasa de datos | 100E9 | bits/s |
| Numero de bits pseudo-aleatorios | 106494 | Bits |
| Ancho de banda de la simulación | 200 | GHz |
| Transmisor | | |
| Potencia del láser | 8 | dBm |
| Frecuencia del láser | 193.41457 | THz |
| Ancho de línea del láser | 10 | MHz |
| Frecuencia 1 del filtro pre-emphasis | 19 | GHz |
| Frecuencia 3 dB del filtro pre-emphasis | 3.5 | |
| Bit rate | 50 | Gbits/s |
| Baud rate | 25 | Gbauds |
| Symbols rate | 12.5 | |
| Periodo de Símbolo | 8e-11 | seg |
| Periodo de Muestreo | 5e12 | seg |
| Receptor óptico | | |
| Compensador | -340 | ps/nm |
| Atenuador | [15-21] | dB |

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Escenario 1:

Para la simulación del esquema propuesto se usa una máquina virtual de altas prestaciones con la ayuda de OptSim, se implementa la simulación del enlace óptico básico para trabajar a una velocidad de transmisión de 100GHz/s. En este escenario se realiza la modulación PAM-4 conjuntamente con pre-distorsión en los niveles intermedios. La pre-distorsión se aplica a la amplitud de la señal de transmisión, que consiste en mejorar la linealidad de su potencia.

Se realiza varios experimentos: la revisión del diagrama del ojo a un time spam total simulado es de 88ns y a distintas atenuaciones en un rango entre 15 y 21 dB, con estas simulaciones se determinan los umbrales que ayudan en la clasificación de los bits recibidos en modulación PAM-4, con el fin de determinar los bit erróneos mediante la técnica bit error rate, que relaciona los bits erróneos con los bits enviados, se realizaron distintas simulaciones en un time spam simulado 886ns (full spam), fue necesario observar en la simulación el bloque de power meter para cada una de la iteraciones y así obtener las gráficas de BER vs Potencia de recepción, en la tabla a continuación se observan los valores de bit error rate para distintas atenuaciones mediante la selección empírica de los umbrales.

Tabla 5 Valores de umbral y potencia para distintas atenuaciones

| VALORES DE UMBRAL Y POTENCIA PAM 4 | | | | | | |
|------------------------------------|-------------|----------------|-------------|----------|----------|----------|
| Atenuacion (db) | Tiempo (ns) | Potencia (dBm) | BER (10e-x) | v3 | v2 | v1 |
| 15 | 886 | -26,50 | 0 | 3,20E-06 | 1,75E-06 | 5,00E-07 |
| 16 | 886 | -27,51 | 1,88E-05 | 2,55E-06 | 1.4E-6 | 2.5E-7 |
| 17 | 886 | -28,52 | 2,53E-04 | 2,00E-06 | 1,15E-06 | 3,00E-07 |
| 18 | 886 | -29,50 | 4,98E-04 | 1,58E-06 | 8,60E-07 | 2,50E-07 |
| 19 | 886 | -30,51 | 1,31E-03 | 1,28E-06 | 6,67E-07 | 1,80E-07 |
| 20 | 886 | -31,86 | 1,47E-03 | 9,20E-07 | 4,60E-07 | 9,00E-08 |

Los umbrales de la tabla 5 fueron hallados mediante la simulación del diagrama del ojo, donde se seleccionó 3 umbrales, el umbral inferior V1 para una atenuación de 17dB es $3.0e-07$, el umbral central V2 es $1.15e-06$ como se observa en la figura 9, finalmente el umbral superior V3 es $2.53e-04$.

