



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

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

TEMA:

Diseño y simulación de una red PAM4 - PAM8 PON, para proveer servicios de acceso
de alta velocidad.

Autor: Bernardo Renan Jaramillo Cisneros

Director: Dr. Germán Arévalo B. PhD

Quito 2022

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, BERNARDO RENAN JARAMILLO CISNEROS, con C.I. 1710437789, autor del trabajo de titulación con tema: “Diseño y simulación de una red PAM4 - PAM8 PON, para proveer servicios de acceso de alta velocidad”, previo para la obtención del título de Magister en Tecnologías de Información mención Gestión y Administración de TI.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENECYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación 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 al Pontificias Universidad Católica de Ecuador a difundir a través del sitio web de la biblioteca de la PUCE el referido trabajo de titulación, respetando la políticas de propiedad intelectual de la Universidad.



Bernardo Renan Jaramillo Cisneros

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi carácter de Director – Tutor del Trabajo de Posgrado Titulado: “Diseño y simulación de una red PAM4 - PAM8 para proveer servicios de acceso de alta velocidad”, presentado por el maestrante Bernardo Renan Jaramillo Cisneros, titular de la Cédula de Identidad N° 1710437789 para optar al Grado de Magíster en Educación mención gestión del aprendizaje mediado por TIC, considero que dicho Trabajo de Investigación reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la evaluación por parte de los Lectores – Evaluadores que se designen para tal fin por parte de las autoridades de la Facultad de Ciencias de la Educación.

En la ciudad de Quito, a los 19 días de diciembre de 2022



Dr. Germán Vicente Arévalo Bermeo.

C.I. 0103152500

garevalo893@puce.edu.ec

NRO TELEFONO: 0991572515

NOTA:

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

PON_para_proveer_servicios_de_acceso_de_alta_velocidad- vf.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

INDICE DE SIMILITUD

5%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Servicios Educativos Martim
Cerere

Trabajo del estudiante

1%

2

www.coursehero.com

Fuente de Internet

1%

3

Submitted to Universidad Politecnica
Salesiana del Ecuador

Trabajo del estudiante

1%

4

dspace.udla.edu.ec

Fuente de Internet

1%

5

www.copaes.org.mx

Fuente de Internet

1%

6

sep.gob.mx

Fuente de Internet

1%

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

AUTORÍA

Yo, Bernardo Renan Jaramillo Cisneros, portador de la cédula de ciudadanía No 1710437789, declaro bajo juramento que la presente investigación es de total responsabilidad del autor, y que se ha respetado las diferentes fuentes de información realizando las citas correspondientes. Esta investigación no contiene plagio alguno y es resultado de un trabajo serio desarrollado en su totalidad por mi persona.



Bernardo Renan Jaramillo Cisneros

DEDICATORIA

A mi madre Fabiola, con su apoyo constante a mis sueños.

A mi padre Bernardo, por su ejemplo de logros.

A mis hijos Bernardo Aarón y Abigail que son el norte de mi vida.

A lo divino del SHUNIATA.

“No nos atrevemos a muchas cosas porque son difíciles, pero son difíciles porque no nos atrevemos” (Séneca Lucio)

AGRADECIMIENTO

“Largo es el camino de la enseñanza por medio de teorías; breve y eficaz por medio de la práctica”. (Séneca Lucio)

A German Arévalo, tutor del presente trabajo, el cual es un ser humano amable y un profesional brillante digno de ejemplo.

A mi madre por su apoyo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	16
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.1. Formulación del problema	17
1.2. Objetivos de la Investigación	17
Objetivo General	17
Objetivos Específicos	17
1.3. Justificación de la Investigación	18
CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	19
2.1. Antecedentes de la Investigación	19
2.2. Elementos de red óptica.	20
2.2.1. Fibra óptica	20
2.2.2. Sistemas de comunicación óptica	22
2.3. Red PON.	32
2.4. Modulación óptica	34
2.4.1. Codificación	34
2.4.2. Esquemas de modulación	35
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	38
3.1. Tipo de Investigación	38
3.2. Diseño de Investigación	38
3.3. Unidades de Estudio	38
3.4. Técnicas de recolección de datos	38
3.5. Técnica de Análisis de Datos	39
3.6. Operacionalización de Variables	39
CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	40
4.1. Software de simulación	40
4.1.1. OptSim	40
4.1.2. MathLab	40
4.2. Diseño de ambiente de simulación	41

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN DE LA PROPUESTA	44
5.1. Simulación PAM4 para 50Gbits/s	44
5.1.1. Parámetros	44
5.1.2. Procedimiento	44
5.1.3. Resultados	44
5.2. Simulación PAM4 para 100Gbits/s	47
5.2.1. Parámetros	47
5.2.2. Procedimiento	47
5.2.3. Resultados	47
5.3. Comparativa de resultados simulaciones PAM4	50
5.4. Simulación PAM8 para 50 Gbits/s	51
5.4.1. Parámetros	51
5.4.2. Procedimiento	51
5.4.3. Resultados	51
5.5. Simulación PAM8 para 100 Gbits/s	54
5.5.1. Parámetros	54
5.5.3. Resultados	54
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
Referencias.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estándares IEEE para redes PON evolución (VIAVI, Póster sobre el análisis de las pruebas de redes ópticas pasivas (PON), 2019).....	19
Tabla 2. Valores de las variables de ancho de banda y atenuación.....	39
Tabla 3. Configuración MathLab para pre distorsión en codificación Gray para PAM4.....	42
Tabla 4. Configuración MathLab para pre distorsión en codificación Gray para PAM8.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura cable fibra óptica (Chen, 2015).....	21
Figura 2. Funcionamiento de fibra óptica monomodo (MIRayconsulting, 2020).....	21
Figura 3. Funcionamiento de fibra óptica multimodo (MIRayconsulting, 2020).....	22
Figura 4. Pérdidas en una fibra óptica (Martin, 2014).....	22
Figura 5. Sistema de comunicación óptica (Rios, 2012).....	23
Figura 6. Grupo de elementos de transmisión (autoría propia).....	23
Figura 7. Fuente de luz LED (Cablematic, 2022).....	23
Figura 8. Diodo láser monomodo mariposa 14 pines (SemiNex, 2020).....	24
Figura 9. Modulador electroóptico de niobato de litio (ThorLabs, Moduladores electroópticos de niobato de litio, acoplados a fibra, 2022).....	24
Figura 10. Modulador de fase (Garcia A. , 2019).....	25
Figura 11 Modulador de amplitud Mach-Zehnder (Macho, 2012).....	25
Figura 12. Grupo de elementos de transporte (autoría propia).....	26
Figura 13. Splitter PLC (community, ¿Qué es un splitter fibra óptica, 2021).....	26
Figura 14. Aislador óptico (Thorlabs, Aislador óptico, 2022).....	27
Figura 15. Amplificador SOA (Cruz, 2017).....	27
Figura 16. Amplificador BOA de 14 pines (Thorlabs, Amplificadores ópticos de refuerzo de banda O, 2022).....	28
Figura 17. Amplificador de fibra dopada EDFA.....	27
Figura 18. Amplificador RAMAN (Santiago, 2022).....	28
Figura 19. Atenuadores de fibra óptica (ArpaTel, 2022).....	29
Figura 20. Grupo de elementos de recepción (autoría propia).....	29
Figura 21. Respuesta de un fotodiodo a un pulso de luz (Muriel, 2006)	30
Figura 22. Fotodiodos de Si y InGaAs y tabla de responsividad (ThorLabs, Fotodiodos calibrados, 2022).....	30
Figura 23. Fotodiodo APD (Network, 2019).....	31

Figura 24. Filtro pasa bajos EF120 (ThorLabs, Filtros eléctricos de pasa bajo, alimentación directa BNC, 2022).....	31
Figura 25. Filtro pasa altos EF121 (ThorLabs, Filtros eléctricos pasa alto, alimentación directa BNC, 2022).....	31
Figura 26. Diferencia entre redes de fibra óptica (Concil, 2016).....	32
Figura 27. Arquitectura red PON (4itNetworks, 2022).....	32
Figura 28. Tráfico ascendente (TDMA) y descendente desde múltiples ONU (Lopez A. , 2022)	33
Figura 29. Desarrollo estándares PON (Heynen, 2017).....	34
Figura 30. Funcionamiento de un pre compensador (Garcia A. , 2009).....	34
Figura 31. Equivalencia con Codificación NRZ (Arias, 2008).....	35
Figura 32. Señal digital modulada en fase (Lazaro, 2015).....	35
Figura 33. Señal digital modulada en amplitud (Lazaro, 2015).....	36
Figura 34. Pulsos NRZ vs PAM4 (community, ¿Qué es PAM4 y cuáles son las diferencias entre PAM4 y NRZ?, 2022).....	36
Figura 35. Diagrama de ojo PAM8 (Ghias, 2012).....	37
Figura 36. Diseño red PON para simulación. Autoría propia.....	41
Figura 37. Configuración de atenuación simulación PAM4 50 Gb/s.	45
Figura 38. Diagrama de ojo simulación PAM4 50 Gb/s.	45
Figura 39. Diagramas de bits transmitidos y bits recibidos simulación PAM 4 50 Gbit/s.	46
Figura 40. Diagramas BER vs potencia recibida simulación PAM4 50 Gbits/s.	46
Figura 41. Configuración de atenuación simulación PAM4 100Gb/s.	48
Figura 42. Diagrama de ojo simulación PAM4 100Gb/s.	48
Figura 43. Diagramas de bits transmitidos y bits recibidos simulación PAM4 100Gbits/s. ...	49
Figura 44. Diagramas BER vs potencia recibida simulación PAM4 100Gbits/s.	49
Figura 45. Diagramas BER vs potencia recibida en simulaciones PAM4 a 50 Gbits/s y 100Gbits/s	50
Figura 46. Configuración de atenuación simulación PAM8 50Gbits/s	52

Figura 47. Diagrama de ojo simulación PAM8 50Gbits/s.52

Figura 48. Diagramas de bits transmitidos y bits recibidos simulación PAM8 50Gbi/s.52

Figura 49. Diagramas BER vs potencia recibida simulación PAM8 50Gbits/s.53

Figura 50. Configuración de atenuación simulación PAM8 100Gbits/s.55

Figura 51. Diagrama de ojo simulación PAM8 100Gbits/s.55

Figura 52. Diagramas de bits transmitidos y bits recibidos simulación PAM8 100Gbits/s. .56

Figura 53. Diagramas BER vs potencia recibida simulación PAM8 100Gbits/s.56

Figura 54. Diagramas BER vs potencia recibida en simulaciones PAM8 a 50 Gbits/s y 100Gbits/s.57

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRIA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN MENCIÓN GESTIÓN
Y ADMINISTRACIÓN DE TI

Diseño y simulación de una red PAM4 - PAM8 PON, para proveer servicios de acceso de
alta velocidad.

Autor: Bernardo Renan Jaramillo Cisneros

Director -Tutor: Dr. Germán Arévalo B. PhD

Fecha: 19 de diciembre de 2022

RESUMEN

En el siguiente trabajo, se diseña una red PON (passive optical network), con sus elementos, sobre el que se realiza simulaciones de transmisión de datos, mediante la herramienta Optsim, junto con el software MathLab, que incorpora elementos de transmisión y recepción. Con este conjunto se envía muestras de 106000 bits, modificando las velocidades de transmisión, con el fin de que se alcance 2 anchos de banda: 50 y 100 Giga bits por segundo, en una red de 20 Km de longitud. Para cumplir con este fin se implementa modulación por amplitud en 4 y 8 niveles: PAM4 y PAM8, permitiendo optimizar el diseño simulado. De los resultados de potencia recibida y BER (tasa de bits errados) se realiza un análisis comparativo para cada nivel de modulación y su condición para un aumento del ancho de banda

Palabras clave:

PON

PAM4

PAM8

BER

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

Design and implementation of a PAM4 - PAM8 PON for providing high bitrate access-
network services

Author: Bernardo Renan Jaramillo Cisneros

Director -Tutor: Dr. Germán Arévalo B. PhD

Date: December 19, 2022

ABSTRACT

In the following work, a PON (passive optical network) network is designed, with its elements, on which data transmission simulations are performed, using the Optsim tool, together with the MathLab software, which incorporates transmission and reception elements. With this set, samples of 106000 bits are sent, modifying the transmission speeds, in order to reach 2 bandwidths: 50 and 100 Giga bits per second, in a 20 Km long network. To achieve this goal, amplitude modulation is implemented in 4 and 8 levels: PAM4 and PAM8, allowing to optimize the simulated design. From the received power and BER (bit error rate) results, a comparative analysis is made for each modulation level and its condition for a bandwidth increase.

Keywords

PON

PAM4

PAM8

BER

INTRODUCCIÓN

En la actualidad en este mundo post pandemia, con sus cambios en el comportamiento y restricciones, tenemos un auge en el desarrollo de las tecnologías de la información, y sobre todo aquellas que presentan interfaces con el ser humano, estas requieren cada vez más estar totalmente interconectados formando redes de datos, estas soportan un gran requerimiento de transmisión de los datos generados por todo tipo de terminal, hacia los centros de procesamiento, para luego retornar con información a los usuarios, pero día a día las cantidades de información se incrementan de forma exponencial, al igual que los usuarios, por lo que la transmisión de esta información forma parte fundamental de la comunicación, la cual debe ser de gran capacidad y de gran velocidad. Una de las soluciones planteadas a los usuarios es la utilización de redes de acceso de alta velocidad como las de fibra óptica

En el Ecuador no es la excepción ya que la demanda creciente de equipos para estar conectados a la red de datos, determinó el crecimiento de la red de fibra óptica en el país, según fuente del Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información en el 2006 se tenía 3500 kilómetros de red de fibra óptica y en la actualidad es más de 66000 kilómetros, en constante despliegue de más fibra (MINTEL, 2022).

La tecnología desarrollada en las transmisiones sobre fibra óptica para su crecimiento en capacidad y en velocidad se han centrado en: la calidad del material que hace la fibra, emisores laser, amplificadores de señal (Fiber, 2020), con lo que se trabaja en lo referente a la alta velocidad, pero para aumentar la capacidad de transportar data o ancho de banda se utiliza métodos de modulación, la cual permite enviar sobre un mismo pulso de luz varios pulsos de datos. Pudiendo ser un tipo de las modulaciones las de amplitud del pulso (PAM).

El presente trabajo de titulación, pretende realizar un aporte mediante la simulación de la transmisión de datos utilizando una red de servicios PON de alta velocidad, en la cual se realizar las pruebas simuladas, para proveer un diseño en base del análisis comparativo utilizando las modulaciones de 4 niveles o PAM4 y de 8 niveles o PAM8, frente a los estándares existentes.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Formulación del problema

¿Cómo conseguir una mejor eficiencia en la transmisión de datos en redes de fibra óptica a alta velocidad, usando modulación por amplitud, determinar su comportamiento y limitaciones?

1.2. Objetivos de la Investigación

Objetivo General

Diseñar y simular una red PAM4-PAM8-PON para proveer servicios de acceso de alta velocidad, mediante una herramienta específica para diseño y simulación de modelos de comunicación ópticos que es OptSim (trasmisión, 2020).

Objetivos Específicos

- Realizar un diseño de red PON de acceso con modulaciones PAM4 y PAM8, para altas velocidades de transmisión.
- Evaluar el impacto en transmisiones sobre una red PON cuando se aumente la velocidad de trasmisión.
- Evaluar el impacto en transmisiones sobre una red PON cuando se implementa un método de modulación PAM.
- Analizar comparativamente el comportamiento de transmisiones a diferentes velocidades con la misma modulación propuesta.
- Analizar comparativamente los valores de errores en recepción con el uso de modulación PAM4 y PAM8 a diferentes velocidades.

1.3. Justificación de la Investigación

Entre las redes de transmisión de datos las redes de fibra óptica son muy utilizadas por sus ventajas como las de: ser inmunes a las interferencias electromagnéticas, o en teoría tener una capacidad de ancho de banda ilimitada, lo que permite que sean utilizadas para interconexión de redes inalámbricas WAN o redes de distribución PON.

Dado la gran penetración en el mercado de las comunicaciones de las redes de fibra óptica, son las más utilizadas para transmitir los datos a los usuarios finales sean empresariales o domicilios, con sus requerimientos crecientes de información de multimedios,

Para soportar las redes de distribución o interconectar las mismas se requiere métodos que permitan optimizar la cantidad de datos transmitidos, sea por medio de aumento en la velocidad de transmisión para disminuir la latencia y/o en la cantidad de información transmitida o ancho de banda. Uno de los métodos para aumentar la cantidad de datos transmitidos, es la utilización de métodos de modulación, los cuales permiten enviar en una señal, varias señales a la vez. Para el presente trabajo se utilizará la modulación PAM (Modulación por Amplitud de Pulsos) comparando el comportamiento de transmisiones usando de PAM4 y PAM8 en redes de alta velocidad.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Antecedentes de la Investigación

Las PON en los últimos años han alcanzado un gran desarrollo y despliegue, debido a los requerimientos exigidos por: la introducción de la quinta generación de la telefonía móvil, 5G, desarrollo de la inteligencia empresarial o business intelligence (BI), por el avance del internet de las cosas (IoT) (Souza, 2019), o por la realidad virtual o aumentada, lo que resulta en que las compañías trabajan para proveer redes de mayor velocidad en las que se disminuya la latencia, con mayor ancho de banda para entregar un rendimiento en tiempo real (Hickey, 2020), lo que se manifiesta al final en más dispositivos y más usuarios estén conectados, generando o consumiendo montañas de datos, llevando a la industria a tener redes de comunicación más eficientes.

