

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR



FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN

TEMA:

“Comparación del desempeño de las modulaciones PAM-2, PAM-4 y PAN-8 en la transmisión de datos a alta velocidad en redes PON de nueva generación (NG-PON)”

Franco Dagoberto Costales Vallejo

Director de la tesis:

Dr. Germán Arévalo B. PhD

Quito – 2020

AUTORÍA

Yo, Franco Dagoberto Costales Vallejo, portador de la cédula de ciudadanía No 0602926800, 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.

Franco Dagoberto Costales Vallejo

DEDICATORIA

Este tiempo de trabajo y estudios va dedicado a Dios, mi madre y mi familia.

A ti Mami Sari por todo el apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A mi amada esposa Verito por ser mi ayuda idónea, Franco Josué y Renata mis mayores bendiciones, ustedes son mi combustible en esta vida.

A Héctor mi padre, nos veremos en el infinito.

Estoy convencido que hemos venido a este mundo para ayudar, una vida egoísta no tiene sentido, Josué y Renata siempre elijan ayudar, el Señor les dará su recompensa y los llevara más lejos de lo que pueden imaginar.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por la vida, el tiempo, la salud, la inteligencia, la sabiduría y sobre todo por mi familia.

A mi Madre, gracias por ser la persona que me animó y apoyo en esta aventura de estudiar.

A mi esposa, gracias por la ayuda incondicional, la paciencia, y sobre todo el amor.

A Franco Josué y Renata, gracias por comprender mis ausencias mientras estudiaba son mis campeones.

A mis suegros, gracias por estar cuando más los necesitaba.

A mis compañeros y profesores, gracias por compartir sus experiencias y conocimientos, y la amistad formada que traspasa tiempo y distancia.

A mi director de tesis German, gracias por sus compartir su tiempo y su intelecto.

No os conforméis a este mundo, sino transformaos por medio de la renovación de vuestro entendimiento, para que comprobéis cuál es la buena voluntad de Dios, agradable y perfecta.

Romanos 12:2

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AUTORÍA.....	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO	4
ÍNDICE DE CONTENIDOS	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS	9
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 INTRODUCCIÓN.....	10
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	11
1.3 ANTECEDENTES	12
1.4 OBJETIVOS	13
CAPITULO 2. CONCEPTOS GENERALES	14
2.1 ESTÁNDARES ITU PARA REDES PON	14
2.2 MODULACIÓN ÓPTICA	18
2.2.1 ESQUEMAS DE MODULACIÓN	19
2.2.2 Modulación de Amplitud.....	20
2.2.3 Modulación de pulsos	21

2.3 DIAGRAMA DE OJO (Grami, 2016)	23
2.4 Modulación PAM.....	25
2.4.1 On-off keying (OOK).....	26
2.4.1.1 NRZ OOK	26
2.4.1.2 RZ OOK.....	27
2.5 PAM-4.....	28
2.6 PAM-8.....	29
CAPITULO 3 DISEÑO DE RED PON CON MODULACIÓN PAM-2, PAM-4 Y PAM-8 CON OPTISYSTEM	31
3.1 Software OptiSystem (Optiwave, 2020)	31
3.1.1 Aplicaciones de Optisistem.....	31
3.1.2 Características de Optisystem (Optiwave, 2020).....	32
3.2 Diagrama de bloques.....	33
3.3 Diseño de la simulación	42
3.4 Cosimulación en MATLAB.....	53
3.5 Resultados.	60
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	62
Bibliografía	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Aplicaciones de las redes PON, Fuente https://www.itu.int › Documents › OFC2018-2 Q2_v5.....	15
Figura 2 evolución de los estándares PON https://techblog.comsoc.org/2017/05/27/combined-ftth-and-dsl-spending-set-to-slow-until-10-gbps-and-g-fast-deployment/	16
Figura 3 evolución de los estándares PON https://techblog.comsoc.org/2017/05/27/combined-ftth-and-dsl-spending-set-to-slow-until-10-gbps-and-g-fast-deployment/	17
Figura 4 Evolución de los estándares PON https://techblog.comsoc.org/2017/05/27/combined-ftth-and-dsl-spending-set-to-slow-until-10-gbps-and-g-fast-deployment/	17
Figura 5a) Modulación de amplitud analógica, b) Modulación de amplitud digital. Fuente P. Moreno.....	21
Figura 6 a) señal analógica a ser muestreada, b) señal de pulsos, c) señal muestreada. Fuente: Agbo, 2017.....	22
Figura 7. Construcción diagrama de ojo. Fuente: A. Grami	23
Figura 8: Modulación OOK. Fuente: P. Moreno	26
Figura 9 a) espectro óptico NRZ OOK, b) diagrama de ojo ideal NRZ OOK. Fuente: P. Winzer.....	27
Figura 10 a) espectro óptico RZ OOK, b) diagrama de ojo ideal RZ OOK. Fuente: P. Winzer	28
Figura 11 Diagrama de ojo PAM-4, Fuente: Propia	28
Figura 12 Niveles de PAM, codificación Gray, Fuente: P. Winzer	29
Figura 13 Diagrama de ojo PAM-8. Fuente: Propia	30
Figura 14 Diagramas de bloque de simulación inicial	33

Figura 15 a) Diagrama de ojo de entrada sin distorsion PAM-4, b) Diagrama de ojo salida PAM-4, c) Diagrama de ojo de entrada sindistorsion PAM-8, d) diagrama de ojo de salida PAM-8.....	35
Figura 16 . a) Diagrama de ojo entrada con pre-distorsión PAM-4, b) Diagrama de ojo salida PAM-4, c) Diagrama de ojo de entrada con pre-distorsión PAM-8, b) diagrama de ojo de salida PAM-8, pruebas realizadas con 1 km de fibra óptica	36
Figura 17 Mejora en diagrama de ojo aplicando fibra de compensación Fuente: Propia	39
Figura 18 Desplazamiento de bits, Fuente: Propia.....	40
Figura 19: programación en Matlab para corregir el desplazamiento de Bits	40
Figura 20.- Simulación final. Fuente propia	41
Figura 21.- Pseudo-Random Bit Sequence Generator Properties. Fuente propia.....	42
Figura 22.- CW Lasser Measured	43
Figura 23.- MATLAB Componet. Fuente: propia	44
Figura 24.- Configuración de Input y Output MATLAB Component. Fuente: Propia.....	45
Figura 25.- M-ary Pulse Generator. Fuente: PropiaOscilloscope visualizer.....	46
Figura 26. Oscilloscope Visualizer. Fuente: Propia.....	47
Figura 27. Eye Diagram Analyzer. Fuente: Propia.....	48
Figura 28.- Diagramas de ojo en la transición y recepción. Fuente: Propia	48
Figura 29.- MZ Modulator Analytical. Fuente: Propia.....	49
Figura 30.- Optical fiber Component. Fuente: Propia	50
Figura 31.- Dispersión fibra de compensación. Fuente: Propia.....	50
Figura 32. Atenuador Óptico. Fuente: Propia	51
Figura 33.- Optical Power Meter. Fuente Propia	52

Figura 34.- Receptor Óptico. Fuente Propia.	52
Figura 35.- Amplificador de Voltaje. Fuente: Propia.	53
Figura 36.- Layout Parameters. Fuente propia.....	54
Figura 37.- Definición del nivel de modulación PAM. Fuente: Propia	54
Figura 38.- Voltaje de decisión para PAM-2. Fuente: Propia.....	56
Figura 39.- Voltajes de decisión para PAM-4. Fuente: Propia	57
Figura 40.- Voltajes de decisión para PAM-8. Fuente: Propia	58
Figura 41. Medición de potencia recibida y BER. Fuente: Propia.....	59
Figura 42.- BER vs Potencia recibida (dBm) Fuente: Propia	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tabla 3.1 Niveles de código Gray con Pre-distorsión para PAM-4	37
Tabla 2 Niveles de código Gray con Pre-distorsión para PAM-8.....	37

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La tendencia actual en telecomunicaciones es ofrecer varios servicios, muchos de los cuales son nuevos, a través de redes de acceso de nueva generación, como las redes NG-PON¹. Servicios como: Televisión de alta definición, aplicaciones en la nube, video bajo demanda (HD, 4K y próximamente 8K), video conferencias, juegos en red, Cloud computing, etc., demandan (y demandarán incrementalmente aún más) gran ancho de banda. Es así como las redes de acceso deberán crecer en su capacidad al mismo ritmo, para satisfacer las necesidades de los usuarios.

Este crecimiento en la capacidad de ancho de banda actualmente solo lo pueden satisfacer las redes de transmisión por fibra óptica, dadas sus características de ancho de banda, robustez, alcance y eficiencia energética. En este trabajo de tesis realizaremos un análisis comparativo entre las modulaciones de amplitud de pulsos (PAM²) de dos niveles (PAM-2), de cuatro niveles (PAM-4) y de ocho niveles de amplitud (PAM-8), que nos permita adquirir criterios de su desempeño al ser empleadas en redes de acceso ópticas de gran ancho de banda.

Este trabajo pretende realizar un análisis de la modulación PAM, visto como un candidato prometedor para las nuevas generaciones de redes ópticas pasivas. Realizaremos simulaciones a altas velocidades de bits y varios niveles de modulación PAM. Nuestro objetivo principal es evaluar la afinidad de la modulación PAM con los estándares existentes y las redes heredadas, en lo que respecta, a la longitud de la fibra, la clase de presupuesto óptico y el tipo de longitud de onda. Las simulaciones nos ilustrarán sobre los desafíos de los formatos de modulación multinivel,

¹ New Generation Passive Optical Networks

² Pulse Amplitude Modulation

como el ruido y la dispersión, en la medida que se incremente el número de niveles, desde el tradicional NRZ³ (también denominado PAM-2) hasta cuatro y ocho niveles.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Actualmente las redes PON son las que más se implementan para proveer soluciones del tipo FTTX (fiber to the: curb, home, building, etc), dado que permiten llegar lo más cerca posible al usuario con una red óptica de distribución ODN⁴ compartida para todos los usuarios, ofreciendo velocidades de conexión del orden de los de varios cientos de Mb/s, e incluso, potencialmente, varios Gb/s para cada usuario. La característica relevante de las redes PON es que su infraestructura es compartida y no necesitan de dispositivos activos intermedios, lo que les da una ventaja de ahorro al implementarlas, y su infraestructura es escalable, razón por la cual, sobre las redes ya instaladas se pueden implementar otros métodos de modulación para lograr un mejor aprovechamiento del medio (la fibra óptica) y lograr así cumplir con la demanda de los usuarios.

En el Ecuador los últimos años se ha dado un importante despliegue de redes de acceso de fibra óptica usando arquitecturas PON. Este despliegue ha permitido dotar al usuario de velocidades que rondan las decenas o centenas de Mbps. Sin embargo, con el aumento de servicios basados en internet, las velocidades actuales no podrán satisfacer las necesidades en el futuro próximo.

Nuestro trabajo permitirá adquirir criterios a base de comparación entre PAM-2, PAM-4 y PAM-8, para usarlos en redes NG-PON que permitan alcanzar velocidades en el orden de los Gb/s.

³ Non Return Zero

⁴ optical distribution network

Al concluir el trabajo de titulación pretendemos dar criterios de comportamiento, eficiencia y uso entre PAM-2, PAM-4 y PAM-8, logrando contribuir al desarrollo de investigación en el campo de las comunicaciones ópticas en redes NG-PON

1.3 ANTECEDENTES

El servicio de internet fijo experimentó durante el 2018 un aumento, llegando a cerca de 2 millones de cuentas de las cuales el 27.62% son conexiones a través de fibra óptica, el 42.81% por cobre, 21, 2% por cable coaxial y el 8.55% por medio inalámbrico (ARCOTEL – SIETEL, 2017). (Arcotel, s.f.). Según estos porcentajes aún queda mucho trabajo por hacer para proveer de conexiones de alta velocidad, en este escenario las empresas de telecomunicaciones están migrando sus redes de coaxial o par trenzado de cobre a fibra óptica (caso de TVCABLE), tendiendo nuevos tramos de redes PON. Debido a la próxima incursión de servicios por internet que demandan un mayor ancho de banda, será necesario un esfuerzo conjunto de operadores y estado para lograr incorporar en el país en un desarrollo de las TIC que permita acceder a la nueva revolución industrial (Industria 4.0) y la implementación de las redes 5G, que usan como redes frontales las redes ópticas de nueva generación. Es allí donde surge la importancia de investigar y comparar los métodos de modulación que permitan a llegar a ofrecer a los usuarios de las redes ópticas las velocidades que ellos demandarán.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General:

Analizar y comparar el desempeño de las modulaciones PAM-2, PAM-4 y PAM-8 en la transmisión de datos a alta velocidad en redes PON de nueva generación (NG-PON).

1.4.2 Objetivos Específicos:

1. Identificar los requerimientos y estándares para NG-PON.
2. Analizar las ventajas de usar la modulación de amplitud (PAM) de pulsos en sus diferentes configuraciones para redes de comunicaciones ópticas.
3. Diseñar y simular una red PON en OptiSystem con modulación PAM-2, PAM-4 y PAM-8.
4. Analizar los resultados de la simulación para comparar el rendimiento de las modulaciones PAM estudiadas.

CAPITULO 2. CONCEPTOS GENERALES

2.1 ESTÁNDARES ITU PARA REDES PON

La ITU⁵ es un organismo perteneciente a las Naciones Unidas, encargada de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), su principal misión es proveer las facilidades que permitan la conectividad internacional de las redes y mejorar el acceso a las TIC. Las comisiones de estudio de ITU, elaboran normas internacionales que se conocen como *recomendaciones*, estas recomendaciones definen el cómo van a funcionar e interactuar las redes de comunicaciones, en vigencia existen más de 4000 recomendaciones que orientan desde la definición de los servicios hasta la arquitectura y seguridad de la red, desde la DSL⁶ de banda ancha hasta los sistemas de transmisión óptica de Gbit/s, las redes de la próxima generación y las cuestiones relativas al IP, todos ellos componentes fundamentales de las tecnologías de la información y la comunicación (de hoy. (ITU, 2019)

Las comunicaciones que usan como medio de transmisión a la fibra óptica son, en comparación con otros medios, nuevas. Desde que en 1977 se instaló el primer piloto en Inglaterra, a ser hoy la tecnología que domina el despliegue de redes de comunicación.