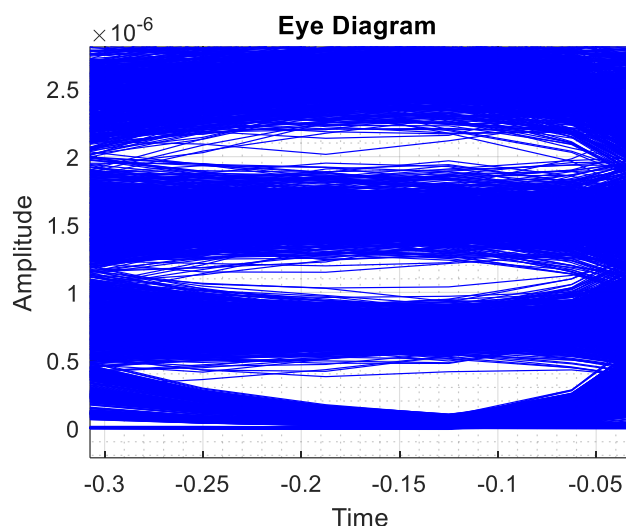


Figura 9 Diagrama de ojo con atenuación 17dB

Los resultados obtenidos que se observa en la figura 10 muestran una mejora progresiva del desempeño en el escenario 1. El aumento de la tasa de transferencia de datos muestra una notable mejora en el desempeño del enlace utilizando pre distorsión, alcanzando bit error rate cercano a 0, utilizando una atenuación de 17dB, se obtiene una potencia de recepción de -28.52dBm, bajos los umbrales obtenidos en la atenuación antes dicha el BER correspondiente es de $2.53e-04$. En el presente escenario el BER mínimo aceptable es de $1.31e-03$ que corresponde a la atenuación 19dB donde se obtuvo -30.51 dBm de potencia en recepción.

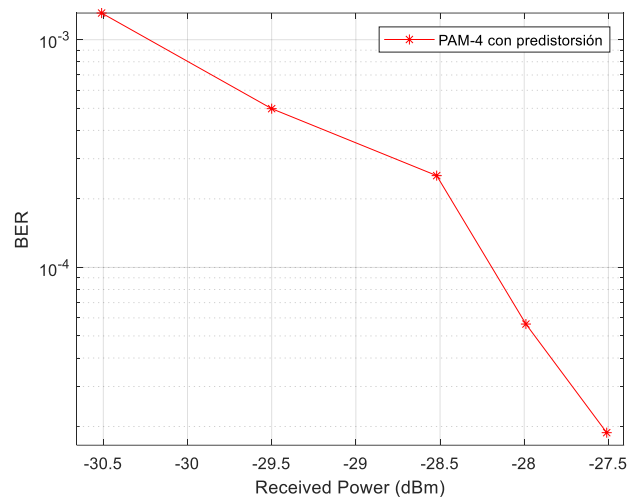


Figura 10 Curva de PAM-4 con predistorsión

Escenario 2:

La simulación del enlace óptico en esta ocasión presenta un filtrado en transmisión. Este filtro es denominado de un polo/un cero que se compone de un filtro pasabajo inverso de un polo con una frecuencia de corte a 3dB ($Fp1$), en cascada con un filtro pasabajo de un polo con una frecuencia de corte a 3dB conocida ($Fp2$) y dependiente de una constante (k), donde $Fp2 > Fp1$. Para obtener la curva de desempeño de BER vs Potencia en recepción se realizan varias simulaciones en cada uno de los escenarios descritos, variando la atenuación de la fibra óptica. El proceso de experimentación consiste: en la revisión del diagrama del ojo a un time spam total simulado es de 88ns y a distintas atenuaciones en un rango entre 15 y 21 dB, con estas simulaciones se determinan los umbrales que ayudan en la clasificación de los bits recibidos en modulación PAM-4, en este escenario el transmisor cuenta con pre-distorsión en los niveles extremos. Con el fin de determinar los bits erróneos mediante la técnica bit error rate, que relaciona los bits erróneos con los bits enviados, se realizaron distintas simulaciones en un time spam simulado 886ns (full spam).

En cuanto al uso de pre-emphasis, los resultados obtenidos que se observa en la figura 11, muestran una mejora notable en el desempeño a los mismos niveles de atenuación del escenario 1, es decir utilizando una atenuación de 17dB se obtiene una potencia de recepción de -28.59dBm, bajos los umbrales obtenidos en la atenuación antes dicha el BER correspondiente es de 2.82e-05. En el presente escenario el BER mínimo aceptable es de 2e-03 que corresponde a la atenuación de 20dB donde se obtuvo -31.62 dBm de potencia en recepción, es necesario notar que un BER de 10e-03 nos permitirá en un futuro aplicar la corrección de errores hacia adelante (FEC).