Por los requerimientos anteriores y por las ventajas que ofrecen las PON como: mayor ancho de banda, mayor velocidad, fácil despliegue, aumento de cobertura, ahorro en energía, se ha convertido en el foco de las investigaciones para su evolución en los medios de comunicación, mejorando y optimizando en el caso de las PON (Zambrano, 2020). Estas investigaciones han creado una clasificación de los tipos de redes PON

Estándares de la red PON: evolución e implementación

	G-PON	XGS-PON (simétrica)	NG-PON2	GE-PON	10G-EPON	100G-EPON
Normas	ITU-T G.984 (2003)	ITU-T G.9871 (2016)	ITU-T G.989 (2015)	IEEE 802.3ah (2004)	IEEE 802.3av (2009)	IEEE 802.3ca (2019 por determinar)
Tasa de datos descendente/ ascendente	2,4/1,2 GBps	10/10 Gbps	40 (4 x 10)/ 40 (4 x 10) GBps	1,25/1,25 GBps	10/10 Gbps	Hasta 100/ 100 GBps
Relación de splitters	Hasta 1:64 (128)	Hasta 1:128 (256)	Hasta 1:128 (256)	Hasta 1:64	Hasta 1:128	Por determinar
Tipo de fibra	G.652	G.652/G.657 (para instrumento nuevo)	G.652/G.657 (para instrumento nuevo)	G.652	G.652/G.657 (para instrumento nuevo)	G.652/G.657 (para instrumento nuevo)
Pérdida máxima	32 dB	35 dB	35 dB	29 dB	29 dB	Por determinar
Coexistencia	N/D	Sí con G-PON	Sí con G-PON y XGS-PON	N/D	Sí con GE-PON	Sí con GE-PON y 10G-EPON

Tabla 1: Estándares IEEE para redes PON evolución (VIAVI, Póster sobre el análisis de las pruebas de redes ópticas pasivas (PON), 2019).

Actualmente está disponible en el mercado redes 10G PON, con sus desafíos en el aumento en tráfico y ancho de banda, convirtiendo las redes de borde más competitivas, ya que permite a los proveedores dar más servicios sin aumento en la complejidad de la red (Hickey, 2020), pero con esto la industria analiza hacia dónde va el crecimiento sea redes de 25G, 50G o 100G esto lo determinarán las necesidades del mercado.

En los desarrollos presente en redes PON tenemos a empresas como la belga Proximus que nos indica su nueva red PON de 25G como la red más rápida actualmente implementada (Hardy, Proximus turns up 25G PON link, commits to deployments, 2021), con el objetivo de alcanzar un 80% de cobertura hasta el 2028 para cubrir la creciente demanda.

La empresa LIGHTWAVE presenta sus nuevas investigaciones enfocándose en redes 50G PON (Hardy, History says 50G PON will outpace 25G PON, 2022), dejando atrás las redes de 25G PON, para proveer mejores servicios de comunicación, sin embargo se considera que este tipo de redes deben ser consideradas como pasos intermedios para alcanzar 100G PON.

Huawei está enfocada en desarrollo de una red 50G, con la implementación de los FTTx necesarios, con el fin de proveer servicios al gigantesco mercado chino con sus operadoras así “El prototipo de Huawei presentó una transmisión de 50 Gbps de una sola longitud de onda, con compensación a la dispersión presentado por la fibra óptica y al ancho de banda en una distancia de 20 Km” (Huawei, 2022).

Paralelamente la firma NOKIA también deja atrás las redes de 25G PON para aportar por redes de 100G PON, logra una transmisión en una sola longitud de onda, evitando unir múltiples longitudes de onda de menor velocidad, simulando condiciones reales, la cual fue presentada en Nashville USA. (NOKIA, 2022). Stefaan Vanhastel CTO de NOKIA indica: “La fibra es la infraestructura de banda ancha definitiva, tiene una capacidad ilimitada, pues solo necesita cambios en la electrónica en cada extremo para incrementar la velocidad”.

2.2. Elementos de red óptica.

2.2.1. **Fibra óptica.** Es un hilo muy delgado de vidrio o de un material sintético, con similares características de reflexión y/o refracción, utilizado para la transmisión pulsos de luz que representan a los datos.

Conformación genérica de un cable de fibra óptica (Chen, 2015).

- Núcleo, fibra de silicio o plástico muy puro
- Loose buffers, recubrimiento sobre la fibra que evita que la luz se disperse

- Malla de aramida, brinda protección física de la estructura
- Vaina, elemento de plástico PVC que da fuerza a la estructura

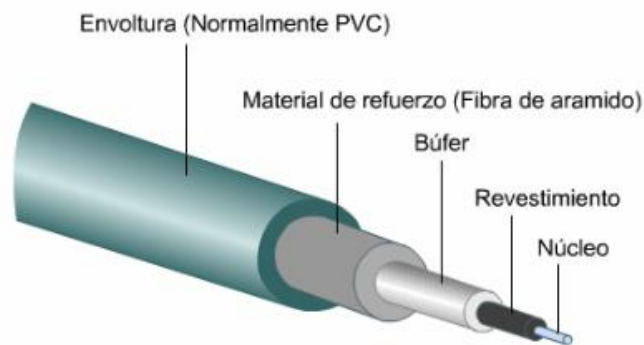


Figura 1. Estructura de un cable fibra óptica (Chen, 2015).

Clasificación de las fibras ópticas

Monomodo: fibra con un diámetro entre 8.3 a 10 micrometros, transporta un solo modo de transmisión, lo que permite cubrir grandes distancias a gran velocidad casi sin atenuaciones, de este tipo la más usada en las redes PON es la FTTH que usa longitudes de onda que va desde los 1280 a 1625 nanometros, con bajas perdidas por curvatura lo que permite curvas cerradas permitiendo usarlos en casas o edificios (Pierri, 2010).

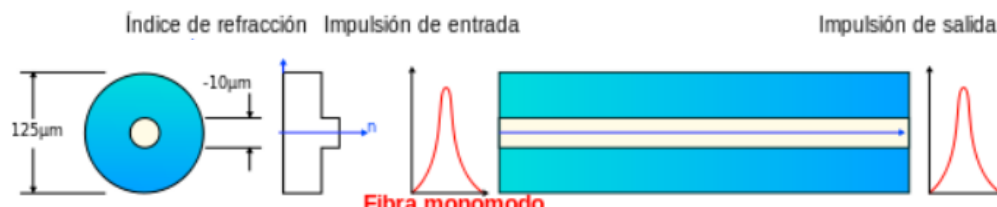


Figura 2. Funcionamiento de fibra óptica monomodo (MRayconsulting, 2020).

Fibra multimodo: transportan múltiples haces de luz al mismo tiempo, tienen un núcleo que va de los 50 a los 100 micrómetros, su ventaja es que proporcionan un mayor ancho de banda, con altas velocidades, pero para distancia de medio a cortas máximo 2 Km. (Orange, 2021).

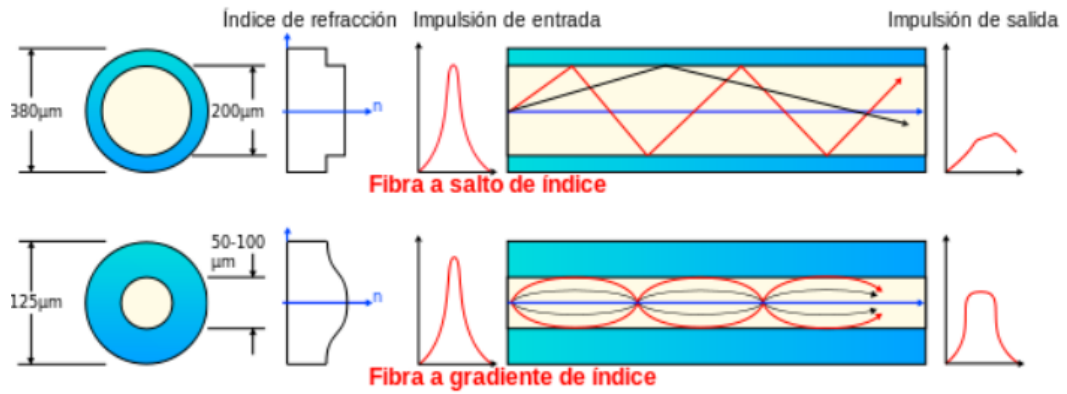


Figura 3. Funcionamiento de fibra óptica multimodo (MIRayconsulting, 2020).

Perdidas, la transmisión de la señal en la fibra óptica se degrada debido a varios factores a lo que se llama pérdidas y pueden ser:

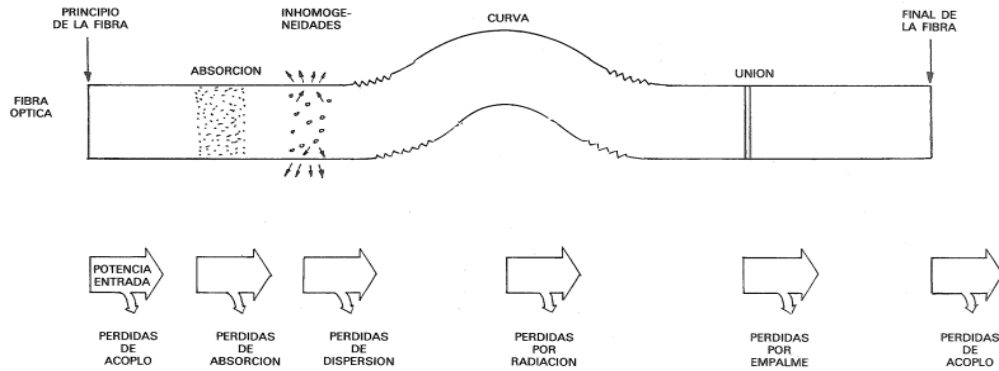


Figura 4. Pérdidas en una fibra óptica (Martin, 2014).

- Atenuación de la señal producido por el tipo del material
- Absorción intrínseca producida por los componentes de la FO.
- Absorción extrínseca producida por impurezas adicionadas en la FO
- Pérdidas por curvatura que produce un menor ángulo crítico entonces refracción
- Pérdidas por acople con todos los elementos que forman la red

2.2.2. **Sistemas de comunicación óptica.** Su arquitectura básica se forma de tres grupos de elementos: al inicio elementos para la de transmisión, en el medio elementos para el transporte de la señal y al final un grupo de elementos para la recepción. Cada uno de los grupos tendrán más elementos dependiendo de la complejidad requerida.

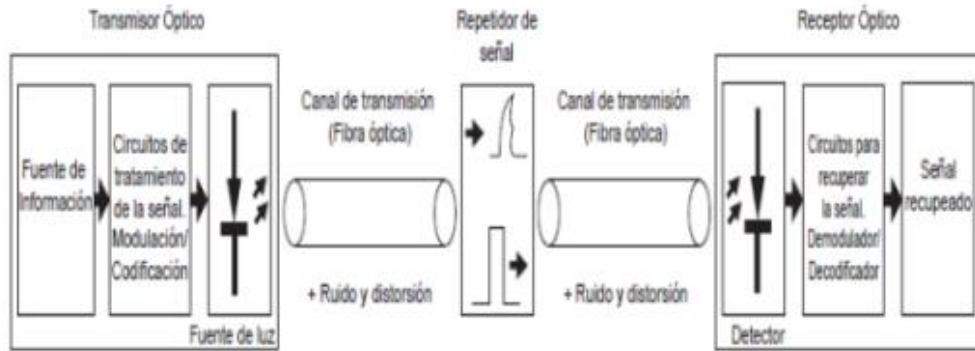


Figura 5. Sistema de comunicación óptica (Rios, 2012).

2.2.2.1. **Grupo de elementos para la transmisión.** Aquí se genera la señal a ser transmitida, consta de elementos como:

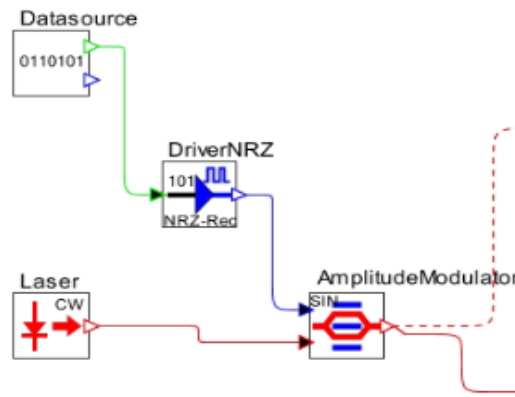


Figura 6. Grupo de elementos de trasmisión (autoría propia generado en OptSim).

Fuente de datos a transmitir: los que serán transformados a señales eléctricas en un driver, estas señales eléctricas se envían a un modulador de amplitud que por otro lado recibe luz de un generador óptico, donde transforma las señales eléctricas a pulsos de luz codificadas.

Fuente de luz mediante un diodo emisor de luz o LED: sistema de emisión de luz basado en la inserción de corriente eléctrica a un material semiconductor el cual por esta inserción producirá una emisión espontánea de pares electrones huecos, los cuales al recombinarse o regresar a su estado original emiten fotones.

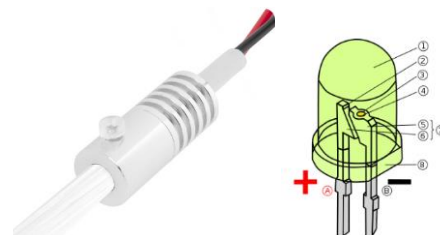


Figura 7. Fuente de luz LED (Cablematic, 2022).

Fuente de emisión de luz es la luz amplificada por radiación de emisión estimulada o LASER: sistema de emisión de luz basado también en la estimulación de un material semiconductor para que genere pares electrones huecos, pero basado en una emisión estimulada donde el fotón inicial estimula a un electrón su cambio de estado energético para formar un nuevo fotón, todo esto dentro de una cavidad resonante o Fabry Perot, que hace que se concentren electrones a una frecuencia deseada.

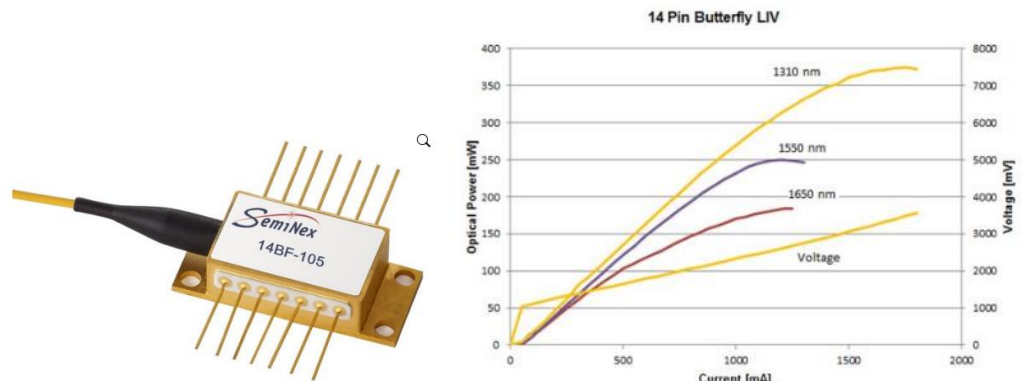


Figura 8. Diodo láser monomodo mariposa 14 pines (SemiNex, 2020).

Moduladores de señal. La función de los moduladores electroópticos es poder codificar la información a transmitir sobre la portadora mediante modulación de: intensidad o fase, estos son externos y posteriores a la fuente de luz antes de acoplarse a la fibra transportadora.



Figura 9. Modulador electroóptico de niobato de litio (ThorLabs, Moduladores electroópticos de niobato de litio, acoplados a fibra, 2022).

Modulador de fase: su función es de modificar la señal mediante la creación de un campo eléctrico sobre el eje de la guía de onda (cristal de Niobato de Litio LiNbO_3) con la tensión necesaria para producir el desfase (Macho, 2012).

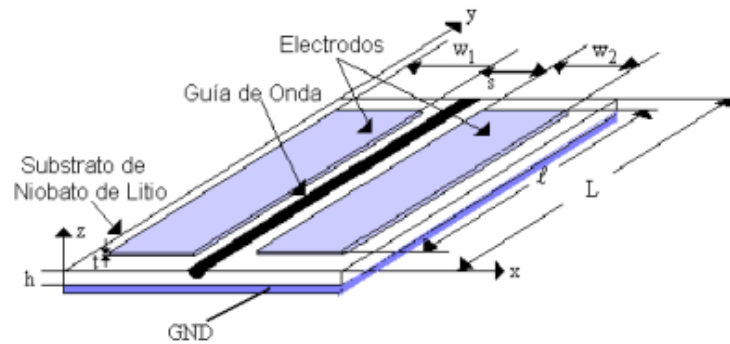


Figura 10. Modulador de fase (Garcia A. , 2019).

Modulador electroóptico de amplitud Mach Zehnder: en este elemento la señal ingresa al cristal donde se divide en 2, en el camino de abajo se aplica un campo electromagnético que produce un desfase en la señal la cual al unirse con la vía superior puede suceder que se anule la señal, o que se suma a la señal y produzca un desfase en amplitud y fase con lo que se obtiene valores de 0 y 1.

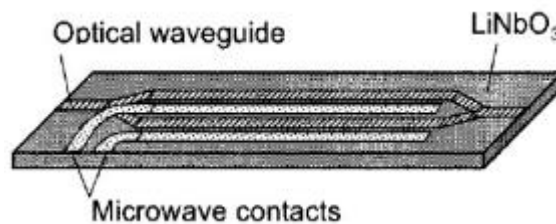


Figura 11 Modulador de amplitud Mach-Zehnder (Macho, 2012).