Las redes ópticas tomaron dos caminos para su despliegue: las redes ópticas activas (AON), y las redes ópticas pasivas (PON), las redes PON por sus características son las que prevalecieron y están en mayor uso y desarrollo. (Osorio, 2016)

⁵ International Telecommunication Union

⁶ Digital Subscriber Line

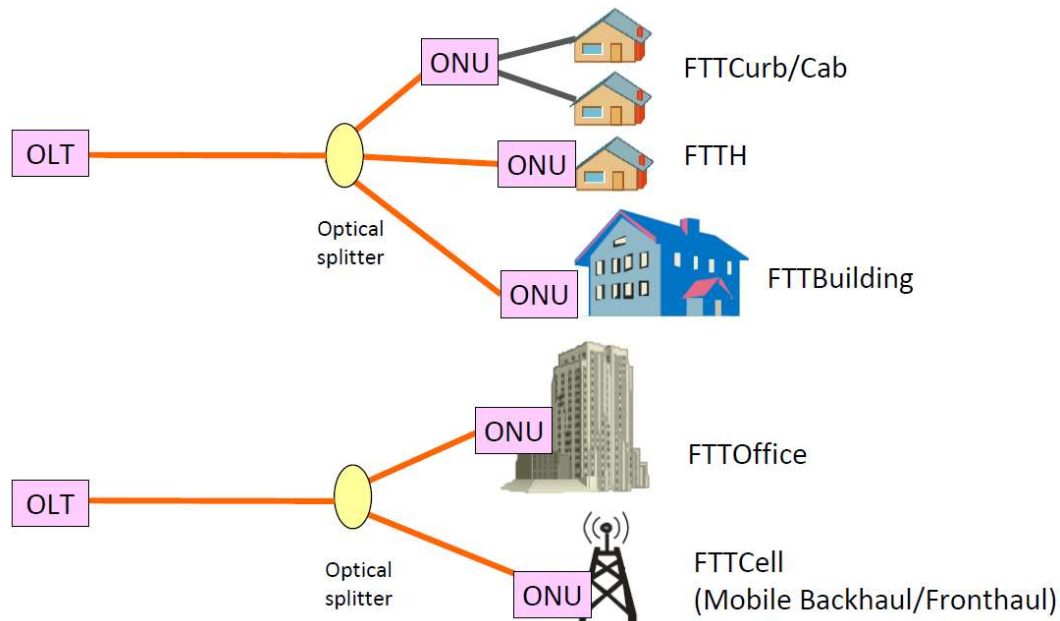


Figura 1 Aplicaciones de las redes PON, Fuente <https://www.itu.int> › Documents › OFC2018-2 Q2_y5

La red óptica pasiva presenta arquitecturas punto a punto (P2P) y punto a multipunto (P2MP) para proporcionar acceso de banda ancha. La arquitectura P2MP se ha convertido en la solución más usada para la implementación de FTTx entre los operadores. El FTTx basado en PON se ha implementado ampliamente desde 2004 cuando la Comisión de Estudio 15 Q2 del UIT-T completó las recomendaciones que definieron el sistema GPON⁷ [serie UIT-T G.984].

El despliegue a gran escala de las redes PON a nivel mundial proporciona el acceso a una variedad de servicios, por tal motivo, las empresas de telecomunicaciones esperan sacar el mayor provecho de le las PON instaladas. Lo que deriva en anchos de banda mejorados y capacidades de soporte de servicio, así como un rendimiento mejorado de nodos de acceso y equipos de soporte a través de sus redes PON existentes.

⁷ Gigabit Pasive Optica Netwok

La dirección de la evolución de PON es un tema clave para la industria de las telecomunicaciones.

Las organizaciones como la FSAM⁸ y la ITU-T⁹ con sus grupos de estudio e interés de las PON, dividen en dos fases el desarrollo de las PON de nueva generación las NG-PON1¹⁰ y NG-PON2¹¹, con NG-PON1 se pretende dar una actualización a mediano plazo de las redes PON, mientras que con NG-PON2 será una solución a largo en lo referente a la evolución de las redes PON.

A la par de las recomendaciones de la ITU para las redes PON, existen los estándares de la IEEE conocidas como redes EPON¹², GPON prevaleció frente a EPON por poseer un mejor uso del ancho de banda, por ofrecer mayores funcionalidades de gestión de la calidad y mejores garantías para una futura evolución.

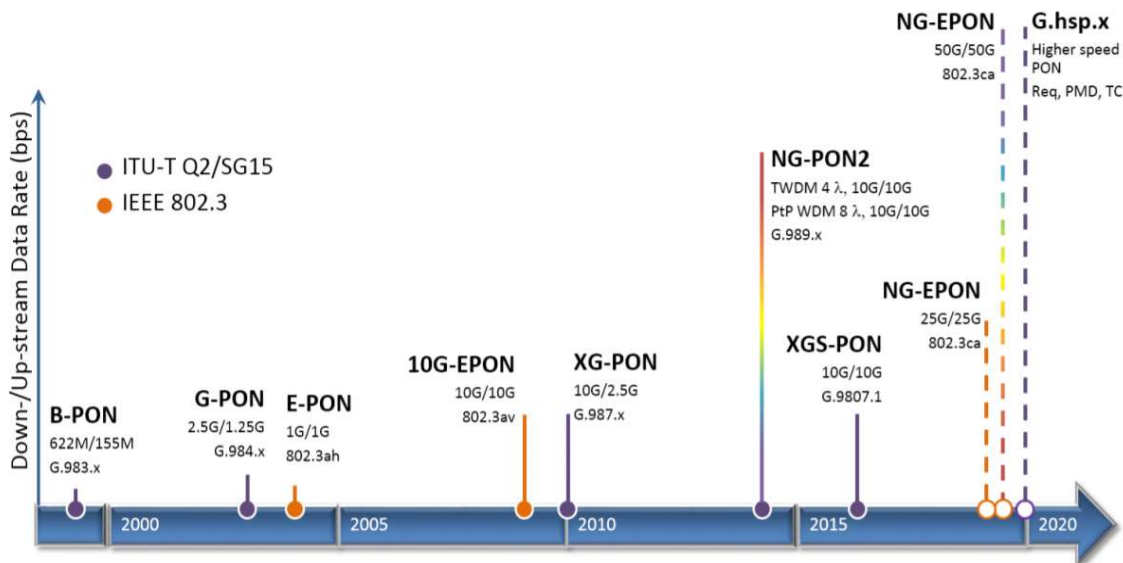


Figura 2 evolución de los estándares PON <https://techblog.comsoc.org/2017/05/27/combined-ftth-and-dsl-spending-set-to-slow-until-10-gbps-and-g-fast-deployment/>

⁸ Full Service Acces Network

⁹ Telecommunication Standardization Sector

¹⁰ NG-PON de primera generación

¹¹ NG-PON de segunda generación

¹² Ethernet Pasive Optical Network

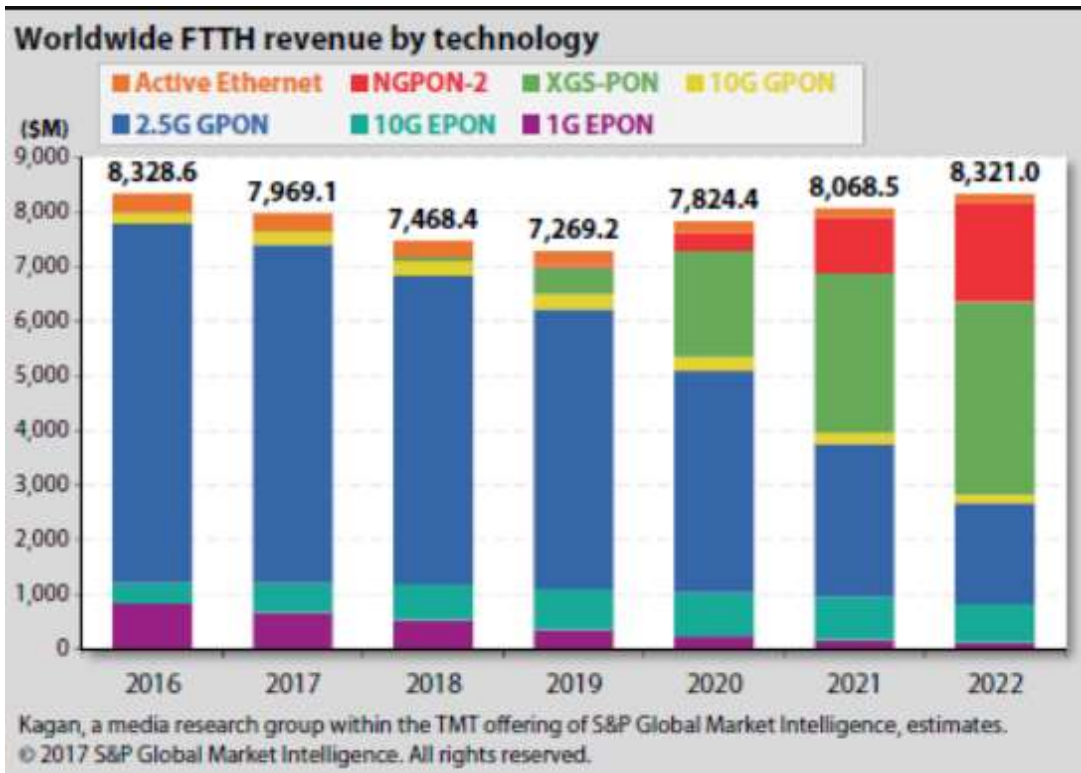


Figura 3 evolución de los estándares PON <https://techblog.comsoc.org/2017/05/27/combined-ftth-and-dsl-spending-set-to-slow-until-10-gbps-and-g-fast-deployment/>

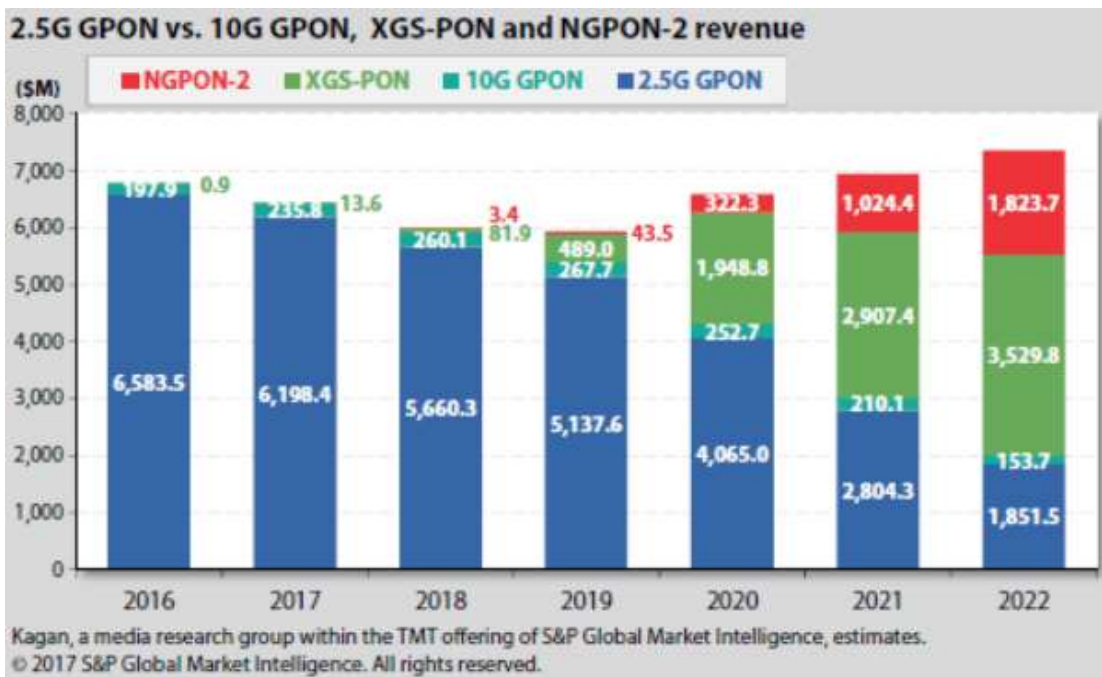


Figura 4 Evolución de los estándares PON <https://techblog.comsoc.org/2017/05/27/combined-ftth-and-dsl-spending-set-to-slow-until-10-gbps-and-g-fast-deployment/>

2.2 MODULACIÓN ÓPTICA

La modulación óptica es la técnica que nos permite controlar una onda óptica o también, codificar información sobre una onda óptica portadora, podemos clasificar la modulación óptica por varios criterios:

- A) Según el parámetro óptico a modular: modulación de fase, modulación de frecuencia, modulación de polarización, modulación de amplitud, modulación espacial y modulación de difracción.
- B) Según la codificación de la información, esta puede ser modulación analógica o digital.
- C) Donde se realice la modulación: modulación directa o modulación externa.
 - 1. La modulación directa se realiza directamente en una fuente óptica, que generalmente es un diodo emisor de luz (LED) o un láser, sin utilizar un modulador óptico separado.
 - 2. La modulación externa se realiza en una onda óptica utilizando un modulador óptico separado para cambiar una o más características de la onda.
- D) La modulación óptica se logra variando la susceptibilidad óptica del material modulador. Dependiendo de si la parte real o imaginaria de la susceptibilidad es responsable del funcionamiento del modulador, la modulación óptica puede clasificarse como modulación refractiva o modulación absorbente. La modulación refractiva se realiza variando la parte real de la susceptibilidad, variando así el índice de refracción del material; la modulación de absorción se realiza variando la parte imaginaria de la susceptibilidad, variando así el coeficiente de absorción del material.