Tabla 6 Valores de umbral y potencia para distintas atenuaciones usando pre-emphasis

| VALORES DE UMBRAL Y POTENCIA PAM-4 USANDO PRE-EMPHASIS | | | | | | |
|--|-------------|----------------|-------------|----------|----------|----------|
| Atenuacion (db) | Tiempo (ns) | Potencia (dBm) | BER (10e-x) | v3 | v2 | v1 |
| 15 | 886 | -26,60 | 0 | 3.15E-6 | 1.42E-6 | 4.25E-7 |
| 16 | 886 | -27,58 | 1,88E-05 | 2,50E-06 | 1,15E-06 | 3,60E-07 |
| 17 | 886 | -28,59 | 2,82E-05 | 1,95E-06 | 8,80E-07 | 2,65E-07 |
| 18 | 886 | -29,58 | 2,75E-04 | 1,57E-06 | 7,20E-07 | 2,30E-07 |
| 19 | 886 | -30,59 | 6,86E-04 | 1,22E-06 | 5,65E-07 | 1,55E-07 |
| 20 | 886 | -31,62 | 2,00E-03 | 9,60E-07 | 4,25E-07 | 1,40E-07 |
| 21 | 886 | -32,60 | 4,23E-03 | 9,20E-08 | 3,65E-07 | 7,85E-07 |

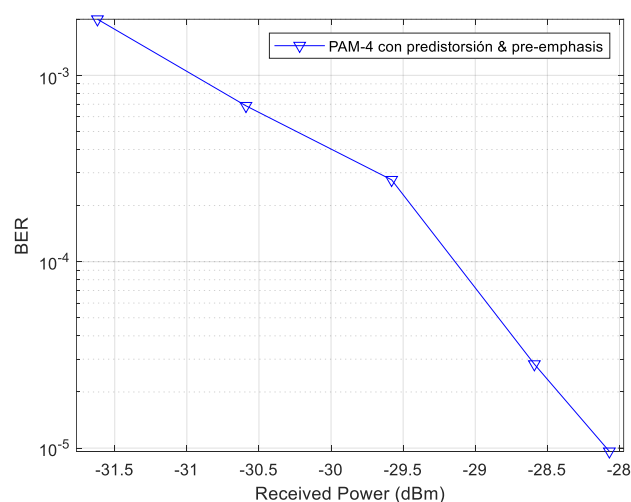


Figura 11 Curva PAM-4 con predistorsion & pre-emphasis

Los umbrales de la tabla 6 fueron hallados mediante la simulación del diagrama del ojo, donde se seleccionó 3 umbrales, el umbral inferior V1 para una atenuación de 16dB es 3.6×10^{-7} , el umbral central V2 es 1.15×10^{-6} como se observa en la figura 12, finalmente el umbral superior V3 es 2.50×10^{-6} .

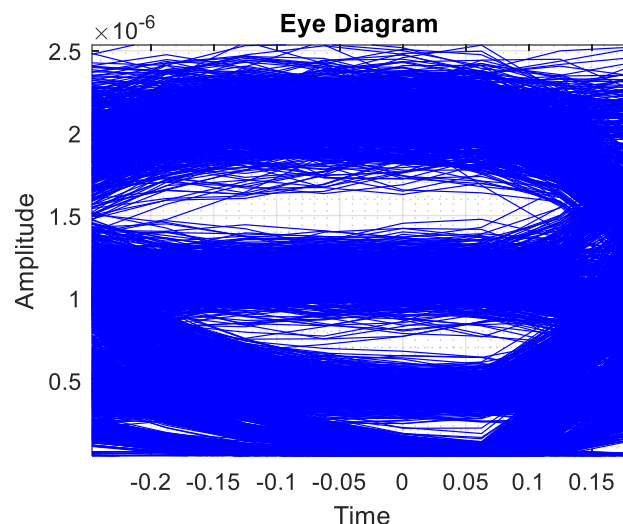


Figura 12 Diagrama de ojo con atenuación 17dB

Con estas condiciones óptimas de uso de pre-emphasis el mejor desempeño se obtiene usando un filtro pasabajo de un polo/un cero, con una frecuencia $F_{p1} = 19GHz$ y una constante $k = 3.5$, lo que en consecuencia da el uso de una frecuencia $F_{p2} = 66.5GHz$, la curva PAM-4 con pre-distorsión y pre-emphasis para una atenuación de 17dB tendrá una potencia de recepción de -28,59dBm se obtiene un BER de 2.52×10^{-5} , presenta una mejora significativa frente a la curva de pre-emphasis, que para la misma atenuación tendrá una potencia de recepción de -28.52dBm se obtiene un BER de 2.53×10^{-4} , su desempeño mejora con una ganancia de 2.25×10^{-4} en relación a la curva sin pre-emphasis, además existe una mejora del presupuesto de potencia de 1.06dB, que se cálculo para un valor de BER de 10×10^{-4} que corresponde al BER de una atenuación de 18dB para la curva con pre-distorsión & pre-emphasis y 17dB para la curva únicamente con pre-distorsión.