2.2.2.2. **Grupo de elementos de transporte.** Constituido básicamente formado por los siguientes elementos:

Fibra óptica, donde los pulsos ópticos procedentes de un sistema se entregan para su transporte, para esto la señal es amplificada e introducida en la fibra, también están los dispositivos ópticos pasivos, además de filtros para tratar la señal y atenuadores de señal antes de entregar al grupo receptor.

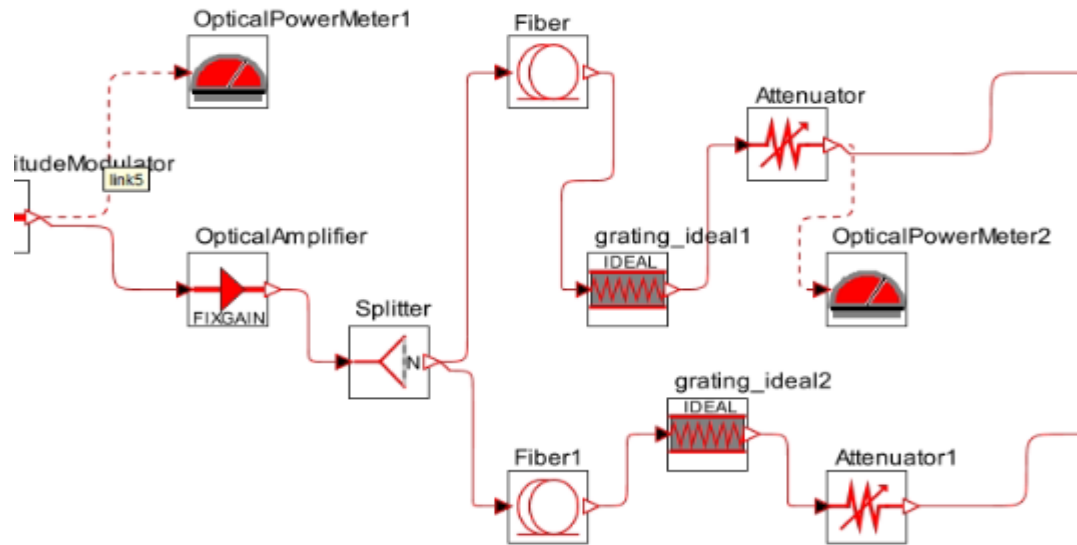


Figura 12. Grupo de elementos de transporte (autoría propia generado en OptSim).

Splitter: es un divisor de señal óptica, que permite que de una fibra se divida la señal en N fibras con una proporcionalidad de potencia, es ampliamente utilizado en redes FTTX, GPON.



Figura 13. Splitter PLC (community, ¿Qué es un splitter fibra óptica, 2021).

Combiner: es un splitter inverso que combina laces de luz mediante multiplexación por división de tiempo (TDMA), o multiplexando señales de distinta longitud de onda, para volver a tener una sola fibra óptica que transporte.

Aislador óptico: elemento que permite que el haz de luz se transmita en una sola dirección evitando retornos, para proteger los emisores y de las señales que pueden causar ruido por intensidad.



Figura 14. Aislador óptico (Thorlabs, Asilador óptico, 2022).

Amplificador óptico: Es un aparato que amplifica los pulsos sin necesidad de transformarlos al dominio eléctrico – óptico, con lo que optimiza su funcionamiento, existen varios tipos de amplificadores (Sergio Moreno, 2017): SOA amplificador óptico semiconductor. Tienen una cámara de semiconductor donde mediante electricidad se excitan electrones que al ser estimulados por la señal producen electrones que aportan a la señal amplificándola; usado en señales con polarizaciones desconocidas, son de bajo costo, pero su desventaja es que su ganancia o es alta y más ruido.

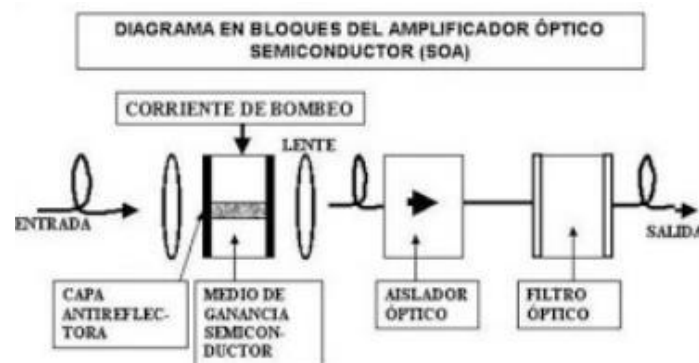


Figura 15. Amplificador SOA (Cruz, 2017).

BOA amplificador óptico de refuerzo de banda: Mediante múltiples capas activas acopladas creando zonas donde electrones excitados eléctricamente son estimulados por la señal de luz produciendo fotones que se unen a la señal amplificándola sucesivamente. Usado con señales monocromáticas con múltiples longitudes de onda en casos que se conoce la polarización. Este amplificador mejora la ganancia vs las pérdidas, pero todavía se tiene niveles de ruido altos



Figura 16. Amplificador BOA de 14 pines (Thorlabs, Amplificadores ópticos de refuerzo de banda O, 2022).

EDFA amplificador de fibra dopada con Erblio: Tiene un sistema de bombeo externo de un láser con una frecuencia superior al de la señal transmitida en el mismo sentido, lo que provoca que las señales de luz de la información transmitida se amplifiquen mediante la transmisión de energía de la señal más energética a la señal menos energética, este proceso se sucede en unos pocos metros de fibra lenta. Estos amplificadores son los que proporcionan una mejor calidad de señal con menos ruido, pero su costo es considerable.

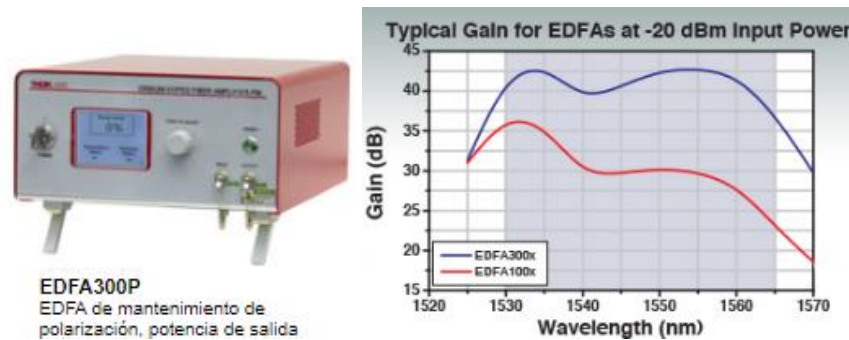


Figura 17. Amplificador de fibra dopada EDFA

RAMAN se basan en el efecto del mismo nombre, basado en la interacción no lineal entre la luz transmitida óptica y la luz bombeada en sentido contrario con más de 2 diodos de bombeo, conectados directamente a la fibra de transmisión (Cruz, 2017). Este amplificador se puede integrar a los EDFAs con excelentes resultados en la calidad de la señal amplificada, pero es más costos que los anteriores.



Figura 18. Amplificador RAMAN (Santiago, 2022).

Atenuador óptico: como su nombre lo indica es necesario para atenuar la potencia de la señal antes de llegar al receptor óptico, caso contrario produciría daños en el instrumental sensible a la luz, también sirve para igualar la potencia en las ramas derivadas en una red PON regulando y estabilizando la señal (UIT, 1996).



Figura 19. Atenuadores de fibra óptica (ArpaTel, 2022).

2.2.2.3. **Grupo de elementos para la recepción:** Conformado básicamente por receptores ópticos que son los encargados de transformar la señal de luz a señales eléctricas, mediante un fotoreceptor, esta señal luego se filtrará para su correcta codificación.

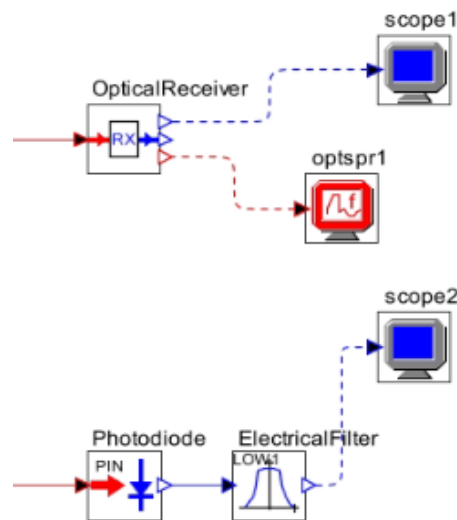


Figura 20. Grupo de elementos para la recepción (autoría propia generado en OptSim)

Receptores ópticos: son instrumentos capaces de transformar la energía de lumínica que incide en una superficie sensible en energía eléctrica, donde los fotones absorbidos generan electrones que inciden en un campo eléctrico, lo que resulta una corriente que genera tensión a este proceso se llama transducción.

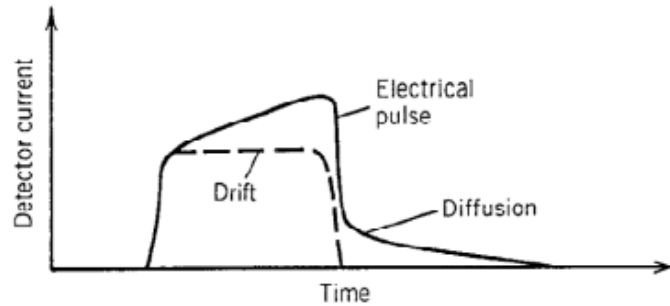


Figura 21. Respuesta de un fotodiodo a un pulso de luz (Muriel, 2006).

Fotodiodo PIN: se caracteriza por poseer una capa Intrínseca (región de agotamiento) de un material semiconductor (InGaAs) no dopado, entre las capas P y N, que cuando se proporciona un potencial al diodo la capa I se reduce, que junto con los pares electrones hueco que se forman por la incidencia de la luz, provocan que la corriente fluya y un pulso de luz se transforme en un pulso eléctrico. El PIN tiene las siguientes ventajas: alta sensibilidad a la luz, alta velocidad de respuesta, amplio ancho de banda, bajo costo, genera poco ruido; así mismo tiene las siguientes desventajas: la tensión aplicada debe ser baja, sensibilidad a cualquier tipo de luz, requiere amplificación para bajos niveles de luz. (ElectrónicaOnline, 2022)

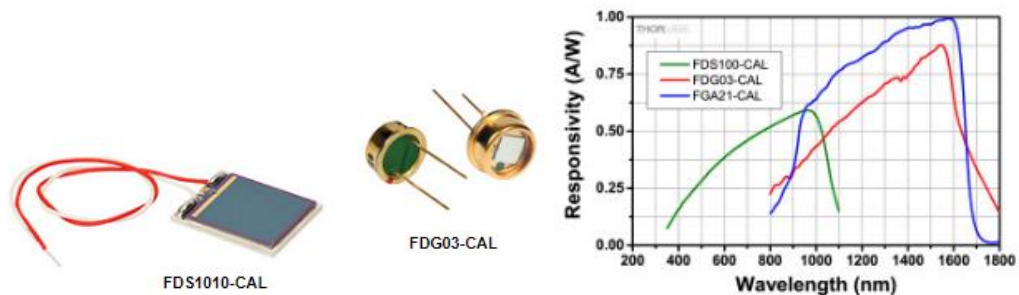


Figura 22. Fotodiodos de Si y InGaAs y tabla de responsividad (ThorLabs, Fotodiodos calibrados, 2022).

Fotodiodo APD o de avalancha: aquí el par electrón hueco generado por la estimulación del haz de luz es acelerado en un campo electromagnético intenso para que por impacto ionizan el material semiconductor generando nuevos pares electrones hueco, creando una avalancha de pares electrones huecos, dando las siguientes ventajas como: mayor sensibilidad que los PIN, mejor responsividad.

Pero tiene las siguientes desventajas como: mayor complejidad en su construcción, mayor ruido, mayor costo, mayor consumo de potencial eléctrico, genera calor (Muriel, 2006).

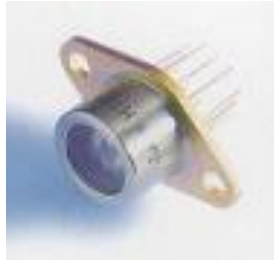


Figura 23. Fotodiodo APD (Network, 2019).

Filtros eléctricos pasivos: son selectores de rango para la señal eléctrica recibida conforme parámetros establecidos, lo que permite eliminar ruido, sin la necesidad de estar conectados a una fuente eléctrica, así tenemos:

Filtro pasa bajos: estos discriminan la señal desde 0 Hz hasta un umbral definido, para frecuencias superiores se produce una atenuación hasta el umbral definido, quedando una señal más baja que el umbral.



Figura 24. Filtro pasa bajos EF120 (ThorLabs, Filtros eléctricos de pasa bajo, alimentación directa BNC, 2022).

Filtro pasa altos: donde solo permite el paso de señales superiores a una frecuencia baja definida.



Figura 25. Filtro pasa altos EF121 (ThorLabs, Filtros eléctricos pasa alto, alimentación directa BNC, 2022).

Filtro pasa banda tiene definido en un rango superior e inferior de frecuencias, es la unión de los dos anteriores.

2.3. Red PON.

Es una red de fibra óptica pasiva es decir no utiliza elementos eléctricos intermedios de amplificación electro-ópticos, caracterizada por presentar la arquitectura FTTX (Fiber To The Home, office building cab), que es basada en una topología punto multipunto (P2MP), mediante el uso de splitters.

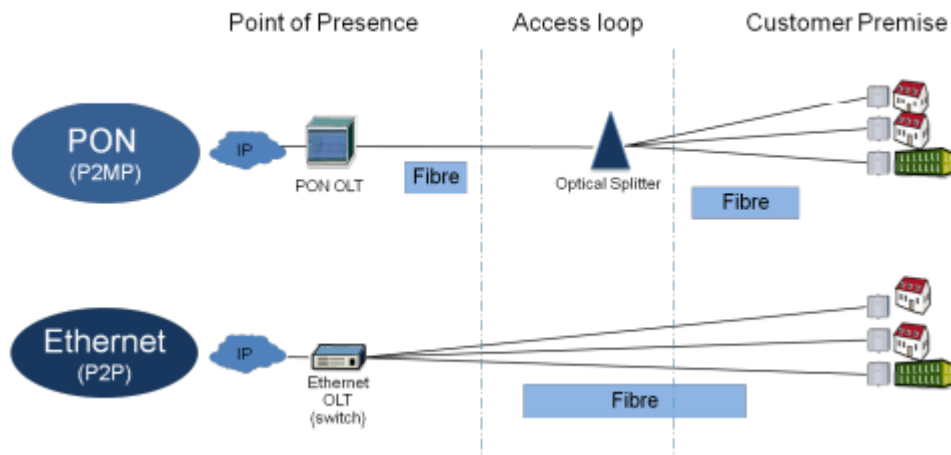


Figura 26. Diferencia entre redes de fibra óptica (Concil, 2016).

A diferencia de las redes activas, las redes pasivas requieren un suministro eléctrico solo en los puntos de envío y recepción, lo que le convierte en un sistema más eficiente en diseño, operación y costo, por lo que son usadas para transmitir señales hacia y desde los puntos finales de usuario, ya que proveen gran ancho de banda con alta velocidad de transmisión (VIAVI, Red óptica pasiva (PON), 2019).

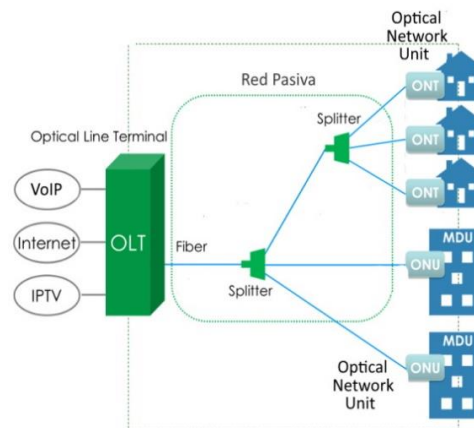


Figura 27. Arquitectura red PON (4itNetworks, 2022).

Las definiciones y normativas para los sistemas accesos ópticos basado en redes ópticas pasivas, se hallan descritas en la recomendación G.983.1 de la UIT-T (Unión Internacional de Telecomunicaciones) de enero del 2005, la que garantiza una correcta

implementación de servicios sobre la red PON reglamentado a las operadoras para que los servicios lleguen de manera eficaz a los usuarios (UIT-T, G.983.1 Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas, 2005).

Actualmente en el mercado se encuentra distribuido las redes GPON o giga las cuales se han convertido el estándar, con una velocidad de 2.4 Gbit/s, usando un emisor laser Fabry-Perot con una distancia entre ONU y OLT de 20 Km (UIT-T, G.984.1 Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits: Características generales, 2003), esto se encuentra normada por la UIT-T recomendación G.984.1.

En la red PON las OLT origen de la señal óptica que se encuentra en el proveedor de servicios de donde se distribuyen las fibras ópticas que luego de sucesivos splitters en la red de distribución llega a las ONU finales. Las fibras alimentadoras pueden prestar el servicio dividiéndose hasta en 256 y estos hasta en 64 ONU, lo que resulta en una gran cobertura (VIAVI, Red óptica pasiva (PON), 2019).

La transmisión en las redes PON se basa en la multiplexación por longitud de onda (WDM) descomponiendo la luz blanca en sus diferentes colores los cuales cada uno lleva bits de información, conviviendo en la misma fibra, también para poder atender varios usuarios finales y evitar colisiones se utiliza el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA).