- E) La modulación óptica se puede clasificar de acuerdo con el mecanismo físico detrás del cambio de la susceptibilidad óptica, como la modulación electroóptica, la modulación acústico-óptica, la modulación magnetoóptica, la modulación totalmente óptica, etc.
- F) Dependiendo de la relación geométrica entre la señal de modulación y la onda óptica modulada, la modulación óptica puede ser modulación transversal o modulación longitudinal. En la modulación transversal, la señal se aplica en una dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda óptica. En la modulación longitudinal, la señal se aplica a lo largo de la dirección de propagación de la onda óptica.
- G) La modulación óptica se puede realizar en ondas ópticas no guiadas o guiadas. En consecuencia, la estructura de un modulador óptico puede tomar la forma de un dispositivo de guía de ondas o masivo. Se utiliza un modulador en masa para modular una onda óptica no guiada. Se utiliza un modulador de guía de onda para modular una onda óptica guiada.
- H) Optical switching es una forma especial de modulación óptica. En términos generales, es una modulación óptica digital de señal larga (large-signal digital) que da como resultado la conmutación entre dos o más valores discretos de un parámetro óptico o entre dos o más modos ópticos. Se puede realizar con cualquier tipo de modulación óptica. La característica de la onda óptica que se conmuta puede ser su fase, frecuencia, amplitud, polarización, dirección de propagación o patrón espacial. (Agbo, 2017)

2.2.1 ESQUEMAS DE MODULACIÓN

Un campo óptico está caracterizado por su polarización, magnitud, fase, frecuencia y vector de onda.

La modulación óptica se puede realizar en cualquiera de los parámetros de campo. Por lo tanto, existen muchas técnicas de modulación basadas en diferentes esquemas. Cada esquema de modulación se ha desarrollado aún más en muchos formatos de modulación avanzados.

En general, el concepto de un esquema o formato de modulación que se desarrolla para una onda portadora electromagnética a baja frecuencia, como una frecuencia de radio, puede adaptarse y aplicarse a la modulación óptica. Algo común a las portadoras de baja frecuencia y las portadoras ópticas, es que, la señal de modulación puede ser digital o analógica. Los tres esquemas básicos de modulación para todas las frecuencias portadoras son la modulación de fase (PM), la modulación de frecuencia (FM) y la modulación de amplitud (AM) para la modulación analógica, que toman la forma de modulación por desplazamiento de fase (PSK), modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) y modulación por desplazamiento de amplitud (ASK) para modulación digital. (Grami, 2016)

2.2.2 Modulación de Amplitud.

Este esquema de modulación codifica la información sobre la amplitud o magnitud de un campo óptico, es la técnica más simple en comparación con las de modulación en frecuencia o fase.

El campo óptico se lo caracteriza por la siguiente ecuación:

$$E(0, t) = \hat{e}|\varepsilon(t)| \exp(i\varphi_\varepsilon - i\omega t), \quad (1)$$

Donde: \hat{e} es la polarización, ε es la magnitud, φ es la fase y ω es la frecuencia.

En la modulación analógica de amplitud, la magnitud ($|\varepsilon(t)|$) varía continuamente con el tiempo, pero en la modulación digital de amplitud, $|\varepsilon(t)|$ varía abruptamente con el tiempo, a esta modulación se la conoce como, *amplitude-shift keying* (ASK), La ASK binaria se conoce como *on-off keying*

(OOK), donde para representar el bit uno se enciende (on) y para representar el bit cero se apaga (off), a OOK se le considera como una PAM-2

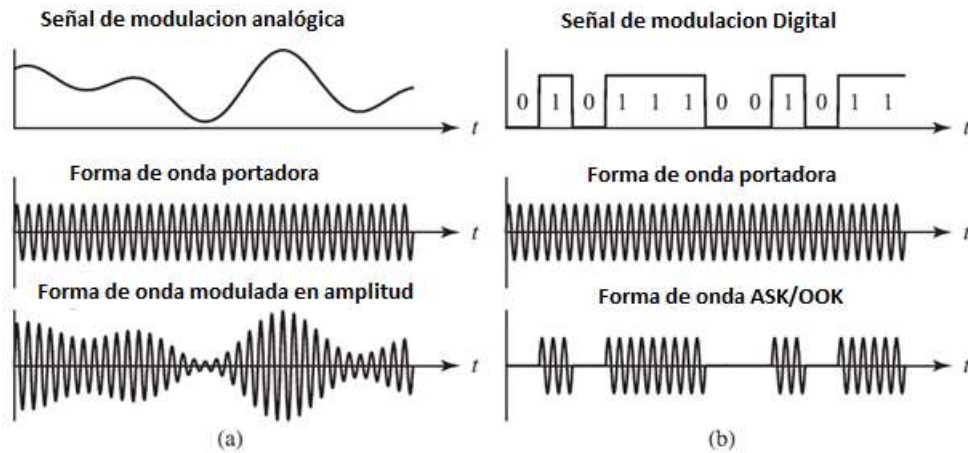


Figura 5a) Modulación de amplitud analógica, b) Modulación de amplitud digital. Fuente P. Moreno

El ASK multinivel utiliza múltiples magnitudes de campo discretos para representar múltiples combinaciones de bits para codificar una combinación posible de un número igual de bits (PAM-4 y PAM-8).

La modulación de amplitud es muy susceptible al ruido electromagnético, pero al ser la fibra óptica un medio inmune al ruido es factible el uso de este esquema de modulación, además es una modulación de baja complejidad y bajo consumo de energía en relación con otros esquemas de modulación.

2.2.3 Modulación de pulsos

En los esquemas de modulación por pulsos la onda portadora es una sucesión periódica de pulsos eléctricos. La señal de información es codificada en la portadora de pulsos al variar uno de sus parámetros: la amplitud, el ancho y la posición de cada pulso. La variación de uno de estos tres

conduce a la modulación de amplitud de pulso (PAM), la modulación de ancho de pulso (PWM) o la modulación de posición de pulso (PPM) amplitud, duración, posición temporal o frecuencia.

Usando la técnica del muestreo podemos convertir una señal analógica continua en una secuencia de muestras discretas en los instantes de tiempo del muestreo.

El muestreo es el proceso de obtener un conjunto de muestras de una señal continua. Es una operación importante en la comunicación digital y el procesamiento de señales digitales.

En sistemas analógicos, las señales son procesadas en su totalidad. Sin embargo, en los sistemas digitales, solo se requieren muestras de las señales para el procesamiento. El muestreo se puede hacer usando un tren de pulsos o impulsos.

El teorema de muestreo dice: para una señal con ancho de banda W Hertz (sin componentes de frecuencia superiores a W Hertz), no hay pérdida de información o superposición si la frecuencia de muestreo es al menos dos veces la frecuencia más alta en la señal de modulación.

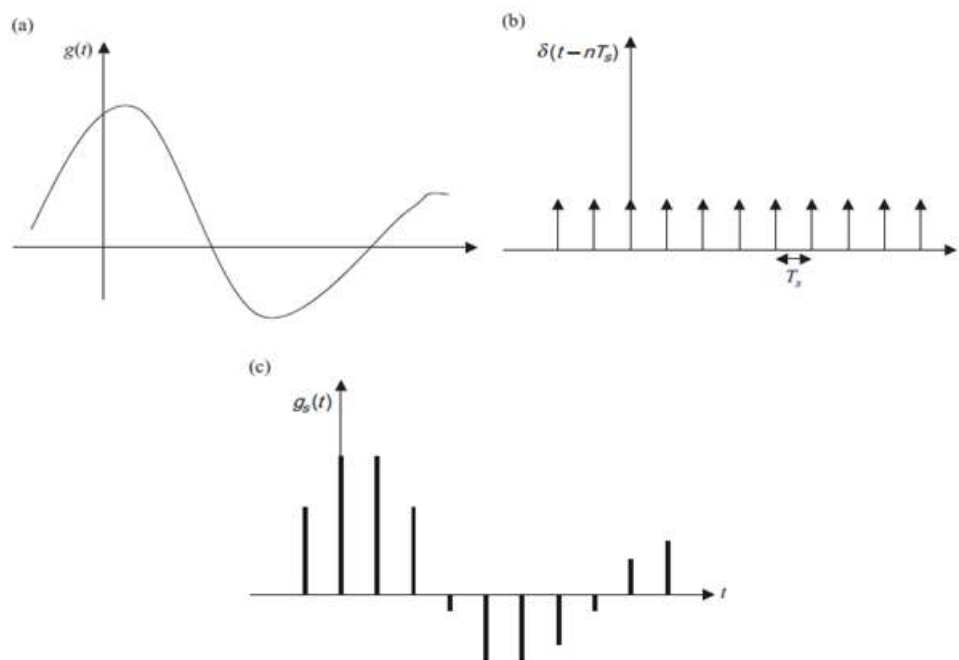


Figura 6 a) señal analógica a ser muestreada, b) señal de pulsos, c) señal muestreada. Fuente: Agbo, 2017

2.3 DIAGRAMA DE OJO (Grami, 2016)

El diagrama de ojo es una herramienta eficaz para proporcionar un examen visual de la gravedad de la interferencia entre símbolos, la sensibilidad a los errores de sincronización y el margen de ruido.

El diagrama de ojo se obtiene muestreando la señal recibida en un osciloscopio. La base de tiempo del osciloscopio se dispara a una fracción de la tasa de bits y, por lo tanto, produce un barrido que dura varios intervalos de bits. A continuación, el osciloscopio muestra la superposición de muchas trazas de intervalos de bits de la señal recibida. El patrón osciloscopio es simplemente la señal de entrada cortada cada par de intervalos de bits y luego superpuesta una encima de la otra.

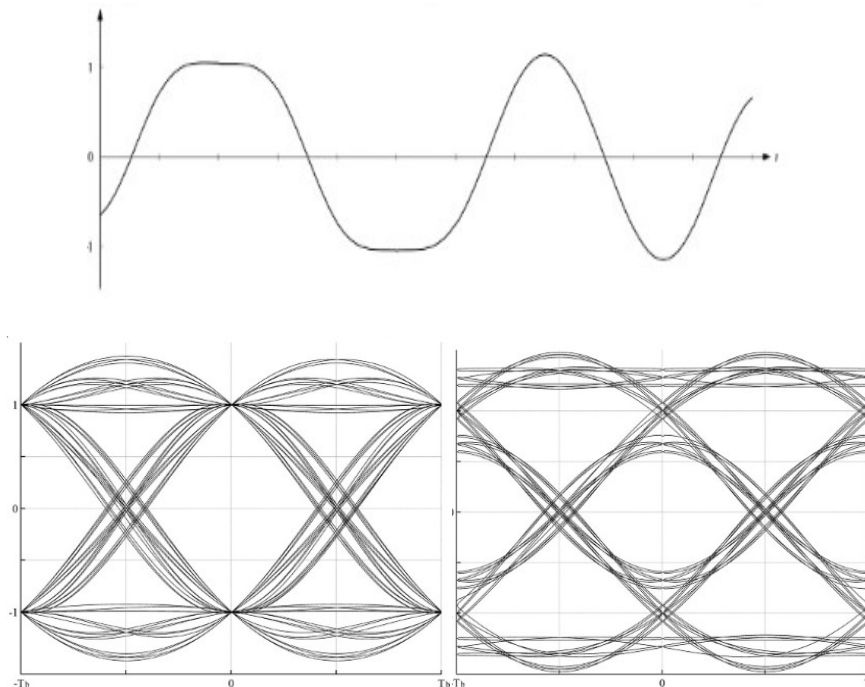


Figura 7. Construcción diagrama de ojo. Fuente: A. Grami

La observación del diagrama de ojo puede proporcionar una medida cualitativa del desempeño con respecto a la calidad de la señal, como por ejemplo:

- El ancho de la apertura de los ojos representa el intervalo de tiempo durante el cual la señal recibida se puede muestrear sin error de interferencia entre símbolos.
- El mejor momento para muestrear la señal recibida es cuando el ojo está más abierto. Cuando no hay interferencia entre símbolos, tenemos una apertura de ojos de unidad, y cuando hay una cantidad significativa de interferencia entre símbolos, tenemos una apertura de ojos de cero (es decir, el ojo está completamente cerrado). Con una apertura del ojo del 50% o mejor (es decir, con una relación señal / ruido de 6 dB o más), se puede lograr una transmisión de datos confiable.
- La distorsión máxima se indica por la altura de la apertura del ojo en el tiempo de muestreo y es el doble la distorsión máxima.
- El margen de ruido o inmunidad al ruido se define por la altura de la apertura del ojo en el momento del muestreo.
- La sensibilidad a los errores de sincronización se detecta mediante la tasa de cierre del ojo a medida que se varía el tiempo de muestreo. proporcionan información de reloj, y la cantidad de distorsión de los pasos por cero indica la cantidad de fluctuación. La variación del paso a nivel se puede ver desde el ancho de las esquinas de los ojos.
- En un sistema lineal con datos verdaderamente aleatorios, todas las aberturas de los ojos serían idénticas.
- La apertura del ojo generalmente indica no linealidades en el canal de transmisión. Cuando el efecto de interferencia entre símbolos es bastante severo, los rastros de la parte superior del patrón del ojo se cruzan con los rastros de la parte inferior, lo que da como resultado el efecto del ojo completamente cerrado.

- En un sistema M-ary¹³, el patrón del ojo contiene $(M - 1)$ aberturas para los ojos apiladas verticalmente una sobre otra.