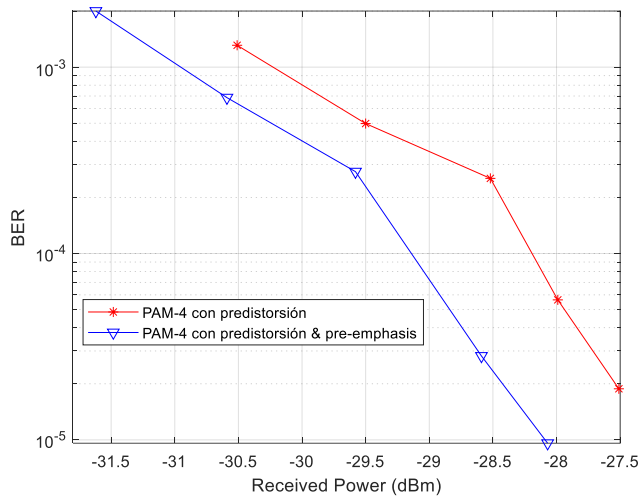


Figura 13 Curvas comparativas de la modulación PAM-4 con pre-emphasis y sin pre-emphasis

En cuanto al uso del filtro un solo polo se obtiene una potencia optima de recepción alrededor de -11.1dBm, este factor se obtiene mediante el DSP de pre-compensación y solo es evidente bajo fuerte limitaciones de ancho de banda para un porcentaje de banda de canal del 16% y una optimización del nivel de recorte al 25%, [12].

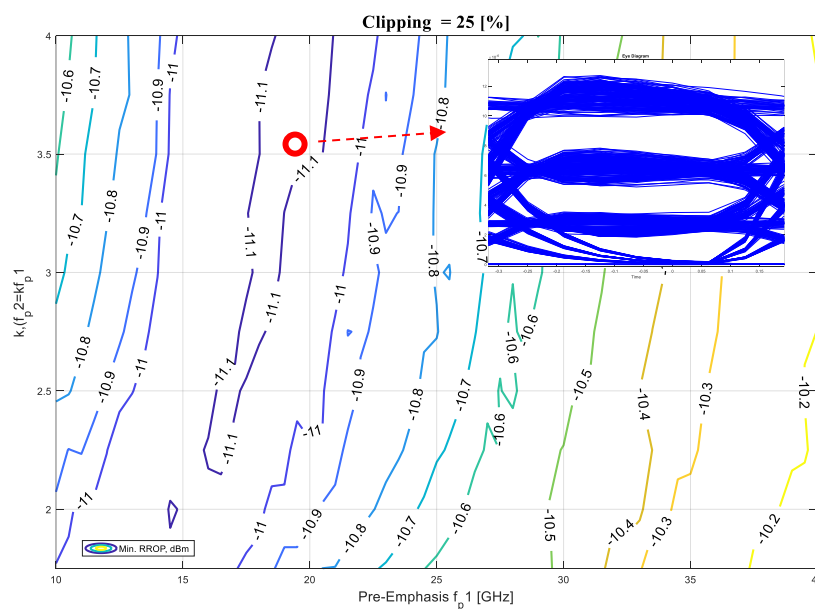


Figura 14 Counter plot para selección de los parámetros óptimos del filtro [33]

6. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se concluye que la aplicación de las técnicas de pre-distorsión y pre-emphasis en el sistema de comunicaciones PON “Red 100 Gb/s DSP-Assisted PON”, permiten el aumento de la tasa de transferencia y esto se evidencia en las tablas 5 y 6 en los valores de BER óptimos. Al ser técnicas orientadas a la disminución de factores atenuantes de distancia se concluye que a 20Km el desempeño es más que aceptable.

Siendo uno de los provechos de PAM-4 el mejorar la eficiencia espectral al doble, su debilidad de que como consecuencia se obtiene que es más sensible al ruido, se puede solventar a través de la aplicación de técnicas DSP como se han realizado en el siguiente trabajo de tesis.

En cuanto al uso del filtro DSP con pre-emphasis se obtiene un mejor desempeño con un filtro de un polo/un cero en comparación con la curva de PAM-4 con pre-distorsión, obteniendo una ganancia significativa de $2.25e-04$ y además mejora el presupuesto de potencia en 1.06dB figura 13.