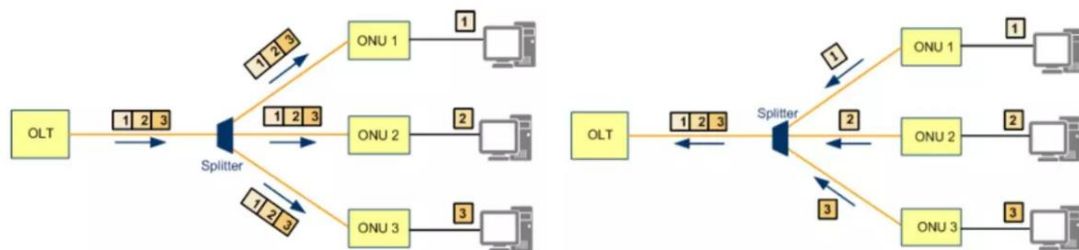


Figura 28. Tráfico ascendente (TDMA) y descendente desde múltiples ONU (Lopez A. , 2022).

Actualmente las redes de fibra óptica están basadas en GPON, pero ya se consideran anticuadas y se han desarrollado varias líneas de investigación de nuevos estándares trazando una hoja de ruta por la FSAN (Full Service Access Network) que es una agrupación mundial de proveedores de servicio, laboratorios de investigación y fabricantes de equipos de las redes ópticas, para tener redes de transmisión de mayor ancho de banda a mayores velocidades o implementación de modulaciones, etc.

En el 2018 después de un trabajo conjunto entre la IEEE y la UIT determinaron que la siguiente generación de las redes PON será de 50 Gbps, con la intención de masificar las redes HSP (Optronics, 2021).

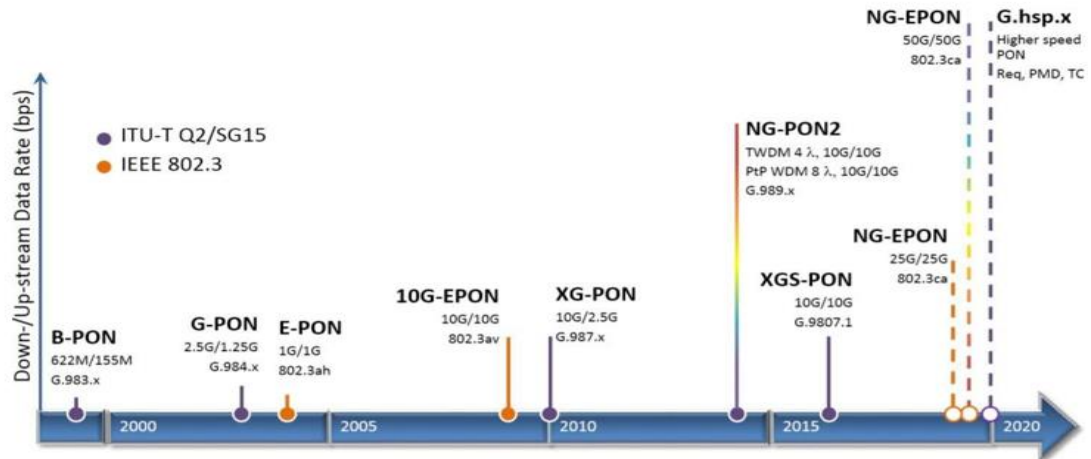


Figura 29. Desarrollo estándares PON (Heynen, 2017).

2.4. Modulación óptica.

En el desarrollo de las redes PON por tener mayor capacidad y cada vez más usuarios, se presenta problemas como aumento en las dispersiones lo que causa degradación de la señal con la generación de ruido, limitando la velocidad y la distancia, para evitar esto se puede utilizar el método de pre compensación eléctrica sobre una señal NRZ mediante un modulador Mach-Zender (Garcia A. , 2009).

Entonces para poder transmitir mayor cantidad de información codificada o ancho de banda, se utiliza las técnicas de modulación de señal.

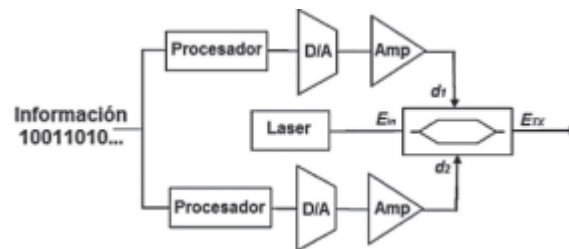


Figura 30. Funcionamiento de un pre compensador (Garcia A. , 2009).

2.4.1. Codificación.

La información lógica que va ser transmitida a través de la fibra óptica debe ser transformada primero en dominio eléctrico para luego pasarse al dominio analógico de la luz, para lo cual se utiliza la codificación donde la más utilizada es:

Código no retorno a cero NRZ es una codificación binaria de 2 valores (1 o 0), donde se asigna diferentes valores de tensión eléctrica para cada bit, el cual se mantiene todo el tiempo de bit, sin retornar el valor de 0 voltios, sino que directamente pasa al valor del siguiente bit, que luego transformado en un modulador un nivel alto de luz es un uno y un valor bajo representa un 0, es la señal básica utilizada para la transmisión de la información, la mayor ventaja de su uso es que para pulsos de larga duración requieren menos ancho de banda compara con otras codificaciones.

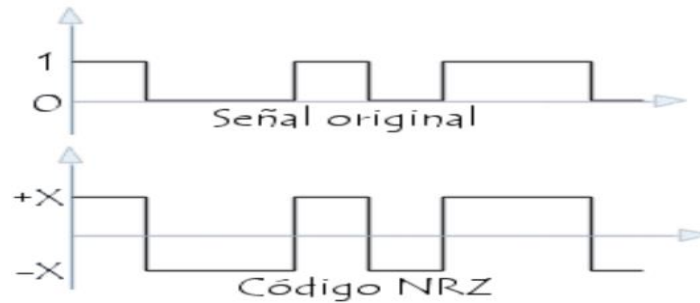


Figura 31. Equivalencia con Codificación NRZ (Arias, 2008).

2.4.2. Esquemas de modulación.

Modular es incluir varias señales sobre una misma onda sinusoidal llamada portadora lo que optimiza la comunicación, pues va mas información, protegida de interferencia y ruido. Entonces para modular una señal se modifica controladamente cualquier parámetro que forma la señal, tales como fase o amplitud (Monter, 2018).

2.4.2.1. Modulación de fase (PSK).

O de ángulo es cuando la onda de luz al atravesar el cristal del modulador de Niobato de Litio al que se le aplica voltaje, el cual cambia su índice de refracción provocando el cambio de ángulo del plano de propagación de la luz diferente al de la entrada, resultando en cambio del ángulo, sin alterar la frecuencia ni la amplitud. Este tipo de modulación no es muy utilizado por la complejidad de los equipos para demodular. Pero muy importante si se requiere sumar amplitudes al estar en fase o cancelar si las señales están desfasadas.

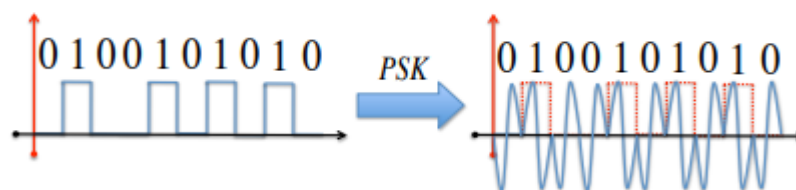


Figura 32. Señal digital modulada en fase (Lazaro, 2015).

2.4.2.2. Modulación de Amplitud (ASK)

Es la diferenciación de los bits asignándoles diferentes amplitudes a los valores binarios resultado de la variación de la intensidad de la señal, específicamente como se transmite una señal NRZ, para lograr esta diferenciación se utiliza los moduladores Mach-Zehnder.

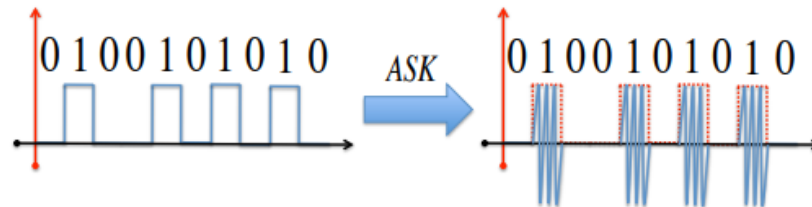


Figura 33. Señal digital modulada en amplitud (Lazaro, 2015).

2.4.2.3. Modulación de Pulsos (PAM)

Derivada de modulación de amplitud, donde se mantiene constantes los valores de frecuencia y fase están fijos, creando diferentes amplitudes para cada pulso sobre una portadora; así dado el número de amplitudes que se definen, se da el nombre a la modulación m PAM, donde se indica el número de pulsos de señales que lleva la señal, debido a que se optimiza el espectro de la señal (Arevalo, 2019).

PAM4 tiene 4 niveles de señal por ciclo de reloj, lo que corresponde a 2 bits de información en los estados: 00, 01, 10 y 11 (Lopez J. , 2020), como se utiliza el ancho de banda del NRZ y se transmite 2 bits resulta en la duplicación del ancho de banda, esta tecnología ya se propuso en el estándar IEEE 802.3bs para transmisiones de alta velocidad donde se duplica la velocidad de transmisión de bits sin aumentar la velocidad en baudios. O si se mantiene la velocidad de transmisión de bits, requerirá la mitad de baudios de transmisión, lo que resulta en reducción de pérdidas.

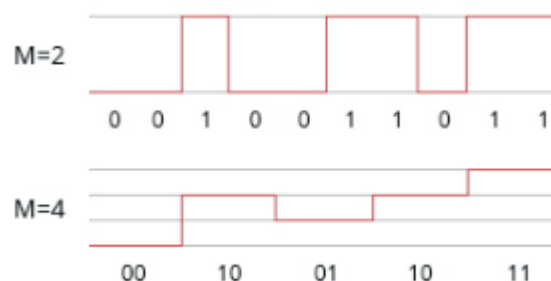


Figura 34. Pulsos NRZ vs PAM4 (community, ¿Qué es PAM4 y cuáles son las diferencias entre PAM4 y NRZ?, 2022).

PAM8 tiene 8 niveles de señal por ciclo de reloj, lo que corresponde a 3 bits de información en los estados: 000, 001, 010, 100, 101, 011, 110 y 111, resultando en una optimización aun mayor del ancho de banda donde se duplica la velocidad obtenida por PAM4 para cada baudio. Pero mientras más se aumente la cantidad de niveles, el diagrama de ojo o la distancia de amplitud entre los mismos es más pequeña lo que hará que se cierre haciendo más difícil la identificación de los bits en recepción.

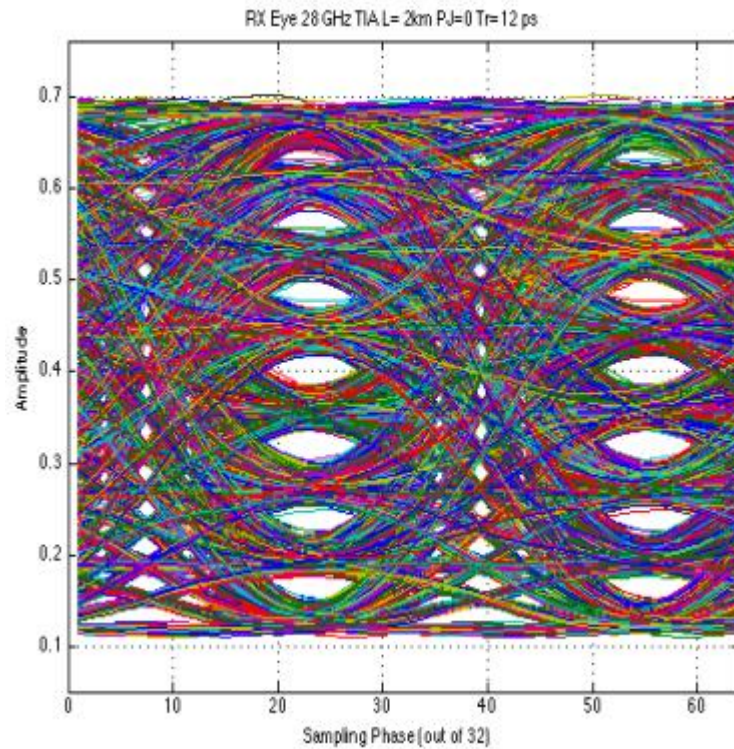


Figura 35. Diagrama de ojo PAM8 (Ghias, 2012).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo de Investigación

El presente trabajo se enmarca en el tipo de investigación evaluativa, ya que se mide en simulaciones de transmisiones en una red PON la cual es típicamente es utilizada para proveer servicios de acceso a datos con alta velocidad, para ver los efectos del uso de modulación por amplitud de pulsos PAM4 y PAM8, evaluando los resultados de potencia recibida con el rango de errores BER, sobre el diagrama del ojo generado y efectos en el diseño de la red PON.

3.2. Diseño de Investigación

El diseño de investigación que más se acerca a lo realizado es la investigación acción empírica (Gonzalez J. , 2018), ya que se evaluará las situaciones generadas en las simulaciones de transmisión y se realizará recomendaciones para transmisiones sobre una red PON.

3.3. Unidades de Estudio

Las unidades de estudio son las simulaciones de transmisiones de datos en una red PON usando modulación PAM4 y PAM8 y sus resultados de potencia recibida y BER generado.

Población

Es la red PON diseñada donde se realizará modificaciones en las condiciones de transmisión, para que mediante simulaciones controladas analizar en recepción los resultados de potencia y BER.

Muestra

Es la transmisión de paquetes de 100000 bits con modificaciones en atenuación y velocidad de transmisión, en los cuales se evaluará los resultados de la muestra utilizada midiendo potencia recibida y rango de errores.

3.4. Técnicas de recolección de datos

La técnica utilizada para la recolección de datos es la tabulación de los resultados del BER generado y potencia recibida en cada iteración de las simulaciones, en la que se ha cambiado sucesivamente el nivel de atenuación posible que se presente en una transmisión.

3.5. Técnica de Análisis de Datos

Para el análisis de los datos obtenidos en las simulaciones se requerirá realizar graficas logarítmicas las que permitirán realizar un análisis comparativo de las iteraciones, sea variando el valor de atenuación o el tipo de modulación de señal.

3.6. Operacionalización de Variables

Atenuación db	PAM4		PAM8	
20			33.33 GB/s	
21			33.33 GB/s	
22			33.33 GB/s	
23	50 GB/s		33.33 GB/s	16.6 GB/s
24	50 GB/s		33.33 GB/s	16.6 GB/s
25	50 GB/s			16.6 GB/s
26	50 GB/s	25 GB/s		16.6 GB/s
27	50 GB/s	25 GB/s		
28		25 GB/s		
29		25 GB/s		
30		25 GB/s		
31		25 GB/s		

Tabla 2. Valores de las variables de ancho de banda y atenuación

CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

4.1. Software de simulación.

Para la presente investigación se utilizó 2 aplicaciones, una para simular la red PON y su transmisión llamada Optsim, junto con Matlab aplicación que permite integrar los elementos lógicos de transmisión y recepción.

4.1.1. OptSim.

Software desarrollado por RSoft Desing Group, liberado al mercado desde 1998, especializado para el diseño y simulación de sistemas de comunicación en fibra óptica, con el fin de evaluarlos (Poveda, 2016).

Su interfaz es amigable e intuitiva, con más de 400 elementos de red necesarios para diferentes simulaciones, sean en el dominio de tiempo o de la frecuencia. Puede integrarse con equipos de laboratorio para pasar de la simulación a la experimentación. Además, tiene una interfaz en MathLab para desarrollar simulaciones personalizadas.

OptSim es utilizado para realizar diseños de sistemas de comunicación ópticos, como redes FTTx PON, modulados como m PAM utilizado en este trabajo, además también se puede simular:

- Sistemas ópticos coherentes: PM-QPSK, PM-QAM u OFDM.
- Modulaciones como: BPSK, QAM o PAM.
- Uso de amplificadores como EDFA, Raman o SOA.
- Redes PON FTTx
- Redes analógicas y digitales.
- Redes de larga distancia sean terrestres o submarinas.

4.1.2. MathLab.

Aplicación para análisis numérico proporcionando un entorno de desarrollo con un lenguaje propio para realizar análisis de datos, algoritmos, modelar aplicaciones y diseños de sistemas (MathWorks, ¿Qué es MATLAB?, 2022).