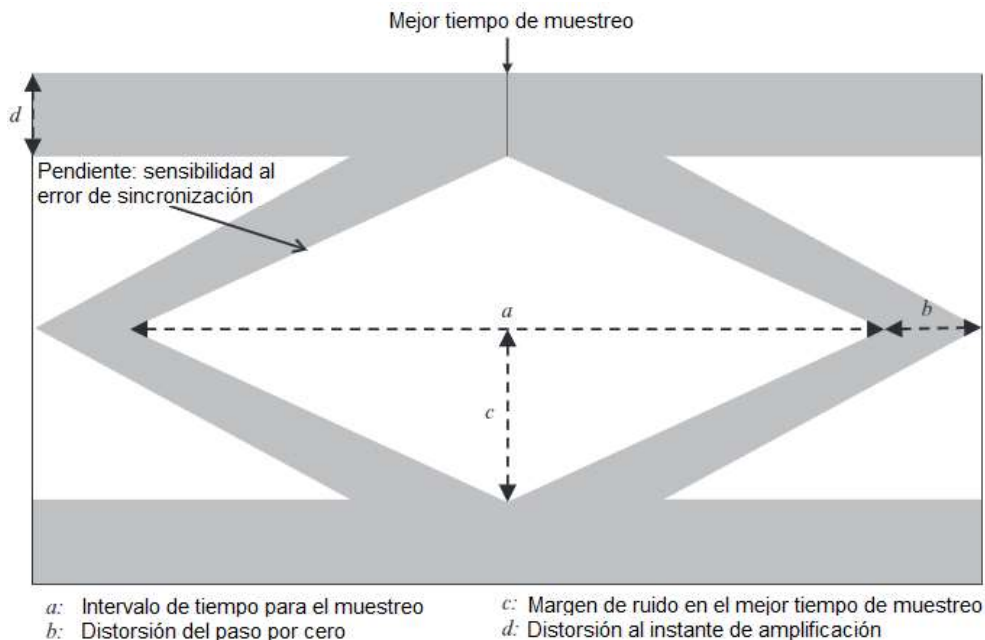


Figura 8 Interpretación diagrama de ojo. A. Grami

2.4 Modulación PAM

La modulación de pulso puede ser analógica o digital. La modulación de pulso analógico se produce cuando algún atributo de un pulso varía en una correspondencia biunívoca con un valor de muestra. En la modulación de pulso analógico, la idea básica es usar un tren de pulso como señal portadora. Podemos elegir este tren de pulsos como pulsos cuadrados, pulsos de coseno elevados, pulsos sinc (seno cardinal) o cualquier otro pulso. Para simplificar, seleccionaremos trenes de pulso cuadrado.

La modulación de amplitud de pulso es aquella en la que la amplitud de los pulsos individuales en un tren de pulsos varía de acuerdo con algunas características de la señal de modulación. En

¹³ multi-level modulation, permite transmitir dos o más bits a la vez.

otras palabras, el tren de pulsos se modula en amplitud de acuerdo con la señal misma. La amplitud de los pulsos modulados en amplitud transmite la información.

PAM es un esquema de modulación multinivel a continuación describiremos los esquemas OOK, PAM-4 y PAM-8.

2.4.1 On-off keying (OOK)

OOK es el esquema de modulación más simple usado en comunicaciones ópticas, su funcionamiento consiste en emitir un pulso de luz cada vez que la información que llega al transmisor es un bit 1 y transmitir nada en el caso de que la información que llega al transmisor es un bit 0. (Moreno Gomez, 2011)

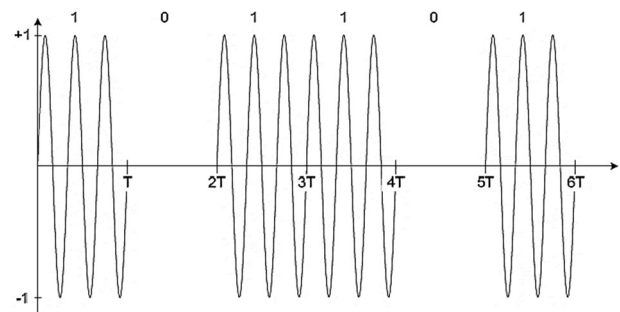


Figura 8: Modulación OOK. Fuente: P. Moreno

Hay dos formatos de OOK, con retorno a cero (RZ) y sin retorno a cero (NRZ).

2.4.1.1 NRZ OOK¹⁴

El esquema NRZ OOK ha sido el formato de modulación dominante en comunicaciones ópticas por mucho tiempo, las razones que han favorecido a NRZ OOK son:

- Ancho de banda relativamente bajo en comparación con el formato RZ OOK.

¹⁴ Non return to Zero *on-off keying*

- Inmunidad frente al ruido de fase, en contraposición a los formatos PSK.
- Transceptor mucho más simple que el necesario para otros formatos de modulación.

Conforme las comunicaciones ópticas avanzan hacia regímenes binarios superiores, sistemas DWDM¹⁵ y enlaces de muy larga distancia, el formato NRZ OOK ha cedido terreno frente a otros esquemas más apropiadas para enlaces de mayor capacidad.



Figura 9 a) espectro óptico NRZ OOK, b) diagrama de ojo ideal NRZ OOK. Fuente: P. Winzer

2.4.1.2 RZ OOK¹⁶

Los términos con retorno a cero (Return-to-Zero, RZ) y sin retorno a cero (No-Return-to-Zero, NRZ) hacen referencia a la duración del pulso óptico con respecto al periodo del mismo (T). Si el ciclo de trabajo del pulso óptico es el 100% o, dicho de otro modo, si la duración del pulso óptico es T , entonces se dice que el pulso es sin retorno a cero; en caso de que la duración del pulso óptico sea menor que T , el pulso será con retorno a cero.

¹⁵ Dense Wavelength Division Multiplexing

¹⁶ Return to zero *on-off keying*

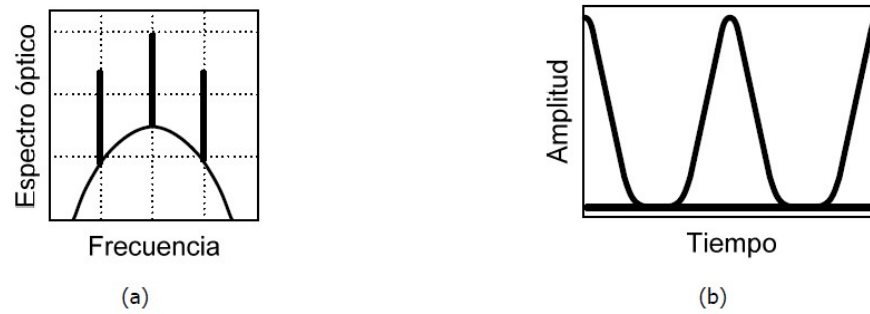


Figura 10 a) espectro óptico RZ OOK, b) diagrama de ojo ideal RZ OOK. Fuente: P. Winzer

En comparación con una señal NRZ OOK, la señal RZ OOK tiene un espectro óptico más ancho debido a la menor duración que tienen sus pulsos, lo que lleva a una menor eficiencia espectral.

2.5 PAM-4

La modulación de 4 niveles de amplitud PAM-4, es una forma de duplicar la velocidad de bits en el canal sin duplicar el ancho de banda requerido, cada nivel de señal corresponde a un símbolo de dos bits.

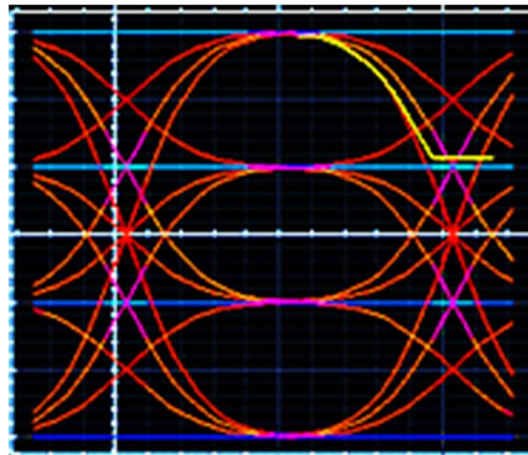


Figura 11 Diagrama de ojo PAM-4, Fuente: Propia

De la figura 10 se muestra tres aperturas de ojo para los 4 niveles permitiendo duplicar la cantidad de bits transmitidos sin aumentar el ancho de banda, pero la relación señal ruido

(SNR) se afectada en una relación de un tercio con respecto a PAM-2, lo cual lleva a tener receptores más sensibles, para su aplicación.

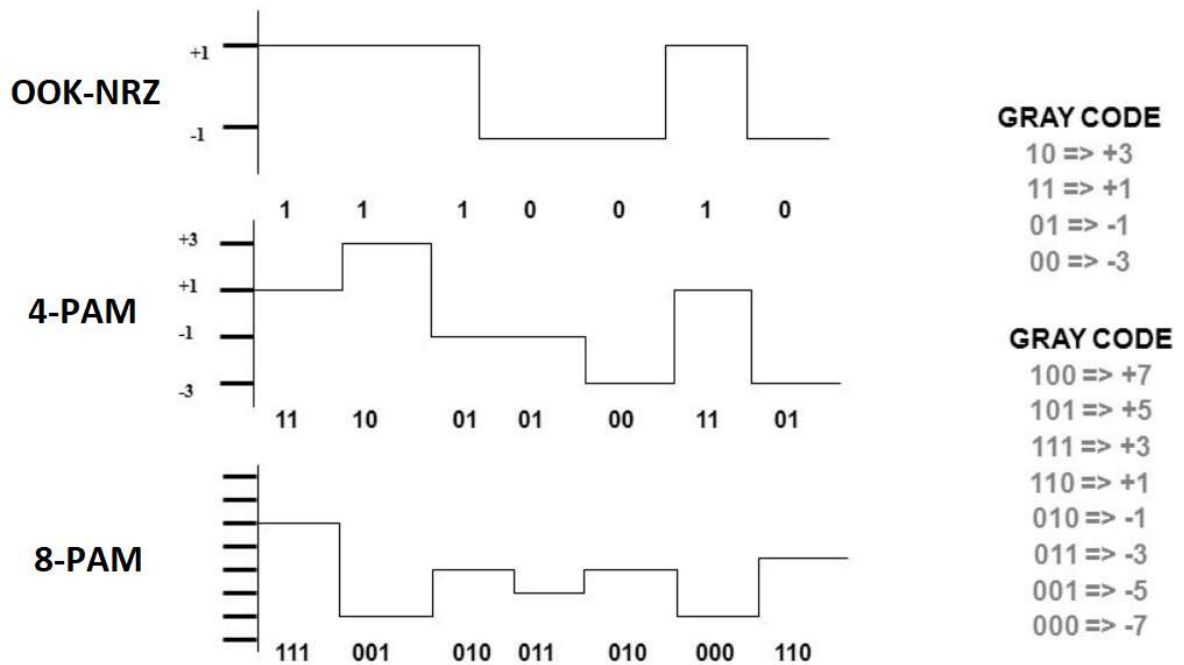


Figura 12 Niveles de PAM, codificación Gray, Fuente: P. Winzer

En el nivel más bajo está 00, seguido de 01, 10 y 11, respectivamente. Se usa la codificación de Gray (Fig. 11)

2.6 PAM-8

PAM-8 es la modulación de amplitud de pulsos de 8 niveles, como se muestra en la fig. 11, con PAM-8 se duplica la cantidad de bits de PAM-4, sin afectar el ancho de banda. Pero se disminuye la apertura de ojo a una séptima parte de PAM-2.

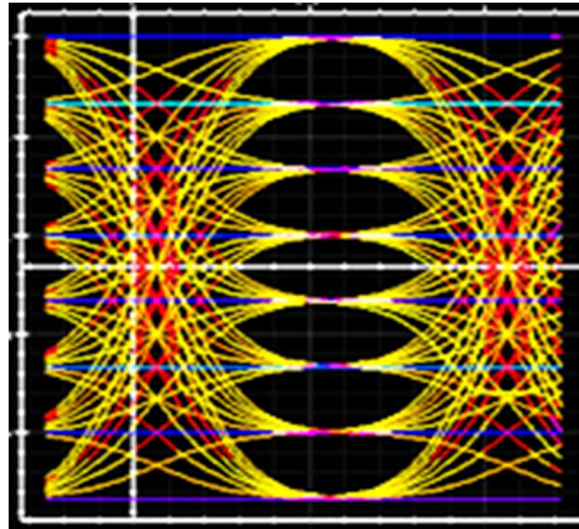


Figura 13 Diagrama de ojo PAM-8. Fuente: Propia

El esquema PAM-4 es considerado como el preferido para transmisiones de alta velocidad [6] ya que es un esquema de implementación simple y de bajo consumo de energía, en el siguiente capítulo mediante simulación se realizará un análisis de cual nivel es el que ofrece mejores prestaciones para las redes NG-PON.

CAPITULO 3 DISEÑO DE RED PON CON MODULACIÓN PAM-2, PAM-4 Y PAM-8 CON OPTISYSTEM

En este capítulo vamos a detallar el proceso de la elaboración de la simulación realizada en el software Optisystem y Matlab.

3.1 Software OptiSystem (Optiwave, 2020)

Optisystem es un software creado por la compañía Optiwave Systems Inc, el cual, permite satisfacer las necesidades de los investigadores científicos, ingenieros de telecomunicaciones ópticas, integradores de sistemas, estudiantes y una amplia variedad de otros usuarios, OptiSystem satisface la demanda del mercado de fotónica en evolución de una herramienta de diseño de sistemas ópticos potente pero fácil de usar. Realizar simulaciones controlando ciertas características de los diferentes diseños de fibra óptica, actualmente se encuentra en la versión 17.0.0, la misma, que se usó en el desarrollo de este trabajo.

3.1.1 Aplicaciones de Optisistem

Las principales aplicaciones son:

- Diseños de red óptica que incluyen OTDM¹⁷, anillos SONET¹⁸ / SDH¹⁹, CWDM²⁰, DWDM²¹, PON, OCDMA²²
- Transmisión monomodo / multimodo

¹⁷ Optical Time Division Multiplexing

¹⁸ Synchronous Optical Network

¹⁹ Synchronous Digital Hierarchy

²⁰ Coarse wavelength Division Multiplexing

²¹ Dense Wavelength Division Multiplexing

²² Optical code division multiple access

- Óptica de espacio libre (FSO), Radio sobre fibra (ROF), OFDM²³ (directo, coherente)
- Amplificadores y láser (EDFA²⁴, SOA²⁵, Raman, Híbrido, optimización GFF²⁶, láser de fibra)
- Procesamiento de señal (eléctrico, digital, totalmente óptico)
- Diseño del subsistema transmisor y receptor (directo / coherente)
- Formatos de modulación (RZ, NRZ, CSRZ²⁷, DPSK²⁸, QPSK²⁹, DP-QPSK³⁰, PM-QPSK³¹, QAM-16³², QAM-64³³)
- Análisis del rendimiento del sistema (diagrama del ojo / factor Q / BER³⁴, potencia de señal / OSNR³⁵, estados de polarización, diagramas de constelación, penalizaciones lineales y no lineales)

3.1.2 Características de Optisystem (Optiwave, 2020)

Una característica importante de Optisystem es la de planificar, probar y simular en el dominio del tiempo y la frecuencia, adicional:

- Proporciona información global sobre el rendimiento del sistema.
- Evalúa las sensibilidades de los parámetros que ayudan a las especificaciones de tolerancia de diseño

²³Orthogonal frequency division multiplexing

²⁴Erbium Doped Fiber Amplifier

²⁵Semiconductor Optical Amplifier

²⁶Gain Flattening Filter

²⁷Carrier-Suppressed Return-to-Zero

²⁸Differential Phase Shift Keying

²⁹Quadrature phase shift keying

³⁰Differential phase QPSK

³¹Polarization multiplexed QPSK

³²Quadrature amplitude modulation de 16 estados

³³Quadrature amplitude modulation de 64 estados

³⁴Bit Error ratio

³⁵Optical Signal-To-Noise Ratio

- Presenta visualmente opciones de diseño y escenarios para clientes potenciales
- Ofrece acceso directo a amplios conjuntos de datos de caracterización del sistema.
- Proporciona barrido automático de parámetros y optimización
- Se integra con la familia de productos Optiwave.
- Permite la integración de componentes de Matlab.