REFERENCIAS

- [1] E. Ayala and S. Gonzales Sánchez, “Tecnologías de la Información y la Comunicación,” 2015.
- [2] M. P. Fernández, L. A. B. Rossini, L. Morbidel, and P. A. C. Caso, “PON Monitoring Technologies based on OTDR Techniques: State of the Art and Trends,” in *2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, IEEE, 2018, pp. 1–7.
- [3] I. González Correa, “Eficiencia de la telemedicina en la mejora de los resultados postquirúrgicos,” 2021.
- [4] W. Liang, H. Wang, J. Wei, J. Zhou, D. Guo, and W. Liu, “DSP-enabled 50G OOK-PON with beyond 29 dB power budget using O-band 10G DML and 10G APD,” *Opt. Commun.*, vol. 504, p. 127486, 2022.
- [5] P. Torres-Ferrera, H. Wang, V. Ferrero, M. Valvo, and R. Gaudino, “Optimization of Band-Limited DSP-Aided 25 and 50 Gb/s PON Using 10G-Class DML and APD,” *J. Light. Technol.*, vol. 38, no. 3, pp. 608–618, 2020, doi: 10.1109/JLT.2019.2946959.
- [6] R. Asif, “Future Quantum-to-the-Home (QTTH) All-Optical Networks (Invited Talk),” *2018 10th Int. Conf. Adv. Infocomm Technol.*, pp. 41–46, 2018.
- [7] N. Chand, X. Liu, F. Effenberger, N. Cheng, A. Shen, and H. Zheng, “High-Performance 50G-PON Burst-Mode Upstream Transmission at 25 Gb/s with DSP-Assisted Fast Burst Synchronization and Recovery,” *Asia Commun. Photonics Conf. 2019 (2019), Pap. T1G.3*, p. T1G.3, Nov. 2019.
- [8] P. Torres-Ferrera, V. Ferrero, R. Mercinelli, and R. Gaudino, “Experimental Demonstration of DSP-Assisted Electrical Duobinary Optimization for High Speed PON 25+ Gbps Using 10 Gbps APD Receiver,” *Eur. Conf. Opt. Commun. ECOC*, vol. 2018-Septe, Nov. 2018, doi: 10.1109/ECOC.2018.8535425.
- [9] J. Chen, H. Yang, B. Luo, L. Yan, and H. Xing, “A Flexible and Cost-effective Optical Access Scheme based upon DSP-assisted Block-IFDMA,” in *Asia Communications and Photonics Conference 2016*, in OSA Technical Digest (online). Wuhan: Optica Publishing Group, 2016, p. AF2A.152. doi: 10.1364/ACPC.2016.AF2A.152.

- [10] F. Steiner and G. Kramer, *Optimization of Bit Mapping and Quantized Decoding for Off-the-Shelf Protograph LDPC Codes with Application to IEEE 802.3ca*. 2018. doi: 10.1109/ISTC.2018.8625335.
- [11] C. Knittle, "IEEE 50 Gb/s EPON (50G-EPON)," in *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020*, Optica Publishing Group, 2020, p. Th1B.2. doi: 10.1364/OFC.2020.Th1B.2.
- [12] P. Torres-ferrera, R. Gaudino, and D. Cardenas, "Direct-Detection 25 Gb / s PON : PROs and CONs of Digital Signal Processing at the Transmitter Side," pp. 4–7, 2020.
- [13] G. Puerto-Leguizamón and D. Rico-Bautista, "Evaluación del particionado espectral centralizado para el transporte radio sobre fibra en redes opticas de acceso y metropolitanas," *RISTI-Revista Iber. Sist. e Technol. Inf.*, vol. 23, p. 367, 2019.
- [14] R. Morla de la Rosa, "Las vanguardias teatrales en República Dominicana (1970-2000)," 2022.
- [15] F. J. Sovenis Pazmiño, "Análisis de viabilidad para la migración de una red microondas a una red de tecnología fth para la empresa skynet de la parroquia mata de cacao." Babahoyo: UTB-FAFI. 2022, 2022.
- [16] J. A. Campos Gallardo, X. M. Rodriguez Velazquez, and A. A. Ruiz Gonzalez, "Manual para el monitoreo y pruebas de un enlace punto a punto, por medio de fibra óptica," *IPN*, 2020.
- [17] F. F. Álvarez Paliza, A. E. Ramos Fleites, D. D. Iglesias de la Torre, and Y. Ruíz Ríos, "Visión de la conectividad digital y la convergencia de las nuevas TIC en la economía digital," *USTA*, 2021.
- [18] P. Torres-Ferrera, V. Ferrero, R. Mercinelli, and R. Gaudino, "Experimental Demonstration of DSP-Assisted Electrical Duobinary Optimization for High Speed PON 25+ Gbps Using 10 Gbps APD Receiver," *Eur. Conf. Opt. Commun. ECOC*, vol. 2018-Septe, no. 1, pp. 2–4, 2018, doi: 10.1109/ECOC.2018.8535425.
- [19] D. Acevedo Zuluaga, "Análisis y evaluación de modelos de despliegue de una red FTTX con tecnología GPON para solución con splitter balanceado vs. Solución preconectorizada con splitter desbalanceado," 2023.
- [20] C. D. RADICELLI, M. del R. POMBOZA, N. S. SAMANIEGO, and E. P. VILLACRÉS,