Matlab permite desarrollar simulaciones, gracias a sus bibliotecas incorporadas, no requiere compilador para su ejecución y además las siguientes características: (MathWorks, Descripción del producto MathLab, 2022)

- Interface orientada al diseño y solución de problemas
- Lenguaje de 4ta generación
- Herramientas gráficas para la visualización de datos y diagramas personalizables
- Herramientas para análisis de señales
- Herramientas para creación aplicaciones con interfaces de usuario
- Interfaces para. C, C++, Java, .NET, Python, SQL, Hadoop, Excel

4.2. Diseño de ambiente de simulación.

Para este trabajo se diseña una red PON con sus 3 elementos: transmisión, transporte y recepción, con sus respectivos elementos configurados para las diferentes situaciones propuestas en esta simulación:

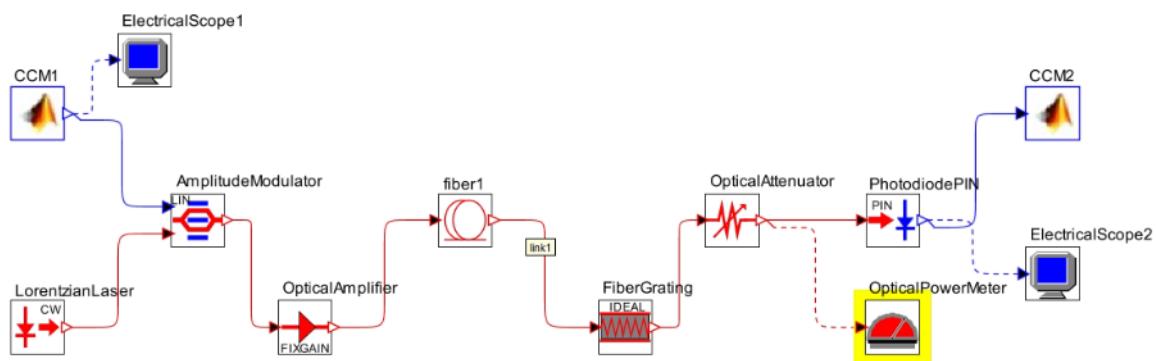


Figura 36. Diseño red PON para simulación (autoría propia generado en OptSim).

4.2.1. Módulo de generación de señal

El modulo generador construido en una simulación de MathLab CCM1, el cual generar un flujo de 106494 de señales binarias NRZ de forma aleatoria, integrado con un modulador de señal que puede configurarse para PAM 2, 4 u 8, en la función $a = \text{pammod}(b, M)$, también es configurable la cantidad de muestras por ciclo, además de integrar un pre compensador de señal para corregir los efectos causados por el canal de transmisión, para los diferentes niveles de voltaje requerido para la correspondiente modulación elegida, para efectos de control se presenta una gráfica de bits transmitidos.

CODIFICACION GRAY PARA PAM 4		
SIMBOLO	NIVEL DE VOLTAJE	PRE DISTORSIÓN
10	+3	3
11	+1	1.8
01	-1	0.8
00	-3	0

Tabla 3. Configuración MathLab para pre distorsión en codificación Gray para PAM4

CODIFICACION GRAY PARA PAM 8		
SIMBOLO	NIVEL DE VOLTAJE	PRE DISTORSIÓN
100	+7	7.3
101	+5	6.2
111	+3	5.1
110	+1	3.9
010	-1	2.8
011	-3	1.75
001	-5	0.8
000	-7	0

Tabla 4. Configuración MathLab para pre distorsión en codificación Gray para PAM8

4.2.2. Generador laser

En el diseño se simula un generador de luz coherente en un láser linear de emisión Lorentziana de onda continua.

4.2.3. Modulador de amplitud

El modelo implementa un modulador de amplitud Mach-Zhender, para transformar la señal eléctrica a óptica en términos de potencia lumínica de salida vs voltaje aplicado.

4.2.4. Amplificador óptico

Un amplificador de ganancia fija para la señal, sobre fibra dopada con erbio EDFA, para fijar niveles de potencia para todo el enlace y genera poca saturación del medio, configurado con 10 dB para todas las diferentes simulaciones.

4.2.5. Fibra

Fibra monomodo estándar configurado a una longitud de 20 Km, con una pérdida de 0.25 dB/Km, una dispersión de 17 ps/nm/Km.

4.2.6. Compensador de rejilla

Componente de simula un compensador de la dispersión causada por la longitud de la fibra óptica sin afectar la potencia óptica, para el ensayo configurado a -340 ps/Km lo que es correspondiente al ítem anterior.

4.2.7. Atenuador

Se incluye en el diseño un atenuador óptico de amplitud, este elemento se utilizará con valores variables para encontrar el comportamiento de las propuestas de simulación midiendo la potencia recibida.

4.2.8. Fotodiodo PIN

El foto receptor implementado genera una corriente de salida dependiente de la potencia óptica que ingresa (responsividad), Se configurará a un ancho de banda que dé como resultados una transmisión de 25 y 50 GHz dependiendo de las simulaciones realizadas.

4.2.9. Módulo de recepción de señal

Modulo diseñado en MathLab encargado de demodular la señal eléctrica a datos binarios, en el cual también deben estar configurados el nivel de PAM, numero de muestras conforme al módulo de generación, además de los umbrales amplitud de cada señal. Este módulo puede generar el diagrama de ojo y también calcula el rango de error de bits recibidos (BER) y como elemento de control una gráfica de bits recibidos.

Existen otras configuraciones que se incorporaran en el modelo de OptSim así: para los diferentes anchos de banda que se configuran en el modelo se configurará el número de muestras por bit que para este trabajo será 8, el bitrate en Giga Baudios por segundo, necesarios para lograr las velocidades propuestas, también se configura un tiempo de ensayo o timespan para asegurar que llegue a recepción por lo menos una muestra de 100000 bits configurada en la generación.

4.3. Análisis de datos

Los datos recolectados de cada ensayo se tabularán y usando la función de grafico logarítmica de MathLab se realizará un análisis comparativo de la modulación utilizada con un aumento en la velocidad de transmisión y su relación con el ancho de banda de transmisión, se validará el resultado del BER con el aumento de la atenuación.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN DE LA PROPUESTA

5.1. Simulación PAM4 para 50Gbits/s

5.1.1. Parámetros

- Longitud de fibra óptica 20Km
- Perdida 0.25 dB/Km
- Amplificación 10 dB
- Compensación por dispersión -340 ps/Km
- Muestra 106494 bits transmitidos
- 8 muestras por bit
- Atenuación variable en dB
- Tiempo de transmisión 1773 ns
- Ancho de banda 25 Ghz para 50Gbits/s
- Bitrate 25 GBs
- Pre compensación activada para niveles: 1 -20%, nivel 3 +20%.

5.1.2. Procedimiento.

- a) Se procede a diseñar la red PON con sus elementos básicos, luego configurar los elementos con los valores indicados
- b) Correr una iteración para definir un valor línea base donde el resultado del BER sea distinto de 0.
- c) Aumentar la atenuación y corre la simulación nuevamente
- d) Evaluar diagrama de ojo generado
- e) Configurar valores de umbral en la recepción
- f) Tabular valor de BER vs potencia de señal recibida
- g) Repetir la iteración desde el punto c)

5.1.3. Resultados.

Se define una la línea base o atenuación inicial donde el valor del BER es mínimo, de aquí se aumentará gradualmente el valor de la atenuación hasta tener un valor alto de VER ya no aceptable para una transmisión, para esta simulación es de 26 dB.

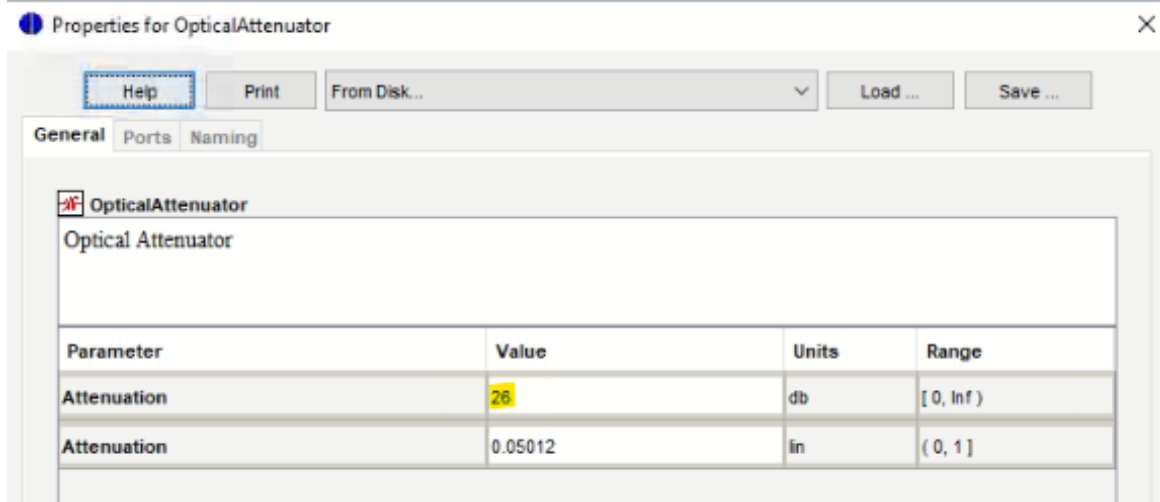


Figura 37. Configuración de atenuación simulación PAM4 50 Gb/s.(generado en OptSim)

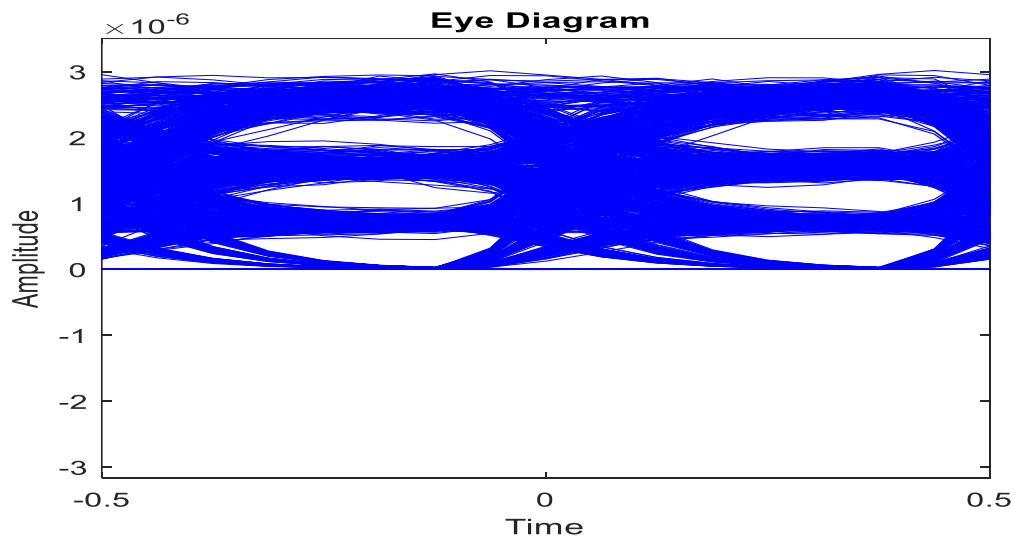


Figura 38. Diagrama de ojo simulación PAM4 50 Gb/s. (generado en MathLab)

También es importante realizar una evaluación visual si existe coherencia entre los bits transmitidos con los recibidos, para lo que se compara las gráficas generadas, las que nos indican que no hay pérdidas, llegando la señal en todos sus niveles.

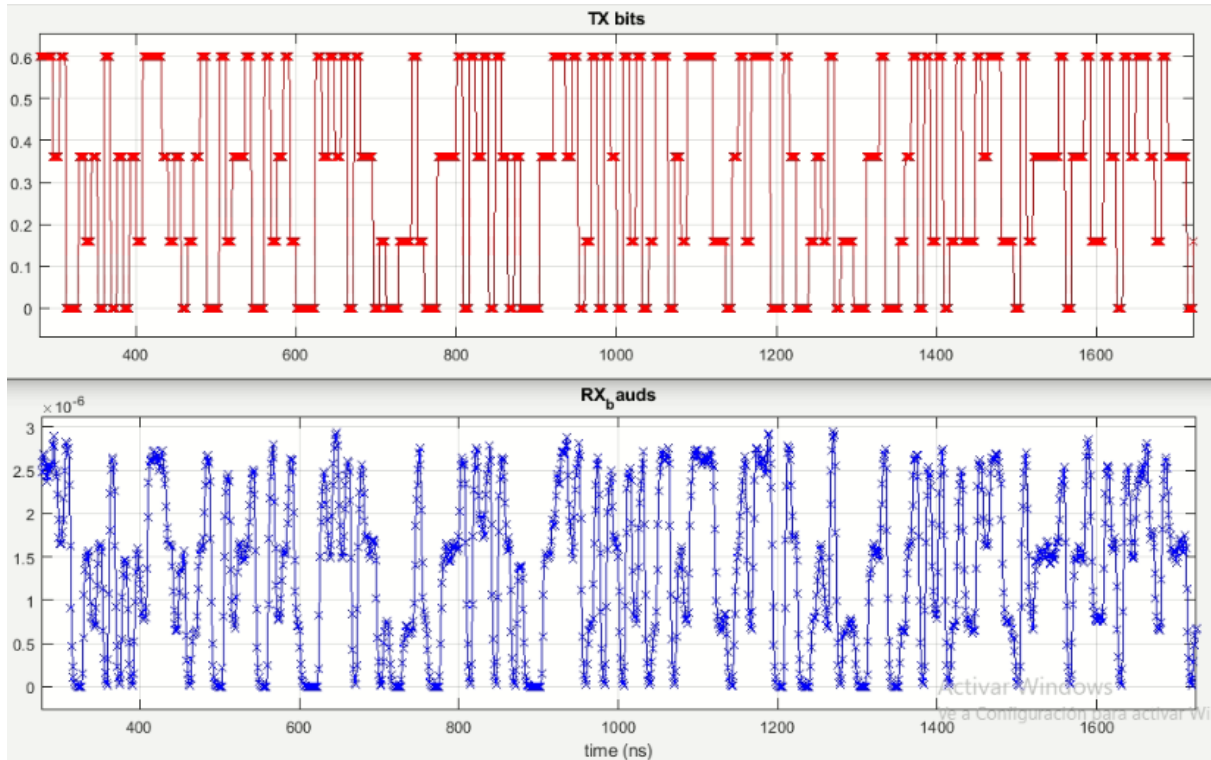


Figura 39. Diagramas de bits transmitidos y bits recibidos simulación PAM4 50 Gbit/s. (generado en MathLab).

Después de la iteración de línea base se progresará aumentando los valores de atenuación para recolectar los valores de potencia recibida y BER, hasta que se tenga un valor más grande donde no sea aceptable la cantidad de errores recibidos. Estos valores se tabulan y grafican.

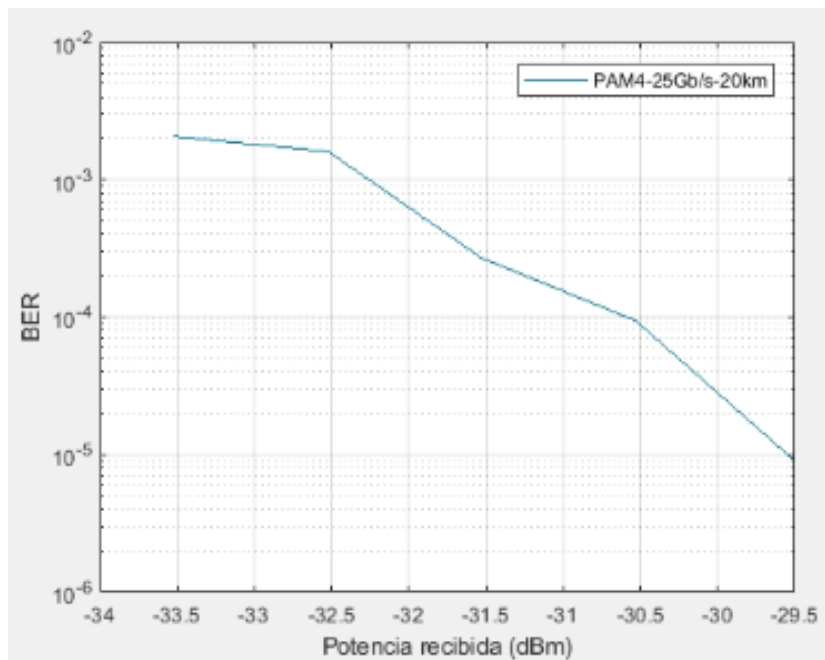


Figura 40. Diagramas BER vs potencia recibida simulación PAM4 50 Gbits/s. (generado en MathLab).

5.2. Simulación PAM4 para 100Gbits/s

5.2.1. Parámetros

- Longitud de fibra óptica 20Km
- Amplificación 10 dB
- Perdida 0.25 dB/Km
- 106494 bits transmitidos
- Compensación por dispersión -340 ps/Km
- 8 muestras por bit
- Atenuación variable en dB
- Tiempo de transmisión 886 ns
- Ancho de banda 50 Ghz, para 100 Gbits/s
- Bitrate 50 GBs
- Pre compensación activada para los niveles: 1 -20%, nivel 3 +20%

5.2.2. Procedimiento.

- a) Sobre el diseño de red PON existente, configurar los elementos con los valores indicados.
- b) Correr una iteración para definir un valor línea base donde el resultado del BER sea distinto de 0.
- c) Aumentar la atenuación y corre la simulación nuevamente
- d) Evaluar diagrama de ojo generado
- e) Configurar valores de umbral en la recepción
- f) Tabular valor de BER vs potencia de señal recibida
- g) Repetir la iteración desde el punto c)

5.2.3. Resultados.

Se define una la línea base o atenuación inicial donde el valor del BER es mínimo, de aquí se aumentará gradualmente el valor de la atenuación hasta tener un valor alto de BER ya no aceptable para una transmisión, para esta simulación es de 23 dB.