3.2 Diagrama de bloques

Nuestro diseño para la simulación va a considerar una modulación externa, se probará el desempeño de las modulaciones entre distancias de fibra de 20 y 40 kilómetros,

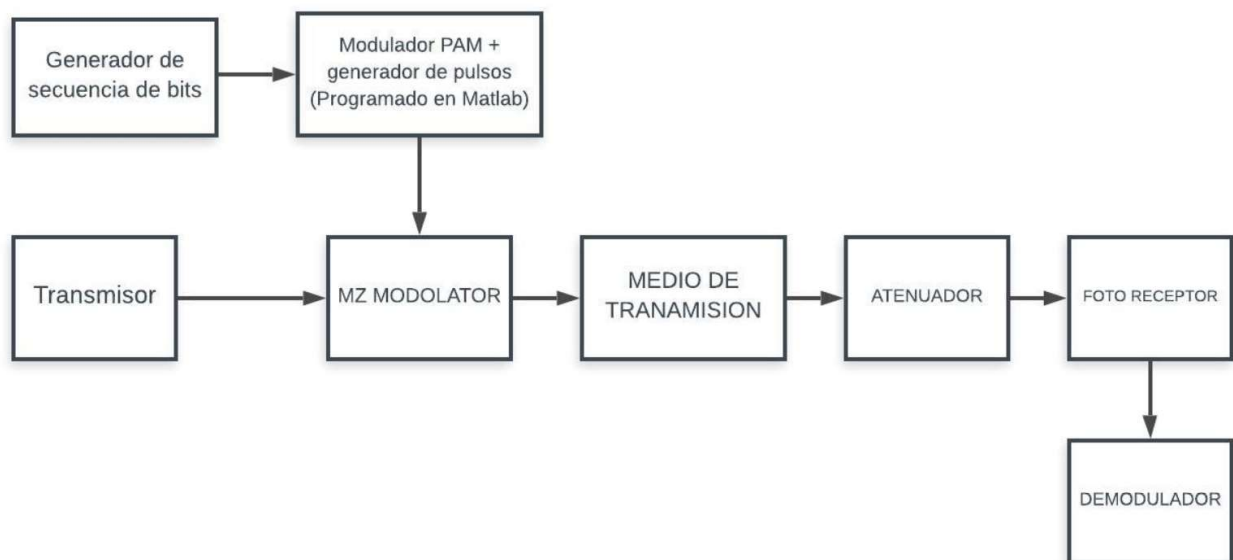


Figura 14 Diagramas de bloque de simulación inicial

En la primera propuesta de diseño se procedió a usar el generador de bits de Optisystem, el modulador PAM en Matlab era el encargado de realizar el muestreo y la codificación según el nivel de PAM, la modulación óptica se la realizo por el método de modulación externa, la distancia del circuito de fibra óptica lo variaremos entre los 20 y 40 Km, adicional

incorporaremos un atenuador de señal para simular la atenuación del circuito, se tomara en cuenta un foto receptor y un demulador para comparar los bits de entrada con los bits de salida y encontrar el BER (tasa de error de bit).

Nos apoyaremos del análisis del diagrama de ojo para realizar las calibraciones manuales necesarias.

En la primera simulación se detectó que a la salida teníamos una distorsión en el los niveles en el diagrama de ojo.

Como se observa en la figura 15 a la salida tenemos una distorsión la cual dificulta la decodificación de los símbolos.

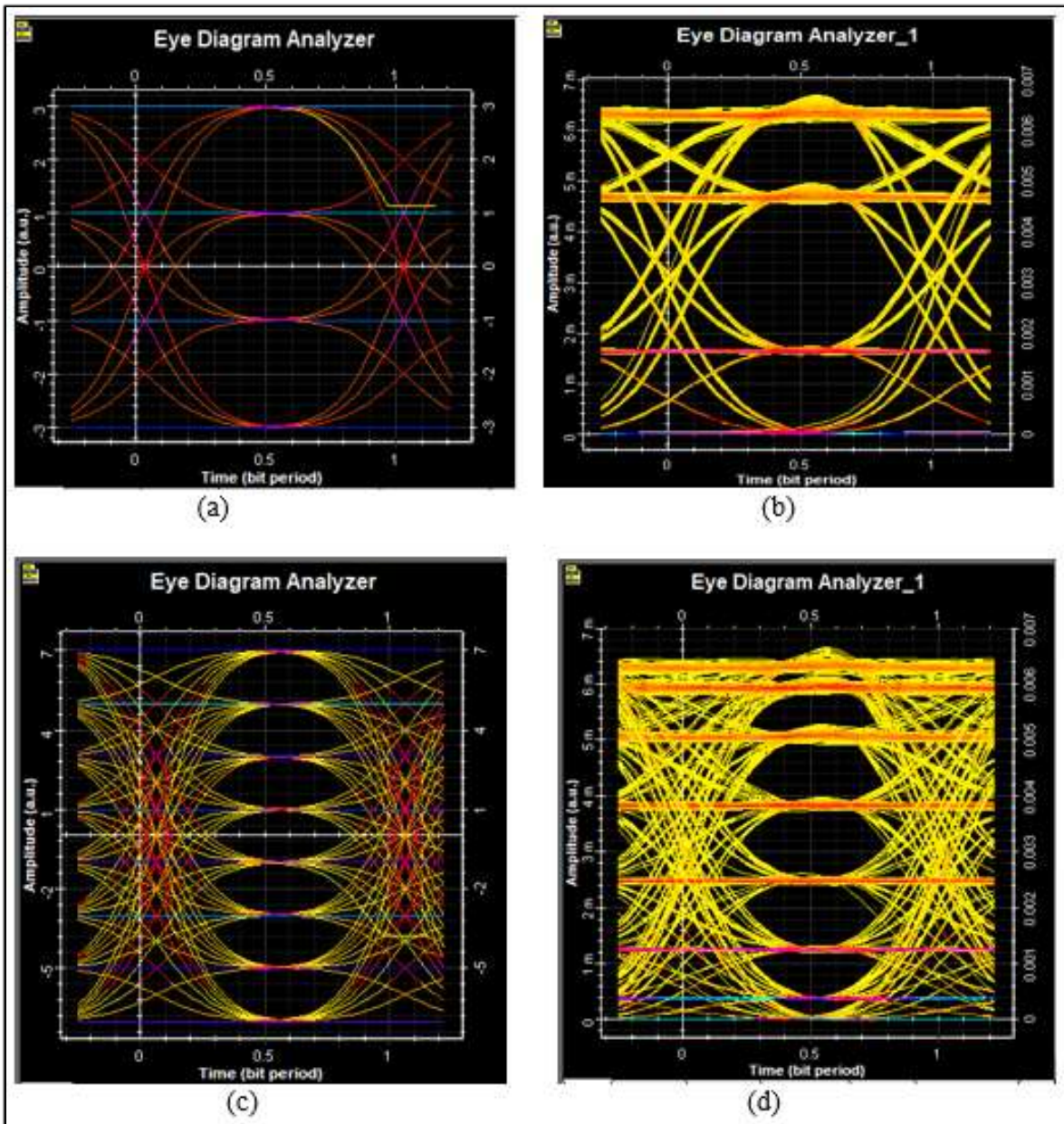


Figura 15 a) Diagrama de ojo de entrada sin distorcion PAM-4, b) Diagrama de ojo salida PAM-4, c) Diagrama de ojo de entrada sindistorcion PAM-8, d) diagrama de ojo de salida PAM-8

La solución a este inconveniente es realizar una pre-distorsión en la generación de la señal de modulación externa.

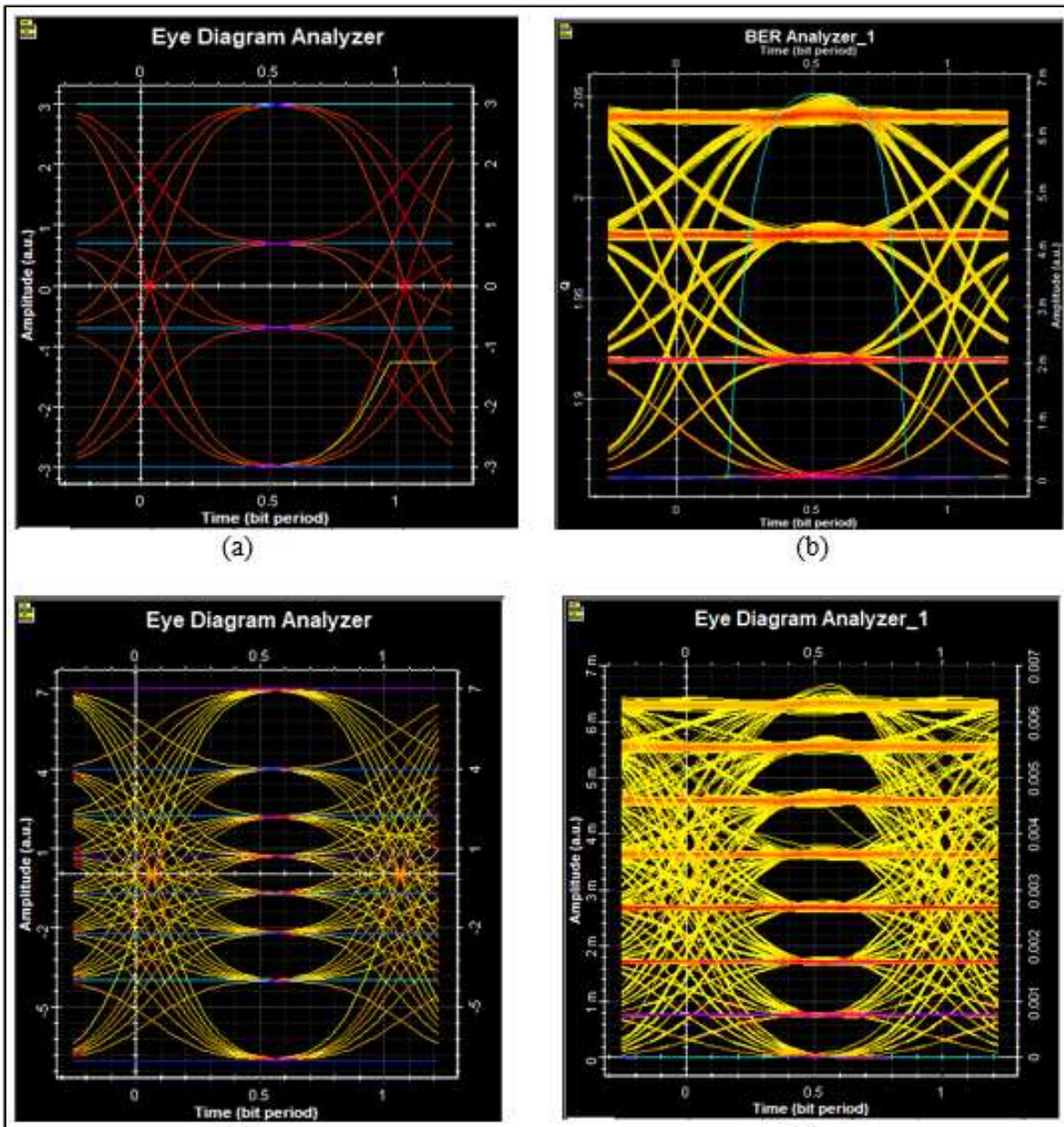


Figura 16 . a) Diagrama de ojo entrada con pre-distorsión PAM-4, b) Diagrama de ojo salida PAM-4, c) Diagrama de ojo de entrada con pre-distorsión PAM-8, b) diagrama de ojo de salida PAM-8, pruebas realizadas con 1 km de fibra óptica

Como se observa en la figura 16 la distorsión de amplitud previa en la entrada del modulador externo genera a la salida un diagrama de ojo más simétrico, lo que facilitará la demodulación y decodificación de la señal.

La predistorsión de amplitud empleada consiste en variar de forma manual en el módulo de Matlab los niveles de codificación Gray, lo que nos permitió, compensar la dispersión producida por la fibra óptica. (P. Gou, 2017)

Tabla 3.1 Niveles de código Gray con Pre-distorsión para PAM-4

CÓDIGO GRAY PAM-4		
SÍMBOLO	NIVEL DE VOLTAJE	PRE-DISTORSIÓN (MATLAB)
10	+3	+3
11	+1	+0,7
01	-1	-0,7
00	-3	-3

Tabla 1Tabla 3.1 Niveles de código Gray con Pre-distorsión para PAM-4

CÓDIGO GRAY PAM-4		
SÍMBOLO	NIVEL DE VOLTAJE	PRE-DISTORSIÓN (MATLAB)
100	+7	+7
101	+5	+4
111	+3	+2,2
110	+1	0,7
010	-1	-0,7
011	-3	-2,2
001	-5	-4
000	-7	-7

Tabla 2 Niveles de código Gray con Pre-distorsión para PAM-8

En las tablas anteriores se observa como se modificó los valores de la codificación Gray a la entrada eléctrica del MZ Modulator Analytical.