- “Red óptica pasiva para proveer de Internet a la ciudad de Riobamba-Ecuador,” *Red*, vol. 40, no. 40, 2019.
- [21] I. Sierra Solana, “Diseño de red fronthaul sobre WDM para soportar acceso radio 5G,” *Openaccess*, 2020.
- [22] D. Ropero Torres, K. Puerto, and D. Guevara-Ibarra, “Evaluación de un sistema de comunicación óptico empleando modulación por desplazamiento de fase QPSK, 8PSK y 16PSK utilizando la técnica FDM,” *AiBi Rev. Investig. Adm. e Ing.*, vol. 8, no. 2 (2020), pp. 76–83, 2020.
- [23] N. M. González *et al.*, “Sensor de temperatura de fibra óptica con procesamiento digital de señales,” *JÓVENES EN LA Cienc.*, vol. 10, 2021.
- [24] J. S. Bruno, “Algoritmos y arquitecturas hardware para la implementación de OFDM en sistemas de comunicaciones ópticos.” Universitat Politècnica de València, 2019.
- [25] M. R. Pirez, A. A. H. Bedregal, and C. H. J. Mamani, “Redes ópticas modernas,” *Univ. Cienc. y Tecnol.*, vol. 26, no. 113, pp. 175–190, 2022.
- [26] P. G. Patki *et al.*, “Recent progress on optical regeneration of wavelength-division-multiplexed data,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 2, pp. 1–12, 2020.
- [27] T. Mahmood, S. Mohan, and K. A. Hmood, “Peak-to-average power ratio (PAPR) reduction in multiple-input multiple output (MIMO) with orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems: a review,” *Web Sci. Int. Sci. Res. J.*, vol. 2, no. 11, pp. 1–19, 2021.
- [28] D. F. Londoño Delgado, “HTTP/2 para internet de las cosas: análisis, evaluación y adaptación del control de flujo,” 2020.
- [29] D. G. Cunningham and I. H. White, “Advances in local area optical data communication systems,” *Reports Prog. Phys.*, vol. 83, no. 7, p. 75101, 2020.
- [30] A. Venegas, M. S. Jiménez, and P. Venegas, “Optical Burst Switching (OBS), Current and Future Perspectives,” *Latin-American J. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 31–46, 2019.
- [31] L. De Micco, F. L. Vargas, and P. I. Fierens, “A literature review on embedded systems,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 18, no. 02, pp. 188–205, 2019.
- [32] D. A. de Arruda Mello and F. A. Barbosa, *Digital Coherent Optical Systems*. 2021.

- [Online]. Available: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-66541-8>
- [33] A. R. Jalalvand, M. Roushani, H. C. Goicoechea, D. N. Rutledge, and H.-W. Gu, "MATLAB in electrochemistry: A review," *Talanta*, vol. 194, pp. 205–225, 2019.
- [34] G. Soni, "Analysis of OCDMA Link using OHL Based Technique at 1550nm," in *2021 13th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, IEEE, 2021, pp. 112–115.
- [35] D. Richards *et al.*, "Overcoming challenges in large-core SI-POF-based system-level modeling and simulation," in *Photonics*, MDPI, 2019, p. 88.
- [36] X. Pan, H. Zhang, L. Yang, X. Wang, and C. Wang, "Analog PAM4 modulation technique enabled by a polarization multiplexing modulator," *2021 19th Int. Conf. Opt. Commun. Networks, ICOCN 2021*, pp. 20–22, 2021, doi: 10.1109/ICOCN53177.2021.9563733.