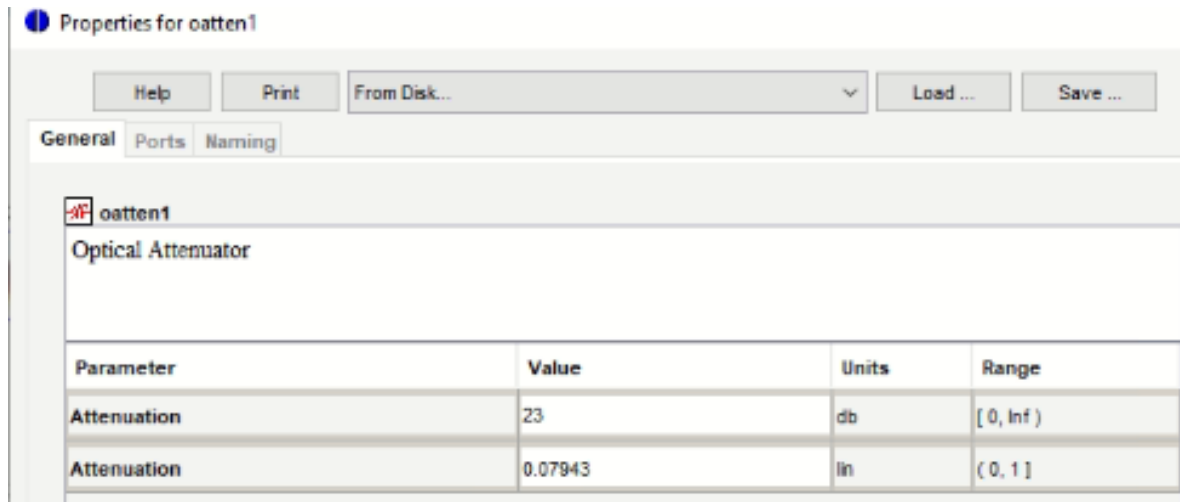


Figura 41. Configuración de atenuación simulación PAM4 100Gb/s. (generado en OptSim)

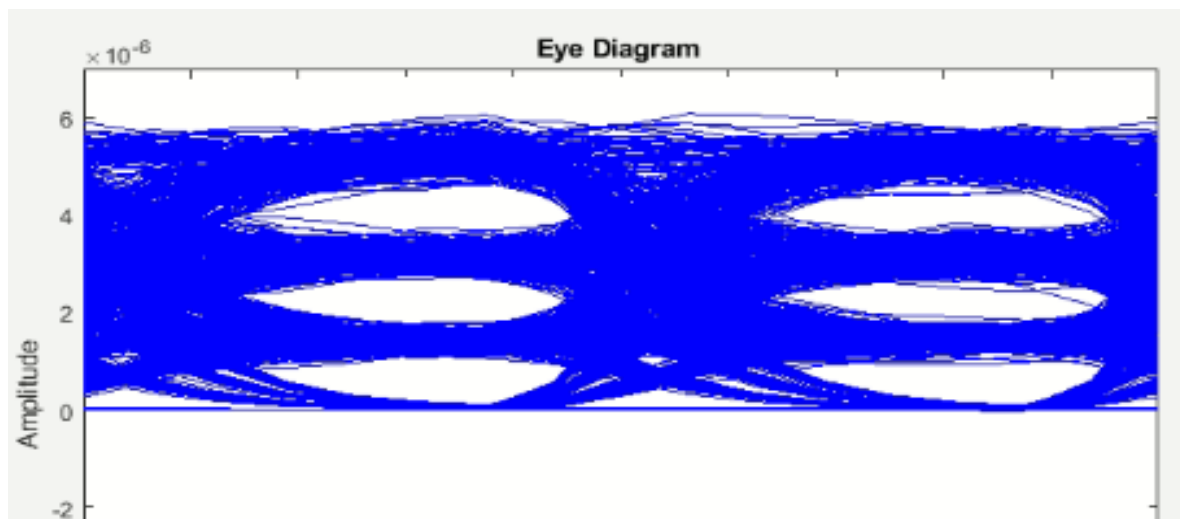


Figura 42. Diagrama de ojo simulación PAM4 100Gb/s. (generado en MathLab).

Después realizar evaluación visual para validar si existe coherencia entre los bits transmitidos con los recibidos, para lo que se compara las gráficas generadas, las que nos indican que no hay pérdidas, llegando la señal en todos sus niveles.

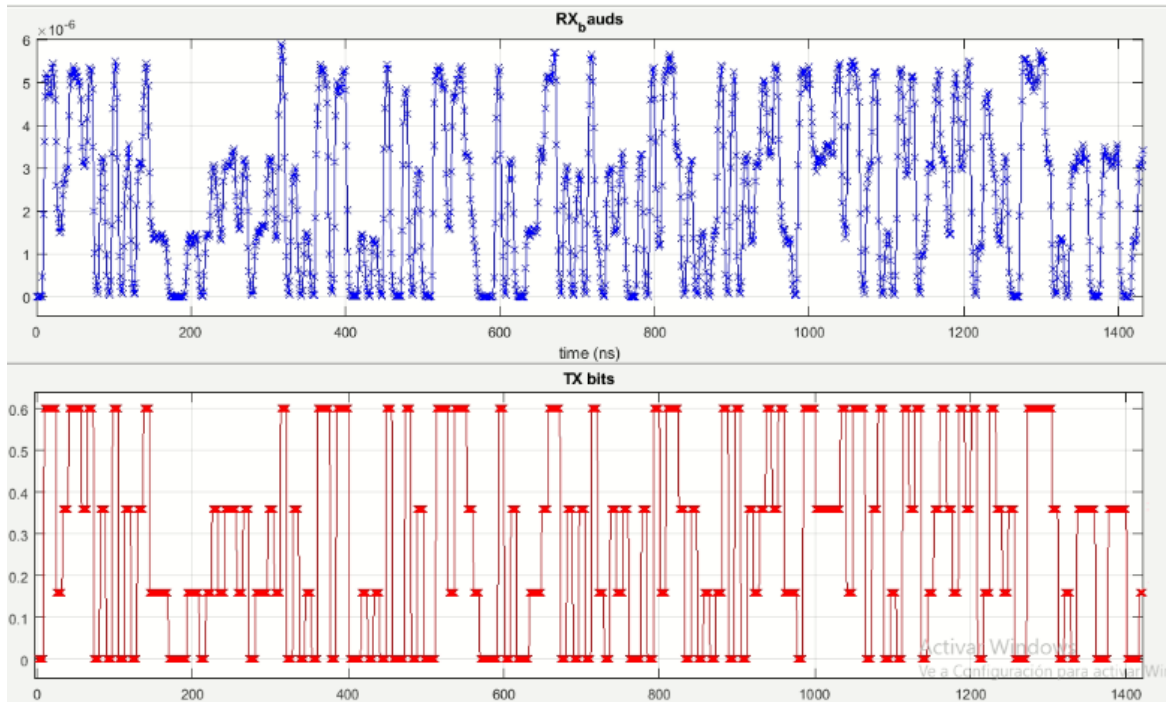


Figura 43. Diagramas de bits transmitidos y bits recibidos simulación PAM4 100Gbits/s. (generado en MathLab).

Después de la iteración de línea base se progresará aumentando los valores de atenuación para recolectar los valores de potencia recibida y BER, hasta que se tenga un valor más grande donde no sea aceptable la cantidad de errores recibidos. Estos valores se tabulan y grafican.

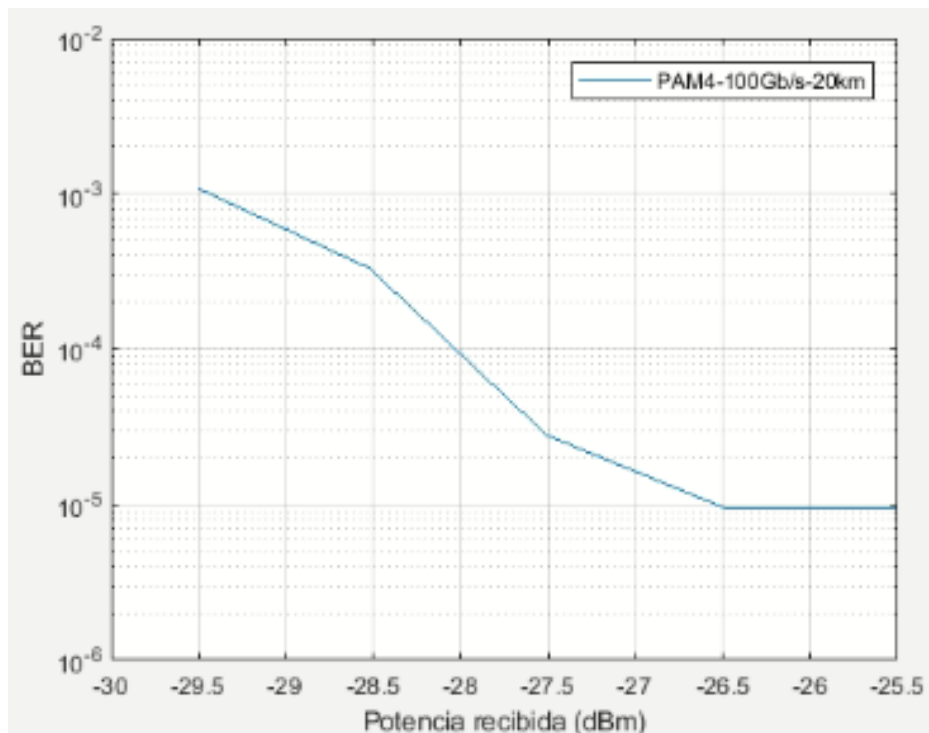


Figura 44. Diagramas BER vs potencia recibida simulación PAM4 100Gbits/s. (generado en MathLab).

5.3. Comparativa de resultados simulaciones PAM4

Con la información anterior recopilada entre una transmisión a 50 Gb/s y 100 Gb/s, se procedió a realizar la gráfica comparativa del BER con respecto a la potencia que llega al receptor (potencia recibida) cuando se usa modulación PAM4. Considerando un BER objetivo de $1e-3$, dado que es el BER mínimo para, mediante el uso de corrección de errores hacia adelante - FEC- se puedan alcanzar valores de BER mejores, como $1e-9$, nótese en la figura 45, que para un enlace de 20km con modulación PAM4 se logra ese BER cuando se tiene una potencia de -32.5 dBm para una transmisión a 50 Gb/s, mientras que con una velocidad de transmisión de 100 Gb/s el mismo BER requiere una potencia en el receptor de al menos -29.5 dBm. Es decir, existe una penalidad de 3dB al pasar de 50 a 100 Gb/s con PAM4. Para un mejor BER, por ejemplo, $1e-5$, puede verse a su vez en la gráfica que se requieren -29.5 dBm de potencia recibida cuando se transmite a una tasa de 50Gb/s mientras que la potencia para alcanzar ese BER transmitiendo a 100Gb/s es de -26.5 dBm. Es evidente que la penalidad de 3dB entre 50 y 100 Gb/s se mantiene. Esto significa que para lograr un mismo BER alcanzado con PAM4 a 50Gb/s se tiene que duplicar la potencia si el bitrate sube a su vez al doble, i.e. a 100 Gbs. Recuérdese que la ventaja de transmitir a estas velocidades con PAM 4 es que el ancho de banda requerido para el sistema y el canal está relacionado con la tasa de baudios (Bd), que es respectivamente de 25GBd/s y 50 GBd/s, es decir que el ancho de banda con el que se logra transmitir a 50 Gb/s es de 25 GHz y el de 100Gb/s es de 50 GHz (la mitad de lo que se necesitaría si la transmisión fuera con PAM2 NRZ).

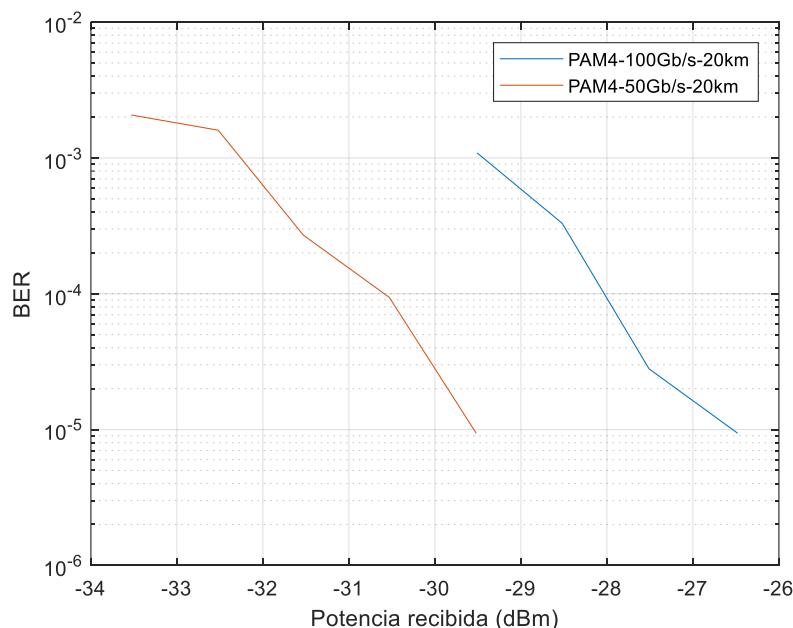


Figura 45. Diagramas BER vs potencia recibida en simulaciones PAM4 a 50 Gb/s y 100Gb/s. (generado en MathLab).

5.4. Simulación PAM8 para 50 Gbits/s

5.4.1. Parámetros

- Longitud de fibra óptica 20Km
- Muestra 106494 bits transmitidos
- 8 muestras por bit
- Perdida 0.25 dB/Km
- Compensación por dispersión -340 ps/Km
- Amplificación 10 dB
- Atenuación variable en dB
- Tiempo de transmisión 1780 ns
- Ancho de banda 16.66 Ghz, 50 Gbits/s
- Bitrate 16.66 GBs
- Pre compensación activada para los niveles: 1 -20%, nivel 2 -25%, nivel 3 -20%, nivel 4 -10%, nivel 5 +10%, nivel 6 +20%, nivel 7 +30%

5.4.2. Procedimiento.

- a) Sobre el diseño de red PON existente, configurar los elementos con los valores indicados.
- b) Correr una iteración para definir un valor línea base donde el resultado del BER sea distinto de 0.
- c) Aumentar la atenuación y corre la simulación nuevamente
- d) Evaluar diagrama de ojo generado
- e) Configurar valores de umbral en la recepción
- f) Tabular valor de BER vs potencia de señal recibida
- g) Repetir la iteración desde el punto c)

5.4.3. Resultados.

Se define una la línea base o atenuación inicial donde el valor del BER es mínimo, de aquí se aumentará gradualmente el valor de la atenuación hasta tener un valor alto de VER ya no aceptable para una transmisión, para esta simulación es de 23 dB.

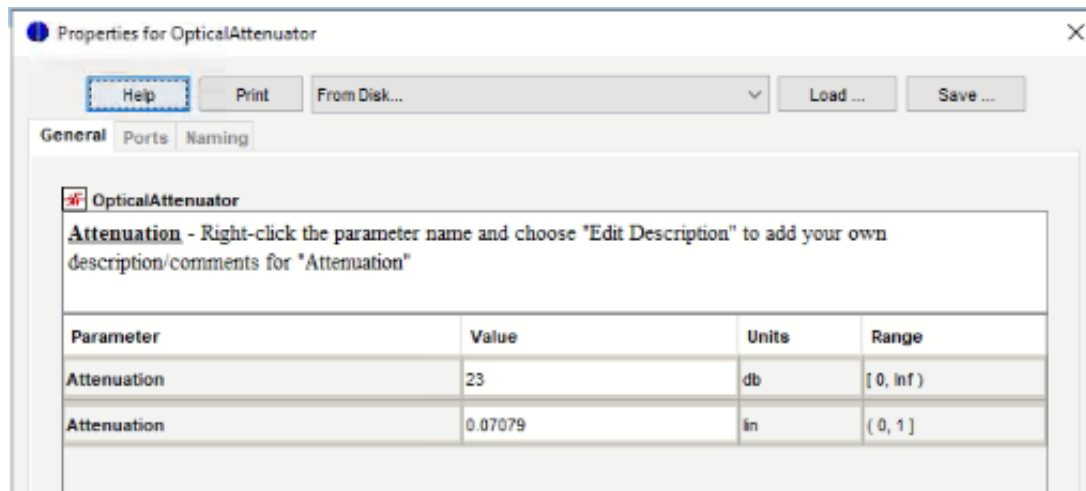


Figura 46. Configuración de atenuación simulación PAM8 50Gbits/s. (generado en OptSim)

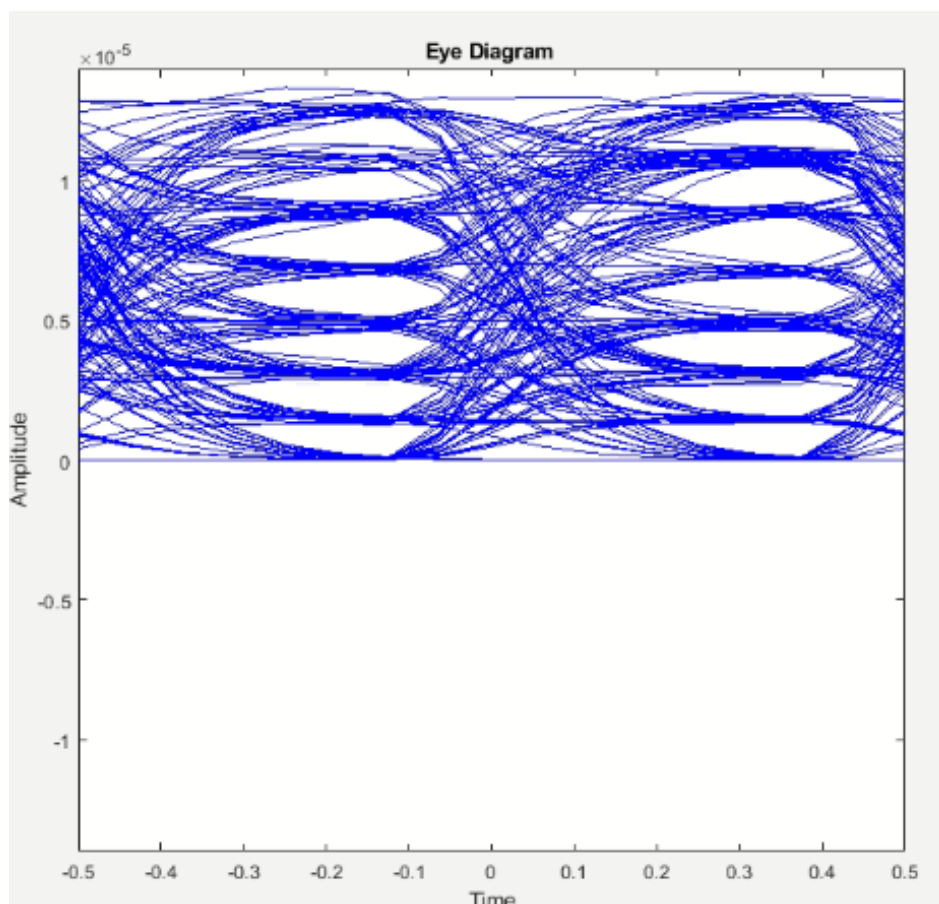


Figura 47. Diagrama de ojo simulación PAM8 50Gbits/s (autoría propia generado en MathLab).