En nuestra simulación se colocó un atenuador óptico que representará los niveles de atenuación propios de la fibra y de elementos físicos de conexión como empalmes por fusión, conectores ópticos, etc.

Para una mejor decodificación se decidió hacerla mediante un módulo de Matlab el cual nos permitió hacer las calibraciones necesarias para determinar los niveles de decisión para decodificar los símbolos transmitidos.

A pesar de la pre distorsión de la amplitud, en PAM 4 y PAM 8, aún se observa en el diagrama de ojo una reducción en la apertura de ojo, lo que se interpreta como una interferencia entre símbolos, provocada por la dispersión modal la cual causa un retardo en la transmisión de la señal, que genera una reducción o limitación del ancho de banda o distancia de transmisión.

Para corregir esta dispersión vamos a proceder a calcular los valores tanto de distancia como en dispersión de una fibra óptica para el caso de una fibra multimodo G652 con dispersión cromática (CD) de 16ps/(nm Km) :

$$Fibra\ G652D: CD = 16 \frac{ps}{nm\ km}$$

$$Disp(por\ nm) = 16 \frac{ps}{nm\ km} \times 20\ km$$

$$Disp(por\ nm) = 320 \frac{ps}{nm}$$

Para la fibra de compensación:

$$fibra_{comp}: -160 \frac{ps}{nm\ km}$$

$$L = \frac{320 \frac{ps}{nm}}{-160km} = 2km$$

$$Fibra\ G652D: CD = 16 \frac{ps}{nm\ km}$$

$$Disp(por\ nm) = 16 \frac{ps}{nm\ km} \times 40\ km$$

$$Disp(\text{por nm}) = 640 \frac{ps}{nm}$$

Para la fibra de compensación:

$$fibracomp: -160 \frac{ps}{nm km}$$

$$L = \frac{640 \frac{ps}{nm}}{-160 km} = 4 km$$

Aplicando la fibra de compensación el diagrama de ojos presenta mejoras como se muestra a continuación:

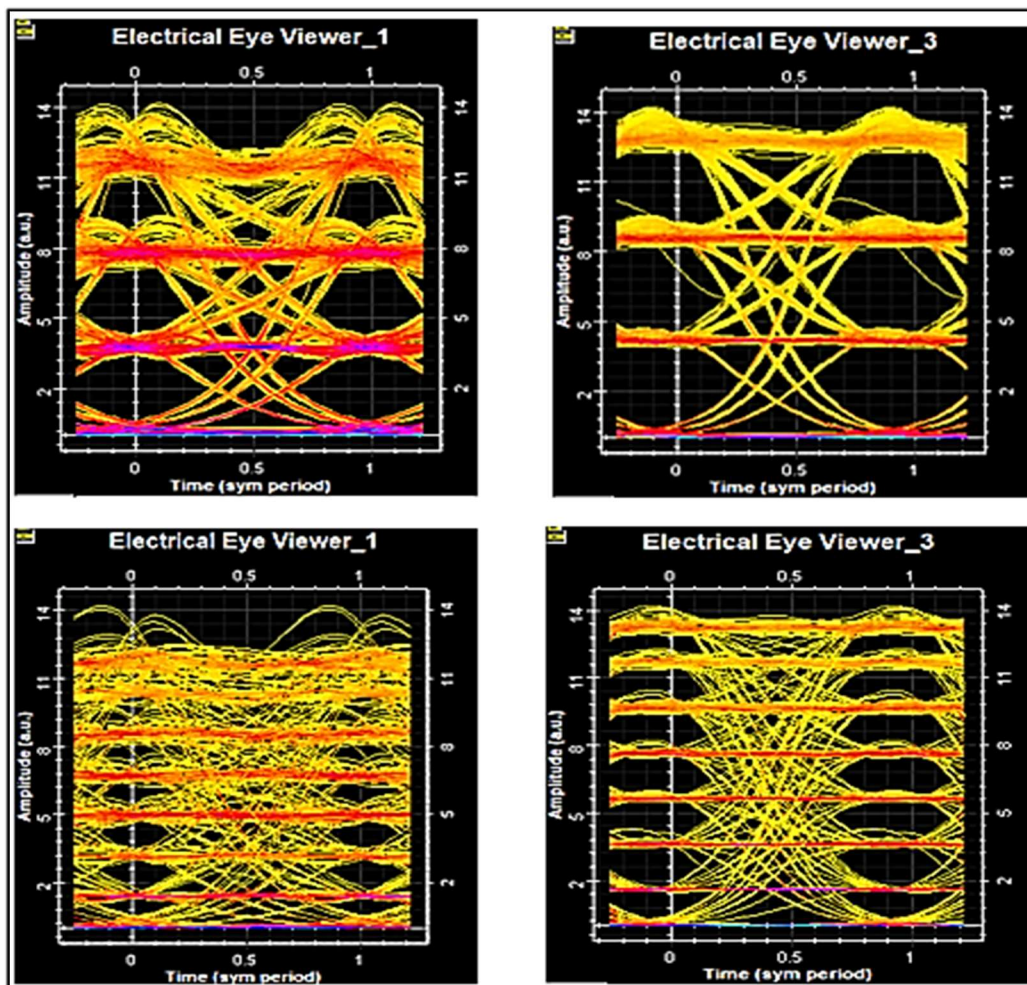


Figura 17 Mejora en diagrama de ojo aplicando fibra de compensación Fuente: Propia

Otro inconveniente que se encontró en la simulación fue el desplazamiento de bits, como se observa en la siguiente figura:

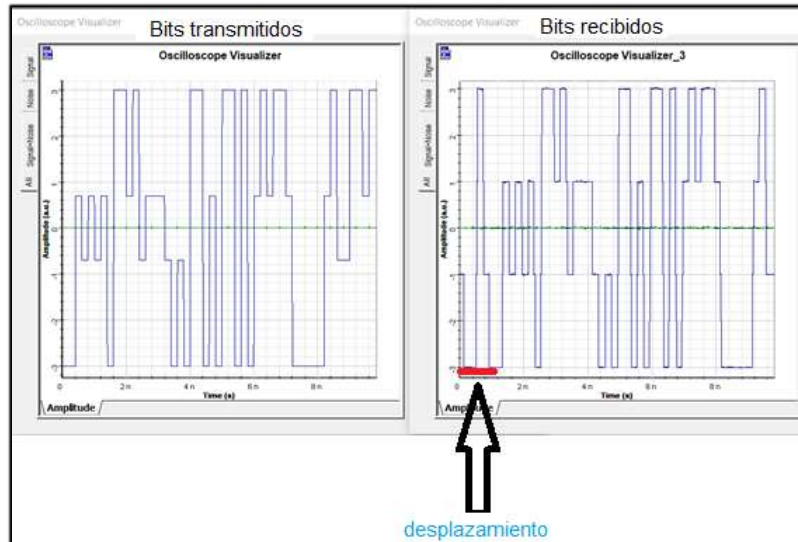


Figura 18 Desplazamiento de bits, Fuente: Propia

Tal desplazamiento se lo logró corregir mediante programación en Matlab, en el demodulador recorriendo el bit inicial de realizar el muestreo para la demodulación.

```
for i = inici_intervalo+40:tasa_muestreo:C %40 corrige el corrimiento a 40km +8 corrige el corrimiento a 20km
    datos_recibidos(pos)=round(Input_auxiliar3.Sampled.Signal(i)); %datos recibidos
    pos=pos+1;
```

Figura 19: programación en Matlab para corregir el desplazamiento de Bits

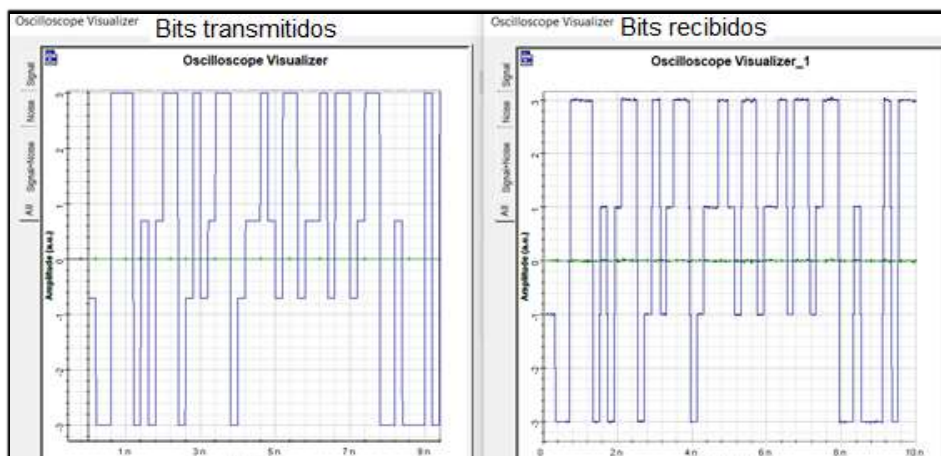


Figura 20 Resultado de Bits transmitidos aplicando ajuste por Matlab, Fuente: Propia

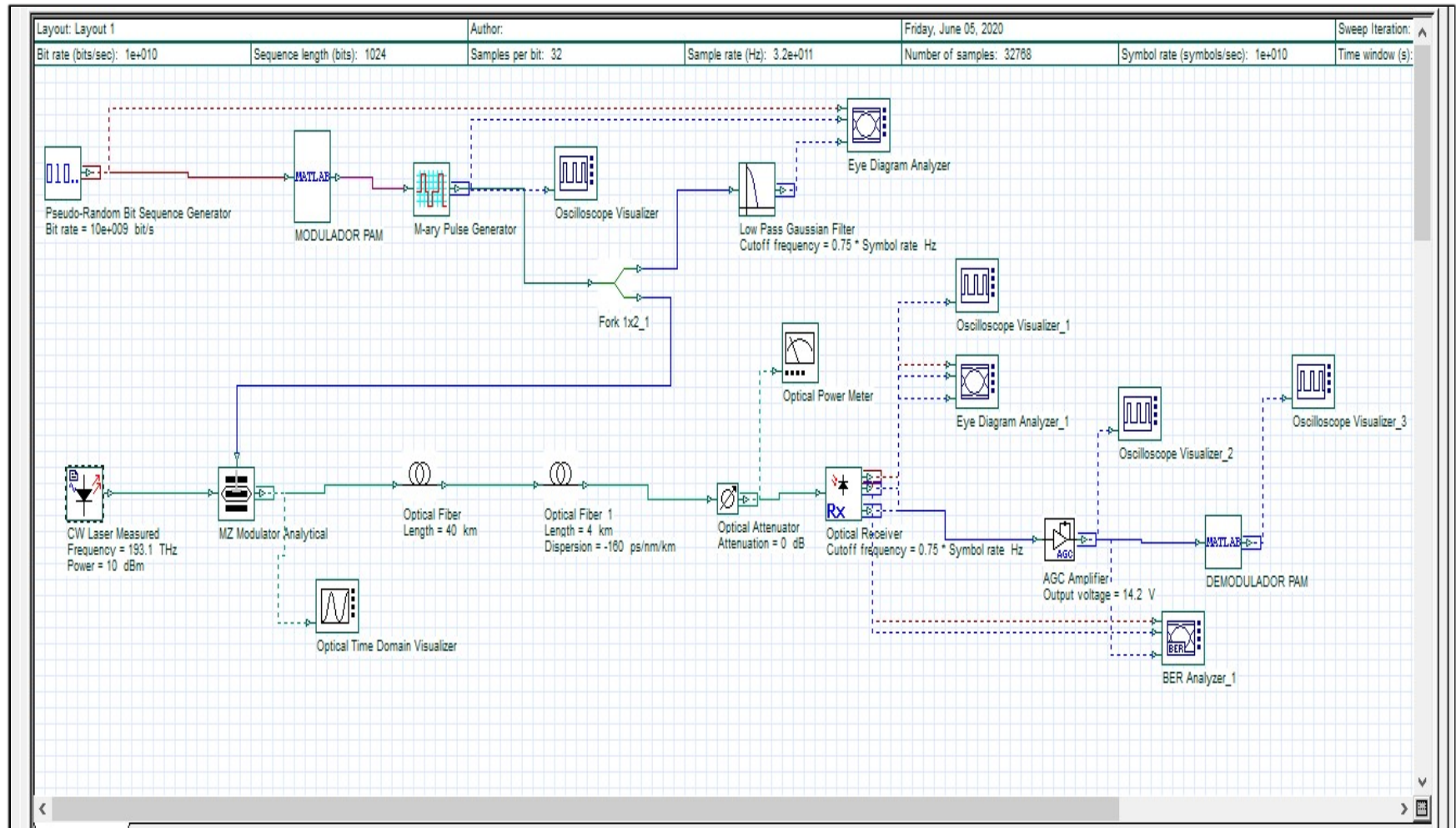


Figura 20.- Simulación final. Fuente propia

Como se observa en la figura 20, se corrigió el desplazamiento de los bits lo que disminuyó la cantidad de bits errados.

3.3 Diseño de la simulación

El esquema de la simulación se muestra en la figura 20, a continuación se va a describir cada elemento de la simulación y el rol que cumplieron.

Pseudo Random Bit Sequence Generator(generator de secuencia de Bit).- Se utiliza para generar una secuencia binaria de bits pseudoaleatorios. (Optiwave, 2020)

Al hacer doble clic en el bloque se muestran las propiedades principales (Figura 21). Al hacer doble clic al lado de la tasa de bits, podemos cambiar la tasa de bits del bloque para basarla en otros parámetros o hacer que obtenga su valor de una función. Al presionar Evaluar podemos ver cuál es el valor actual de la tasa de bits. Si queremos cambiar el valor de la tasa de bits definida para todo el proyecto, podemos hacer doble clic en nuestro espacio de trabajo y aparecerá la ventana de parámetros globales.

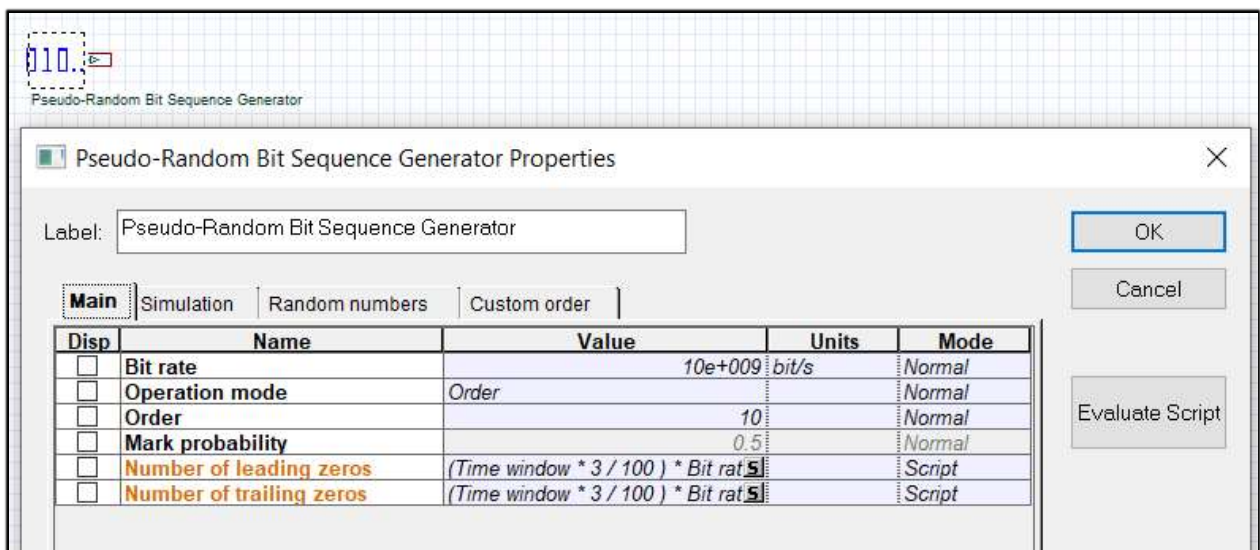


Figura 21.- Pseudo-Random Bit Sequence Generator Properties. Fuente propia

Esta secuencia de bits generados ingresa al componente MATLAB, para su procesamiento, codificación y modulación.

CW Laser Measured.- Genera una señal óptica de onda continua (Continuous Wave). Puede ingresar parámetros como ancho de línea, supresión de modo lateral y RIM (relative intensity noise) ruido de intensidad relativa.

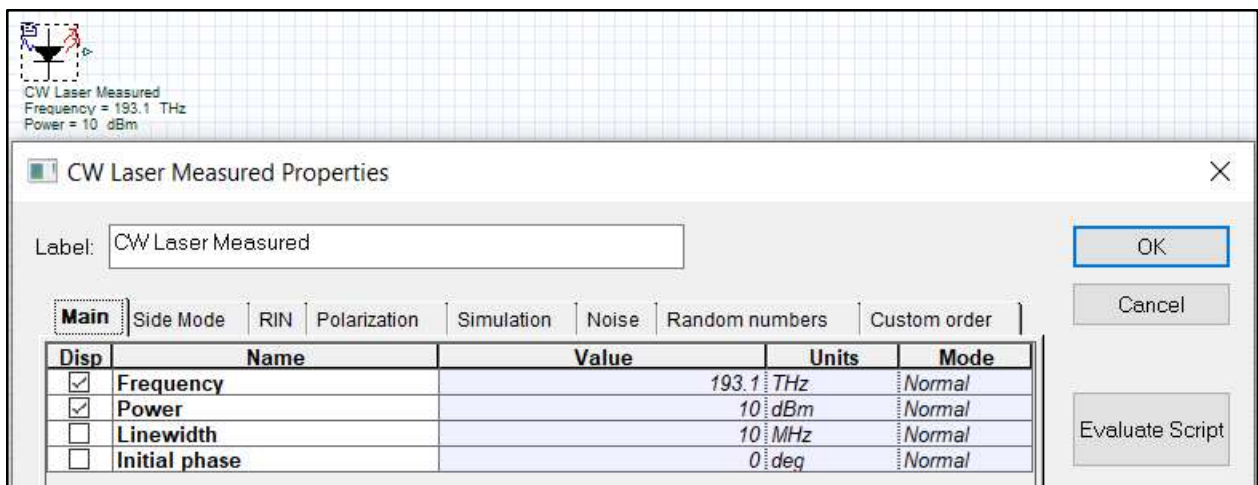


Figura 22.- CW Lasser Measured

MATLAB Component.- Habilita la utilización de componentes creados en MATLAB.

Al seleccionar Load MATLAB, el software MATLAB se carga antes de que comience el cálculo. Permanecerá abierto después de que se complete el cálculo. Utilice esta opción cuando desee mostrar gráficos y resultados calculados de MATLAB. De forma predeterminada, MATLAB se carga y se cierra durante los cálculos.

En este modelo, usted define el número de puertos de entrada y de salida y el tipo de señal (óptica, eléctrica, binaria o M-aria) de cada puerto. Para cada puerto de entrada, OptiSystem

ensambla una estructura con la señal y coloca esta estructura en el espacio de trabajo de MATLAB.

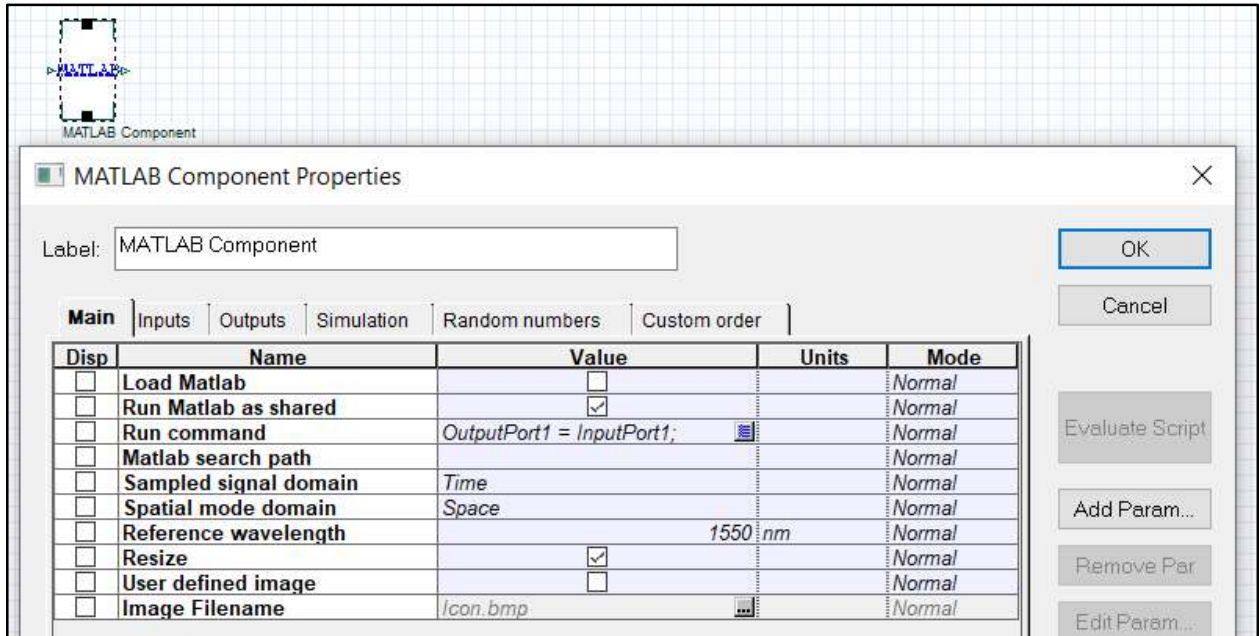


Figura 23.- MATLAB Component. Fuente: propia

Con la ayuda de este componente de MATLAB, se habilitará el modulador y demodulador de nuestra simulación,

El ingreso de los datos (Bits) desde el Pseudo Random Bit Sequence Generator, se elige el tipo de datos de ingreso como Binario, y el de salida como M-ary (Fig. 24).

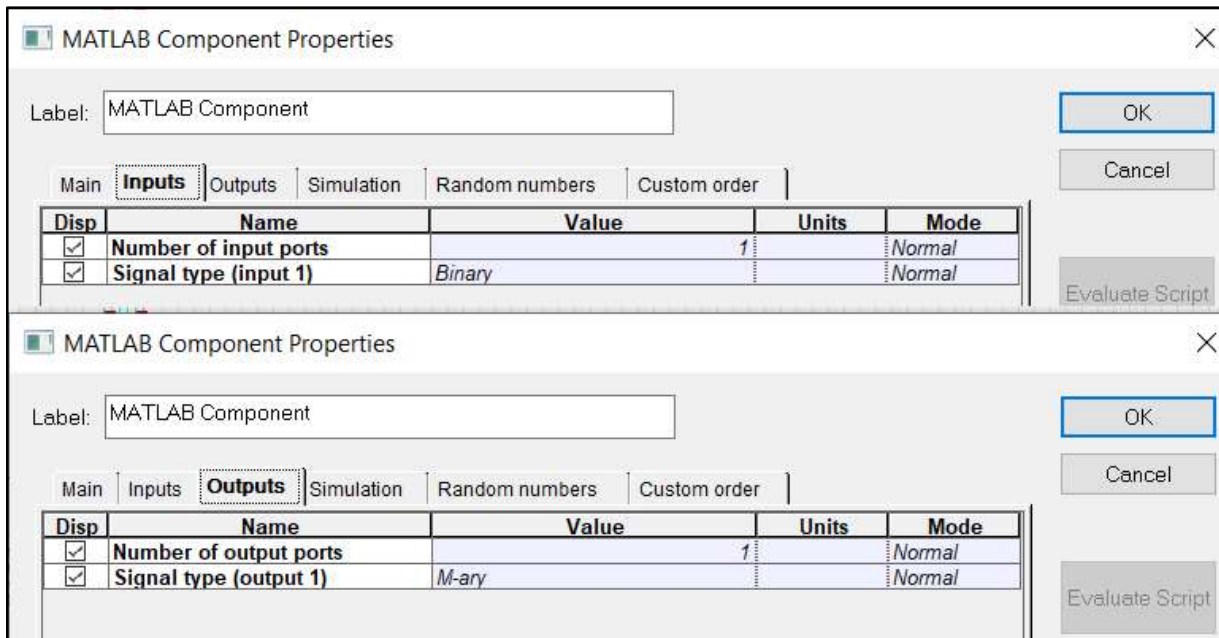


Figura 24.- Configuración de Input y Output MATLAB Component. Fuente: Propia

M-ary Pulse Generator.- Genera pulsos multinivel según la entrada de señal M-ary.

Las señales M-Ary son señales multinivel que se utilizan para tipos especiales de codificación, como PAM, QAM, PSK y DPSK. Las señales M-Ary son similares a las señales binarias. Sin embargo, las señales de M-Ary pueden tener cualquier nivel en lugar de solo niveles altos (1) y bajos (0).

Una vez realizada la modulación en MATLAB, asignando niveles a la codificación Gray, la señal ingresa al M-ary Pulse Generator, el cual asigna valores a los pulsos de voltaje para dicha codificación.

En la figura 25 se muestra las propiedades del componente M-ary.

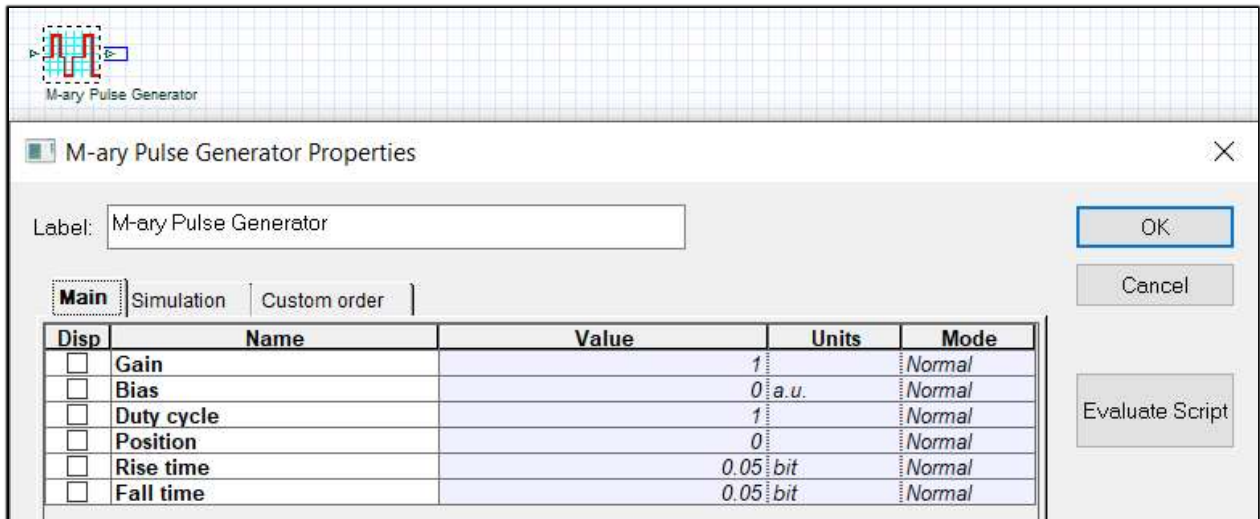


Figura 25.- M-ary Pulse Generator. Fuente: PropiaOscilloscope visualizer

Oscilloscope visualizer.- Es un osciloscopio visualizador que permite al usuario calcular y mostrar señales eléctricas en el dominio del tiempo. Puede mostrar la amplitud de la señal y la autocorrelación.

Lo usaremos en varios puntos de nuestra simulación los cuales nos dan criterio cualitativos de la relación entre las señales transmitidas y las recibidas.

En nuestra simulación lo utilizamos e la salida del M-ary Pulse Generator y a la salida del Demodulador PAM, así comparamos los niveles y formas de las señales transmitidas con la recibidas (Fig. 26).