Después realizar evaluación visual para validar si existe coherencia entre los bits transmitidos con los recibidos, para lo que se compara las gráficas generadas, las que nos indican que no hay pérdidas, llegando la señal en todos sus niveles.

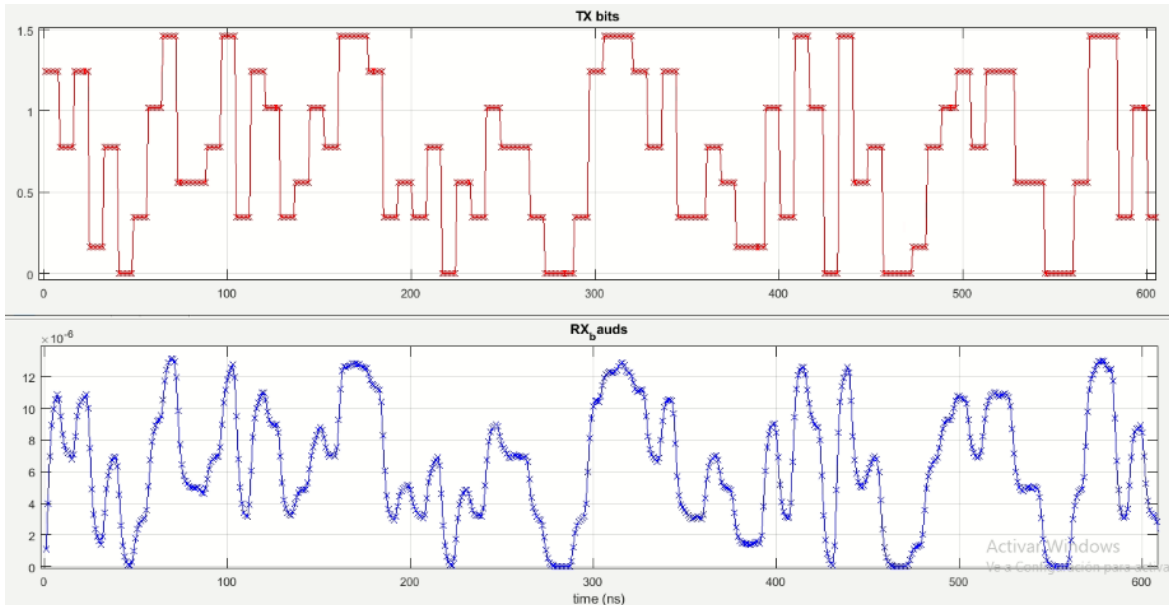


Figura 48. Diagramas de bits transmitidos y bits recibidos simulación PAM8 50Gbi/s. (generado en MathLab).

Después de la iteración de línea base se progresará aumentando los valores de atenuación para recolectar los valores de potencia recibida y BER, hasta que se tenga un valor más grande donde no sea aceptable la cantidad de errores recibidos. Estos valores se tabulan y grafican.

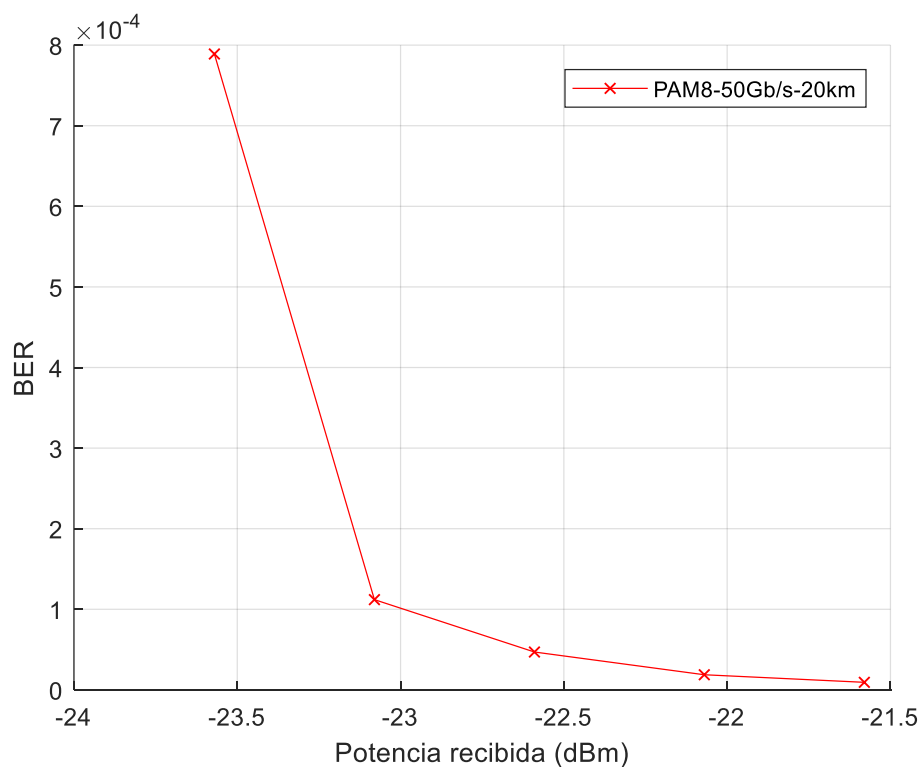


Figura 49. Diagramas BER vs potencia recibida simulación PAM8 50Gbits/s. (generado en MathLab).

5.5. Simulación PAM8 para 100 Gbits/s

5.5.1. Parámetros

- Longitud de fibra óptica 20Km
- Muestra 106494 bits transmitidos
- 8 muestras por bit
- Perdida 0.25 dB/Km
- Compensación por dispersión -340 ps/Km
- Amplificación 10 dB
- Atenuación variable en dB
- Tiempo de transmisión 876 ns
- Ancho de banda 33.33 Ghz, 100 Gbits/s
- Bitrate 33.33 GBs
- Pre compensación activada para los niveles: 1 -20%, nivel 2 -25%, nivel 3 -20%, nivel 4 -10%, nivel 5 +10%, nivel 6 +20%, nivel 7 +30%

5.5.2. Procedimiento.

- h) Sobre el diseño de red PON existente, configurar los elementos con los valores indicados.
- i) Correr una iteración para definir un valor línea base donde el resultado del BER sea distinto de 0.
- j) Aumentar la atenuación y corre la simulación nuevamente
- k) Evaluar diagrama de ojo generado
- l) Configurar valores de umbral en la recepción
- m) Tabular valor de BER vs potencia de señal recibida
- n) Repetir la iteración desde el punto c)

5.5.3. Resultados.

Se define una la línea base o atenuación inicial donde el valor del BER es mínimo, de aquí se aumentará gradualmente el valor de la atenuación hasta tener un valor alto de BER ya no aceptable para una transmisión, para esta simulación es de 20 dB:

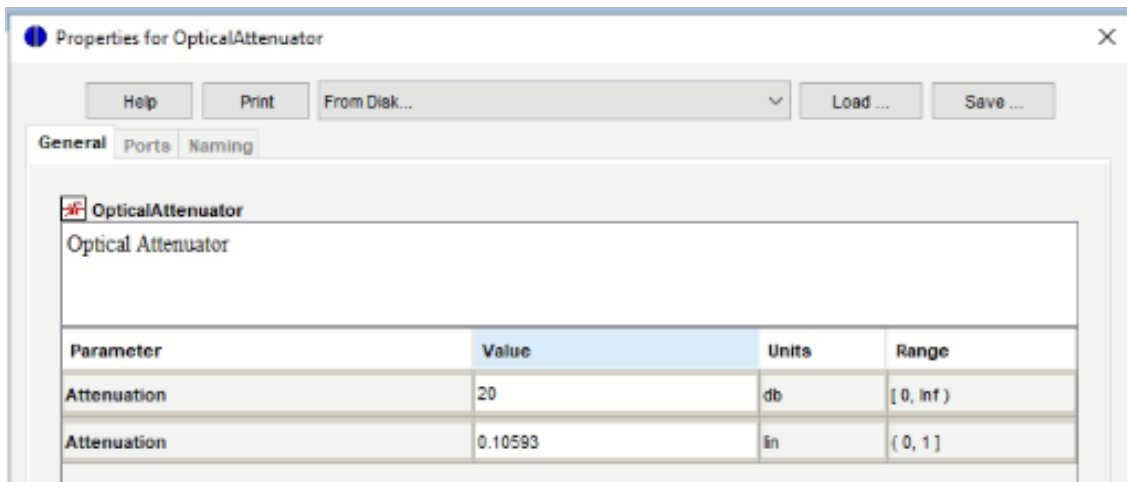


Figura 50. Configuración de atenuación simulación PAM8 100Gbits/s (generado en OptSim)

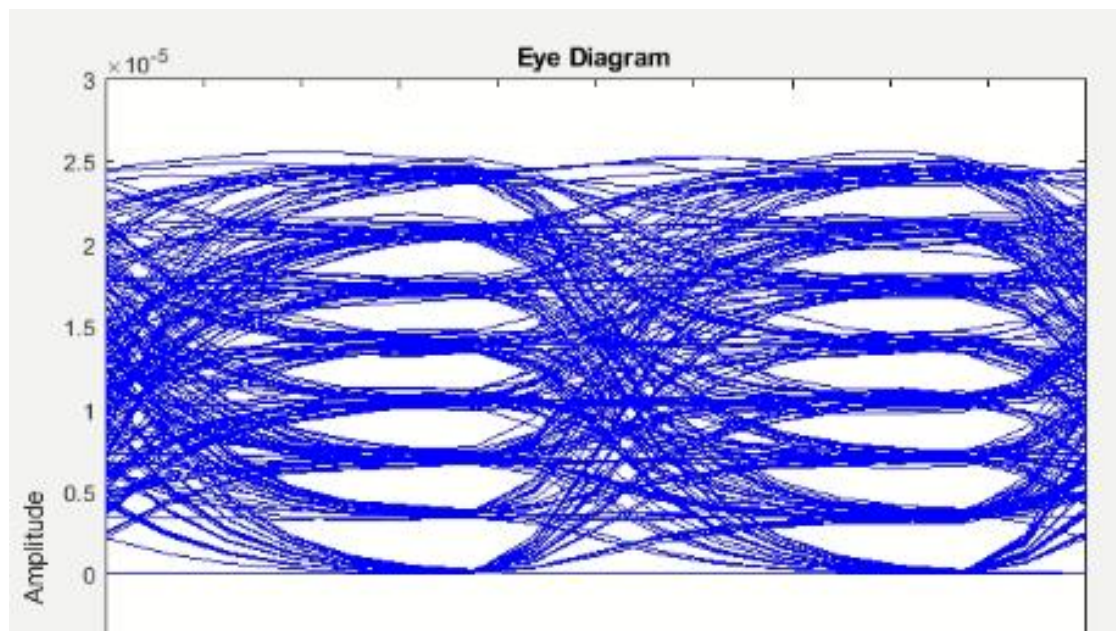


Figura 51. Diagrama de ojo simulación PAM8 100Gbits/s. (generado en MathLab).

Después realizar evaluación visual para validar si existe coherencia entre los bits transmitidos con los recibidos, para lo que se compara las gráficas generadas, las que nos indican que no hay pérdidas, llegando la señal en todos sus niveles.

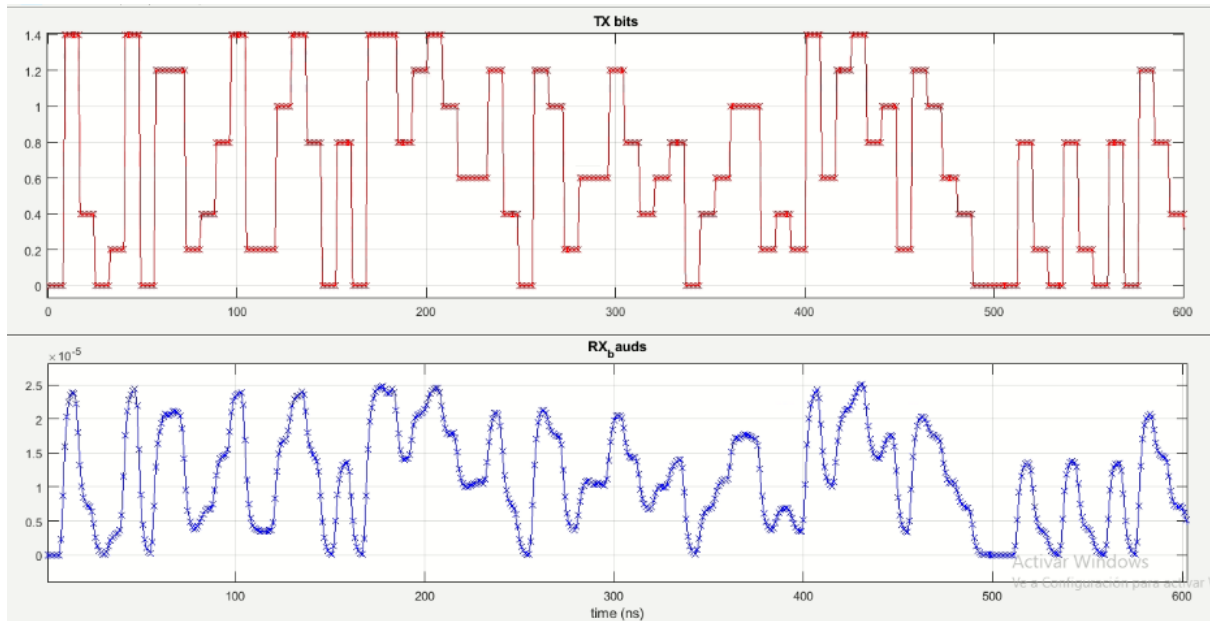


Figura 52. Diagramas de bits transmitidos y bits recibidos simulación PAM8 100Gbits/. (generado en MathLab).

Después de la iteración de línea base se progresará aumentando los valores de atenuación para recolectar los valores de potencia recibida y BER, hasta que se tenga un valor más grande donde no sea aceptable la cantidad de errores recibidos. Estos valores se tabulan y grafican.

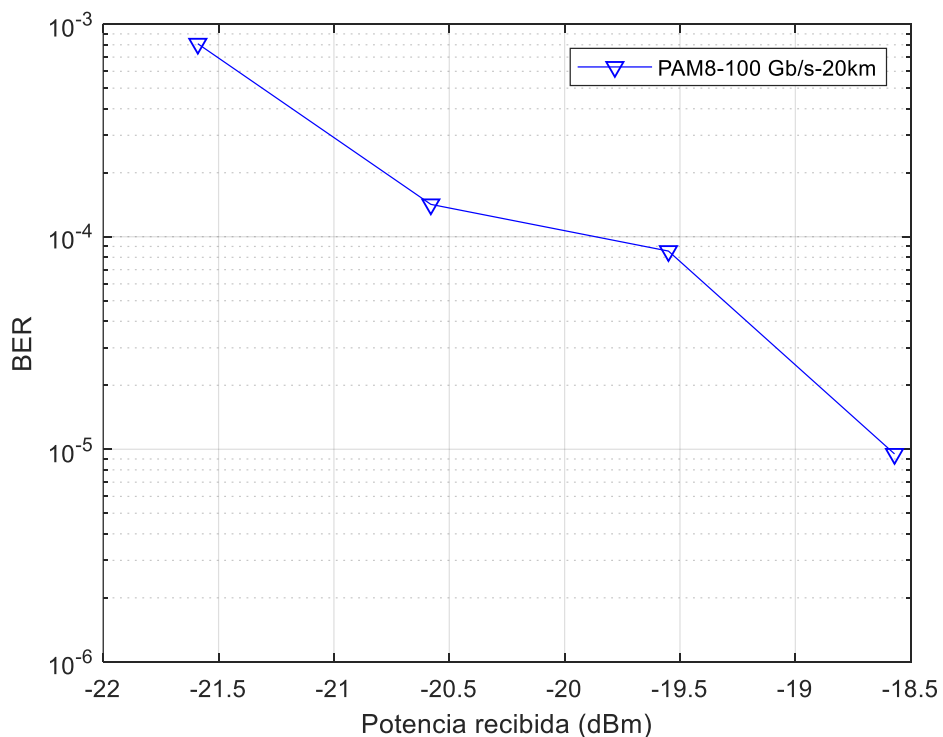


Figura 53. Diagramas BER vs potencia recibida simulación PAM8 100Gbits/s. (generado en MathLab).

5.6. Comparativa de resultados simulaciones PAM8

La Figura 54 muestra el comportamiento del BER versus la potencia recibida para una transmisión con PAM8 a 50 y 100 Gb/s en un enlace de fibra óptica de 20km de longitud. Puede verse para el caso de PAM8 que un BER objetivo de $1e-3$, se alcanza si se tiene una potencia de -23.5 dBm y de -21.5 dBm para una transmisión a 50 Gb/s y 100 Gb/s, respectivamente. Esto significa una penalidad de 2dB entre las dos tasas de bits. Para lograr un BER de $1e-5$, se requieren -29.5 dBm y -18.5 dBm para 50 Gb/s y 100 Gb/s, a su vez respectivamente. Esto implica un aumento a 3 dB de la penalidad para alcanzar el doble de velocidad de transmisión. Esto último se explica debido a que PAM8 es más susceptible a los efectos del canal que PAM4. Una ventaja de transmitir con PAM8 en lugar de con PAM 4 es que el ancho de banda requerido para el sistema y el canal es un tercio de la tasa de transmisión de bits: para 50 Gb/s el ancho de banda requerido es de 16.67 GHz y para una transmisión a 100Gb/s basta un ancho de banda de 33.33 GHz.

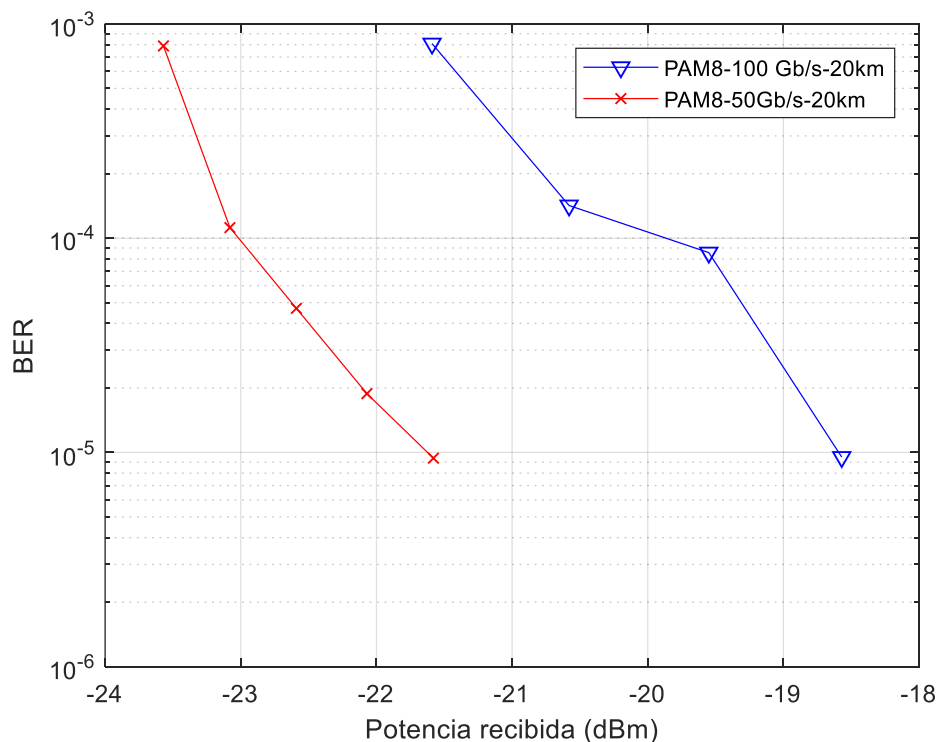


Figura 54. Diagramas BER vs potencia recibida en simulaciones PAM8 a 50 Gbits/s y 100 Gbits/s (generado en MathLab).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

- Para las distintas simulaciones, con sus respectivas variaciones de velocidad o modulación se valida que aplica la misma arquitectura de red PON planteada.
- Optsim es una herramienta que nos permite diseñar una red PON con los elementos necesarios, totalmente configurables, proporcionando un ambiente idóneo para realizar simulaciones de transmisión.
- Mediante las simulaciones podemos concluir que el uso de la modulación PAM 4 implícitamente proporciona una duplicación en el ancho de banda. De modo que a 25 giga baudios por segundo se transmite una tasa efectiva de 50 gigabits por segundo. También, para 50 gigabaudios por segundo se logra una velocidad de bits de 100 gigabits por segundo.
- Al hacer la comparación de transmisiones a diferentes velocidades con modulación PAM4 se evidencia que la transmisión se penaliza cerca de 3 dB de atenuación por el aumento de la velocidad de 50 a 100 Gb/s, lo que significa que es necesario duplicar la potencia de amplificación para duplicar el ancho de banda.
- El uso de modulación PAM 8 permite optimizar aún más el ancho de banda triplicando la cantidad de bits transmitidos, así con 16.66 gigabaudios por segundo se transmite 50 gigabits por segundo, de igual manera, con 33.33 gigabaudios por segundo se transmiten 100 gigabits por segundo.
- Con el uso de PAM 8 a diferentes velocidades, validamos a su vez que, para un BER mejor que $1e.3$, para duplicar el ancho de bando se requerirá duplicar la potencia de amplificación ya que existe en la graficas una diferencia de 3 dB.

RECOMENDACIONES:

- Conforme a los resultados del trabajo realizado, es recomendable utilizar modulación de señal PAM 4 y PAM 8, para optimizar la transmisión de datos, ya que permite duplicar o triplicar la cantidad de información enviada en cada ciclo.
- Se recomienda enfocar los estudios en los elementos físicos de conexión, modulación y demodulación para que se pueda implementar en forma comercial las modulaciones PAM 4 o PAM 8.

Referencias

- 4itNetworks. (2022). *Redes PON y GPON*. Obtenido de <https://4itn.mx/4it/gpon/>
- Arevalo, G. (sep de 2019). *Experimental demonstration of a PAM-4 based 20 Gb/s PON using dispersion pre-compensation*. Quito: IEEE.
- Arias, X. (2008). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CONTROL Y MONITOREO INDUSTRIAL*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.
- ArpaTel. (2022). *Atenuadores de Fibra Óptica*. Obtenido de <https://www.arpatel.com.ec/producto/atenuadores-fo/>
- Cablematic. (2022). *Fuente de luz LED iluminador para fibra óptica 1x1.5W 6mm 12V luz blanca*. Obtenido de <https://cablematic.com/es/productos/fuente-de-luz-led-iluminador-para-fibra-optica-1x15w-6mm-12v-luz-blanca-FC015/>
- Chen, J. (jun de 2015). *¿Qué es la fibra óptica y por qué utilizarla?* Obtenido de <http://apacoe.weebly.com/conocimiento/que-es-la-fibra-optica>
- community, F. (jul de 2021). *¿Qué es un splitter fibra óptica*. Obtenido de <https://community.fs.com/es/blog/what-is-a-fiber-optic-splitter-2.html>
- community, F. (abr de 2022). *¿Qué es PAM4 y cuáles son las diferencias entre PAM4 y NRZ?* Obtenido de <https://community.fs.com/es/blog/pam4-for-400g-ethernet-applications.html>
- Concil, F. (feb de 2016). *FTTH Handbook*. Obtenido de https://lafibre.info/images/doc/201602_ftth_handbook_v7.pdf
- Cruz, L. A. (may de 2017). *Amplificadores ópticos (SOA, EDFAs y Raman)*. Obtenido de <https://ingenieriaelectronica.org/amplificadores-opticos-soa-edfas-y-raman/>
- ElectrónicaOnline. (abr de 2022). *Diodo PIN*. Obtenido de <https://electronicaonline.net/componentes-electronicos/diodo/diodo-pin/#:~:text=EI%20diodo%20PIN%20act%C3%BAa%20como,P%20a%20la%20regi%C3%B3n%20N.>
- Fiber, C. C. (ago de 2020). *Fibras de 200 Gb/s sobre 520 Km*. Obtenido de <https://check-fiber.com/fibras-de-200-gb-s-sobre-520-km/>
- Garcia, A. (2009). *Compensación Electrónica de la Dispersión en fibras ópticas usando el conjunto de fase óptica*. Guanajuato: Universidad de Guanajuato.
- Garcia, A. (2019). *Modulación de intensidad y respuesta en la frecuencia*. Obtenido de <https://sivea.uson.mx/docentes/tareas/Modulacion-de-Intensidad-Respuesta-en-Frecuencia.pdf>
- Ghias, A. (may de 2012). *PAM-8 Optical Simulations*. Obtenido de https://www.ieee802.org/3/100GNGOPTX/public/may12/ghiasi_01_0512_optx.pdf
- Gonzalez, D. (jul de 2012). *MODELO CURRICULAR BASADO EN COMPETENCIAS DE LA CARRERA DE INGENIERIA*. Obtenido de <http://virtual.urbe.edu/tesispub/0094042/cap03.pdf>

- Gonzalez, J. (2018). *TIPOS Y DISEÑOS DE INVESTIGACION EN LOS TRABAJOS DE GRADO*. Obtenido de <http://servicio.bc.uc.edu.ve/educacion/revista/a5n9/5-9-11.pdf>
- Hardy, S. (may de 2021). *Proximus turns up 25G PON link, commits to deployments*. Obtenido de <https://www.lightwaveonline.com/fttx/ftth-b/article/14204189/proximus-turns-up-25g-pon-link-commits-to-deployments>
- Hardy, S. (jun de 2022). *History says 50G PON will outpace 25G PON*. Obtenido de [https://www.lightwaveonline.com/business/market-research/article/14278744/history-says-50g-pon-will-outpace-25g-pon-lightcounting?utm_source=LW+Service+Providers&utm_medium=email&utm_campaign=CPS220627113&o_eid=1095H0412278C1V&rdx.ident\[pull\]=omeda|1095H0](https://www.lightwaveonline.com/business/market-research/article/14278744/history-says-50g-pon-will-outpace-25g-pon-lightcounting?utm_source=LW+Service+Providers&utm_medium=email&utm_campaign=CPS220627113&o_eid=1095H0412278C1V&rdx.ident[pull]=omeda|1095H0)
- Heynen, J. (may de 2017). *El gasto combinado de FTTH y DSL se ralentizará hasta implementaciones de PON y G.fast de 10 Gbps*. Obtenido de <https://techblog.comsoc.org/2017/05/27/combined-ftth-and-dsl-pending-set-to-slow-until-10-gbps-and-g-fast-deployment/>
- Hickey, W. (feb de 2020). *Improving universal edge access with flexible and pluggable 10G PON*. Obtenido de https://www.ciena.com.mx/insights/articles/improving-universal-edge-access-with-flexible-and-pluggable-10G-pon_es_LA.html
- Huawei. (jul de 2022). *Por qué 50G PON parece un claro ganador frente a 25G*. Obtenido de <https://blog.huawei.com/2022/07/08/50g-pon-clear-winner-25g/>
- Lazaro, M. (oct de 2015). *Modulaciones de Amplitud, Fase y Frecuencia*. Obtenido de https://www.tsc.uc3m.es/~mlazaro/Docencia/GISC_GIT-CD/MD-CD-Lab-P02-Guion.pdf
- Lopez, A. (jun de 2022). *Qué es y cómo funciona la tecnología GPON: secretos técnicos*. Obtenido de <https://www.redeszone.net/tutoriales/redes-cable/tecnologia-ftth-gpon-que-es-funcionamiento/>
- Lopez, J. (mar de 2020). *Así logra más ancho de banda el PCIe para las GPU de NVIDIA y AMD*. Obtenido de <https://hardzone.es/tutoriales/rendimiento/pam-pulse-amplitude-modulation-pcie/>
- Macho, A. (may de 2012). *Estudio y Caracterización de un Modulador Electroóptico Mach-Zehnder*. Obtenido de <https://oa.upm.es/32771/1/Mach-Zehnder.pdf>
- Martin, J. (abr de 2014). *Comunicaciones ópticas*. Obtenido de https://oa.upm.es/25625/1/Comunicaciones_opticas_2.pdf
- MathWorks. (2022). *¿Qué es MATLAB?* Obtenido de <https://la.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- MathWorks. (2022). *Descripción del producto MathLab*. Obtenido de https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html
- MINTEL. (2022). *¿Sabe para qué sirve la fibra óptica?* Obtenido de <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/sabe-para-que-sirve-la-fibra-optica/>
- MIrayconsulting. (2020). *Funcionamiento de la fibra óptica*. Obtenido de <https://www.mirayconsulting.com/funcionamiento-de-la-fibra-optica/>

- Monter, L. (dic de 2018). *Comunicacion en redes*. Obtenido de <http://cidecame.uaeh.edu.mx/lcc/mapa/PROYECTO/libro27/index.html>
- Muriel, M. (2006). *Fotodetectores (PIN, APD)*. Obtenido de <https://oa.upm.es/42859/1/Fotodetectores%20%28PIN%2C%20APD%29-Matriz.pdf>
- Network, J. (abr de 2019). *Comunicaciones Ópticas Fotodiodos*. Obtenido de <https://www.jasp.net/optics/fotodiodos.xhtml#:~:text=El%20fotodiodo%20APD%20%20de,pares%20secundarios%2C%20la%20corriente%20secundaria.>
- NOKIA. (junio de 2022). *Nokia unveils 100G PON for fiber broadband in U.S.* Obtenido de <https://www.cablinginstall.com/standards/article/14278793/nokia-unveils-100g-pon-for-fiber-broadband-in-us>
- Optronics. (sep de 2021). *LA IMPORTANCIA DE LA RED ÓPTICA PASIVA (PON) PARA EL FUTURO*. Obtenido de <https://optronics.com.mx/conectividad/views/blog/detalle/135-pon-redes-opticas-pasivas>
- Orange. (dic de 2021). *Todos los tipos de cables de fibra óptica*. Obtenido de <https://blog.orange.es/consejos-y-trucos/tipos-fibra-optica/>
- Pierri, J. (abr de 2010). *La fibra óptica*. Obtenido de [https://www.oas.org/es/citel/infocitel/2010/abril/ftth_e.asp#:~:text=Dependiendo%20del%20n%C3%B3mero%20de%20modos,transmisi%C3%B3n%20luminosa%20\(figura%202\).](https://www.oas.org/es/citel/infocitel/2010/abril/ftth_e.asp#:~:text=Dependiendo%20del%20n%C3%B3mero%20de%20modos,transmisi%C3%B3n%20luminosa%20(figura%202).)
- Poveda, G. (sep de 2016). *Breve analisis de los simuladores*. Obtenido de <https://1library.co/article/optsim-breve-an%C3%A1lisis-de-los-simuladores.y4wd32rq>
- Rios, A. (2012). *Transmisión de información multicanalizada utilizando rejillas de difracción y modulación acusto óptica*. Sonora: Universidad de Sonora.
- Santiago, C. (2022). *Amplificador De Fibra Raman*. Obtenido de <https://comunicacionessantiago.com/producto/amplificador-de-fibra-raman/>
- SemiNex. (2020). *DIODO LÁSER MONOMODO DE MARIPOSA DE 14 PINES*. Obtenido de <https://seminex.com/es/producto/14-pin-butterfly-single-mode-laser-diode/>
- Sergio Moreno, D. T. (2017). *ANÁLISIS Y COMPARATIVO DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS SOA, EDFA Y.*
- Souza, D. d. (11 de 2019). *IoT y Redes PON: Nueva Oportunidad Tecnológica*. Obtenido de <https://ia-latam.com/2019/11/12/iot-y-redes-pon-nueva-oportunidad-tecnologica/>
- Thorlabs. (2022). *Amplificadores ópticos de refuerzo de banda O*. Obtenido de https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3990tho
- Thorlabs. (2022). *Asilador óptico*. Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/thorlabs/product-36188-460226.html>
- ThorLabs. (2022). *Filtros eléctricos de pasa bajo, alimentación directa BNC*. Obtenido de https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=8613

- ThorLabs. (2022). *Filtros eléctricos pasa alto, alimentación directa BNC*. Obtenido de https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10387
- ThorLabs. (2022). *Fotodiodos calibrados*. Obtenido de https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2822
- ThorLabs. (2022). *Moduladores electroópticos de niobato de litio, acoplados a fibra*. Obtenido de https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3918
- trasmisión, L. d. (2020). *Informe detallado sobre el software OPTSIM*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- UIT. (oct de 1996). *Atenuadores de fibra óptica*. Obtenido de <file:///C:/Users/beatl/Downloads/T-REC-L.31-199610-I!!PDF-S.pdf>
- UIT-T. (2003). *G.984.1 Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits: Características generales*. Ginebra-Suiza.
- UIT-T. (2005). *G.983.1 Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas*. Ginebra-Suiza: Union Internacional de Telecomunicaciones.
- VIAVI. (2019). *Póster sobre el análisis de las pruebas de redes ópticas pasivas (PON)*. Obtenido de https://comms.viavisolutions.com/Analisis-de-las-pruebas-de-una-red-optica-vi65095?_ga=2.219089177.108245948.1665960295-977241316.1665871900
- VIAVI. (2019). *Red óptica pasiva (PON)*. Obtenido de <https://www.viavisolutions.com/es-es/red-optica-pasiva-pon#:~:text=Las%20redes%20PON%20permiten%20la,y%20los%20sistemas%20de%20gesti%C3%B3n>.
- Zambrano, N. (16 de Jul de 2020). *La Evolución en las tecnologías PON*. Obtenido de <https://www.viavisolutions.com/es-es/webinars/2020/la-evolucion-en-las-tecnologias-pon>