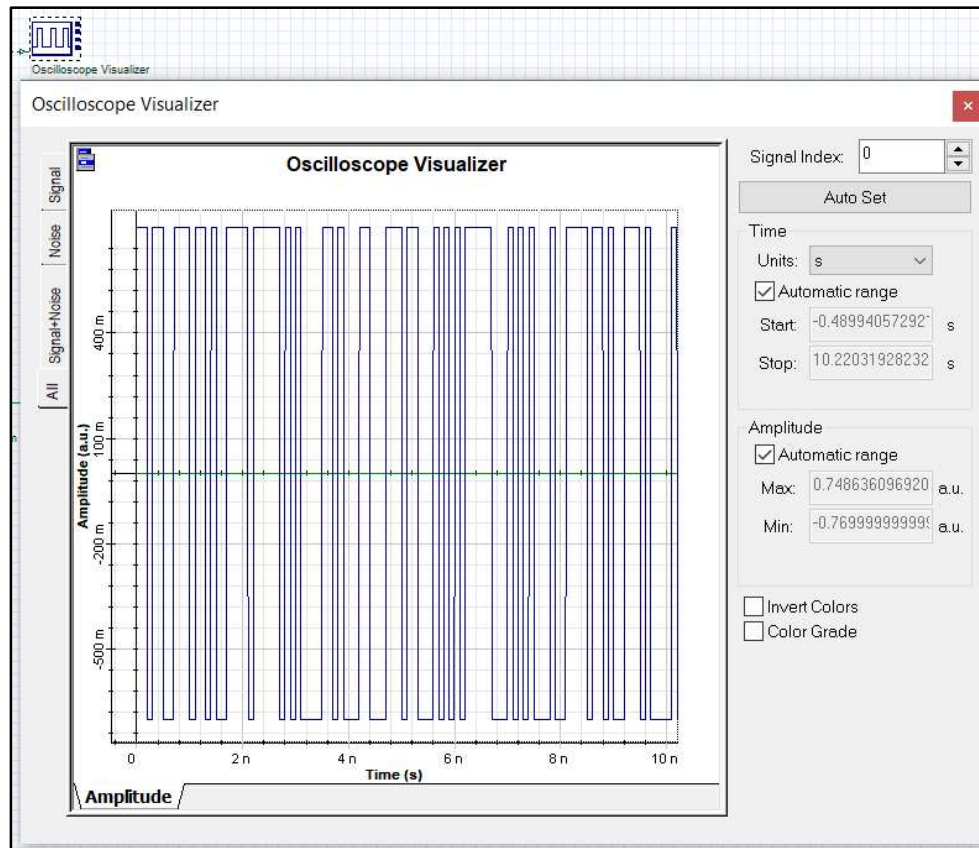


Figura 26. Oscilloscope Visualizer. Fuente: Propia

Eye Diagram Analyzer.- Este visualizador permite al usuario calcular y mostrar el diagrama de ojo de la señal eléctrica automáticamente. Puede calcular diferentes métricas del diagrama del ojo, como el factor Q, la apertura de los ojos, el cierre de los ojos, el índice de extinción, la altura del ojo, el índice de violación de la máscara, etc. (Optiwave, 2020)

Este componente de Optisystem también lo colocamos en varios puntos de nuestro circuito en especial a la salida del M-ary y a la entrada del Demulador PAM, justo a la salida del amplificador de voltaje, esto nos permite comparar la calidad de apertura del ojo en la transición y recepción, con dichos diagramas realizamos una valoración cualitativa de la señal transmitida y la recibida.

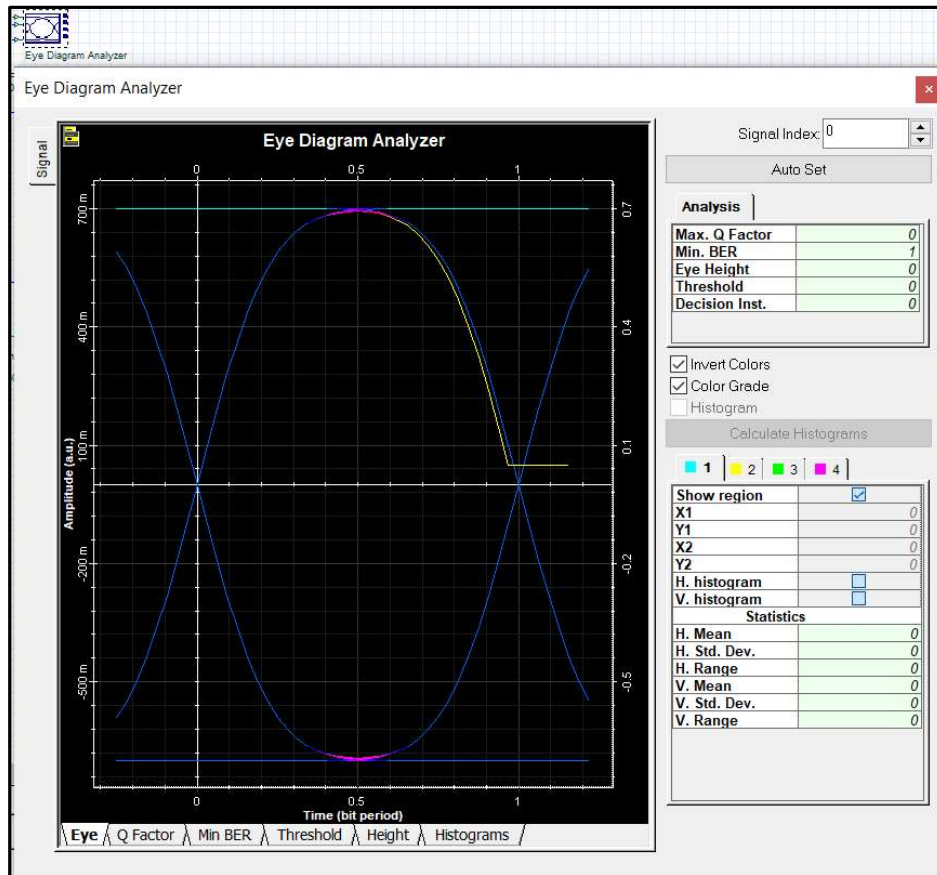


Figura 27. Eye Diagram Analyzer. Fuente: Propia

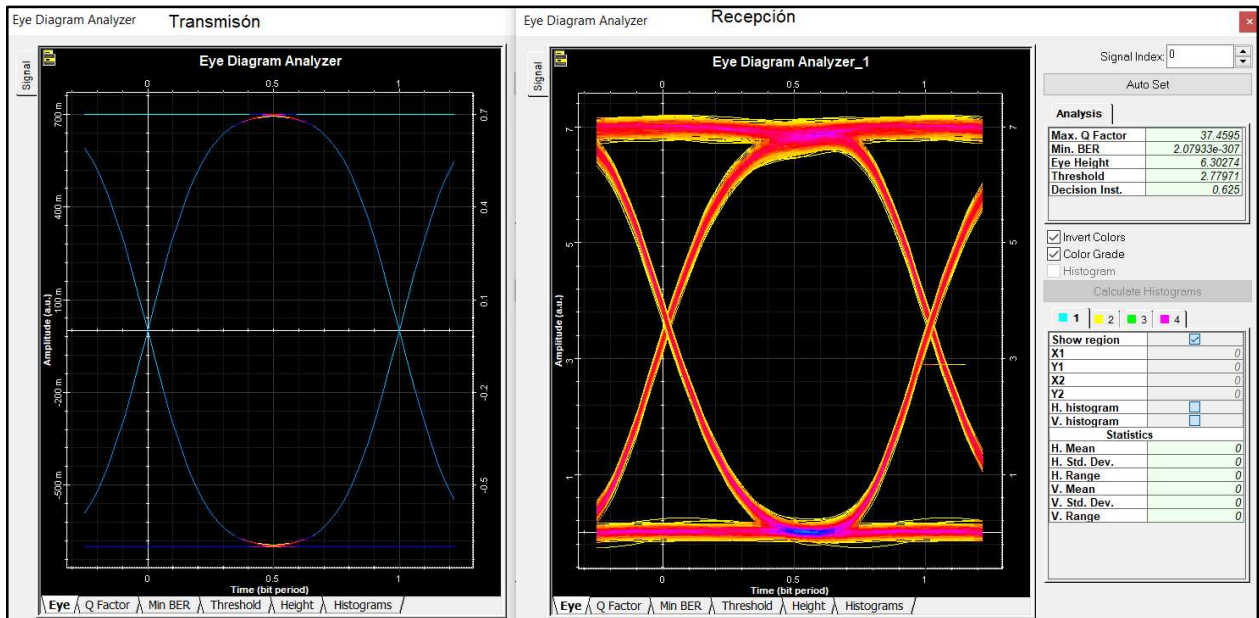


Figura 28.- Diagramas de ojo en la transmisión y recepción. Fuente: Propia

MZ Modulator Analytical.- Simula un modulador Mach-Zehnder utilizando un modelo analítico. Posee dos entradas y una salida, de sus dos entradas una es óptica que viene del CW Laser Measured, y la otra es eléctrica la cual viene del M-ary Pulse Generator.

La salida es óptica cuya intensidad depende del voltaje de la entrada eléctrica, esto se debe a un efecto electroóptico, que utiliza un voltaje aplicado externamente para variar los índices de refracción en las ramas de la guía de ondas.

efecto electroóptico, se puede utilizar un voltaje aplicado externamente para variar los índices de refracción en las ramas de la guía de ondas.

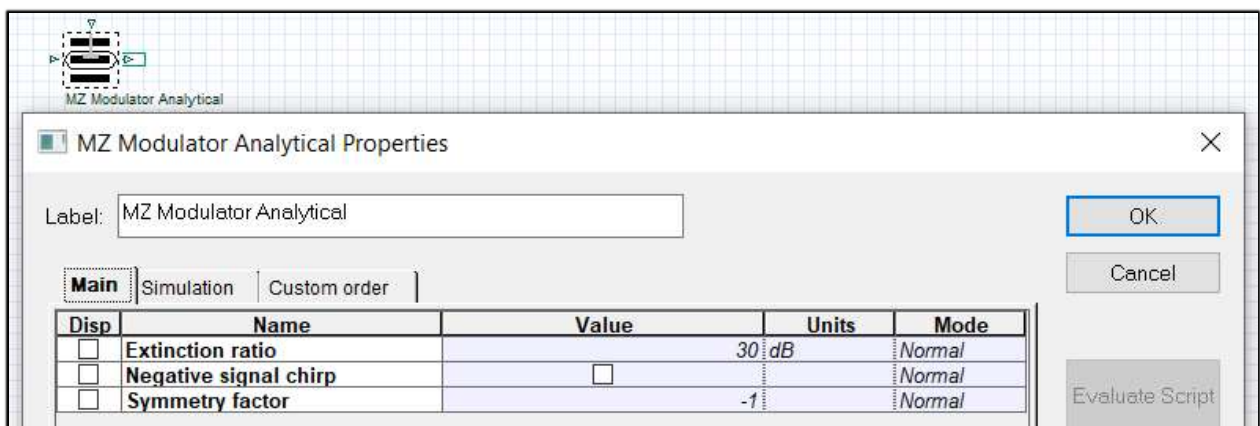


Figura 29.- MZ Modulator Analytical. Fuente: Propia

Optical Fiber.- El componente de fibra óptica simula la propagación de un campo óptico en una fibra monomodo con los efectos dispersivos y no lineales tomados en cuenta por una integración numérica directa de la ecuación de Schrödinger no lineal modificada (NLS) (cuando se considera el caso escalar) y una sistema de dos ecuaciones NLS acopladas cuando el estado de polarización de la señal es arbitrario. Las señales ópticas muestreadas residen en una sola banda de frecuencia, de ahí el nombre campo total. Las señales parametrizadas y los contenedores de ruido solo se atenúan.

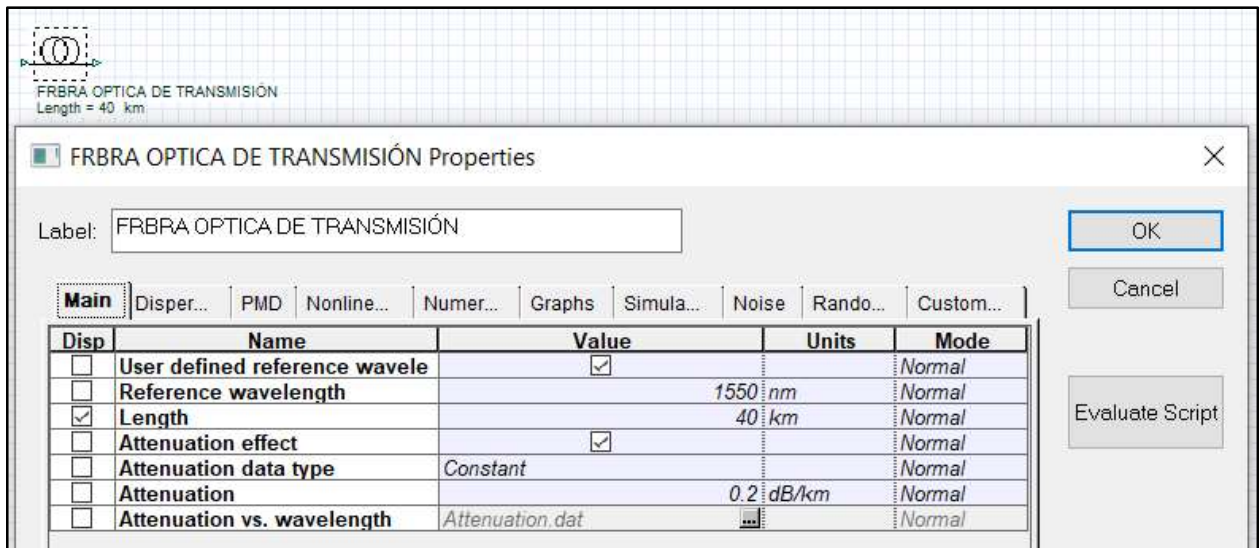


Figura 30.- Optical fiber Component. Fuente: Propia

Se puede configurar varios parámetros en el componente de fibra óptica, nosotros para la transmisión simularemos una fibra monomodo de estándar G652D que por sus características, es la de mayor despliegue en infraestructuras actuales en redes PON, por lo que se configuró con los valores típicos de este tipo de fibras.

En este trabajo se usó una fibra de compensación en la cual se modificó su dispersión cromática a un valor de -160 ps/nm/km , como se muestra en la figura 32, cálculo realizado en las páginas anteriores de este trabajo.

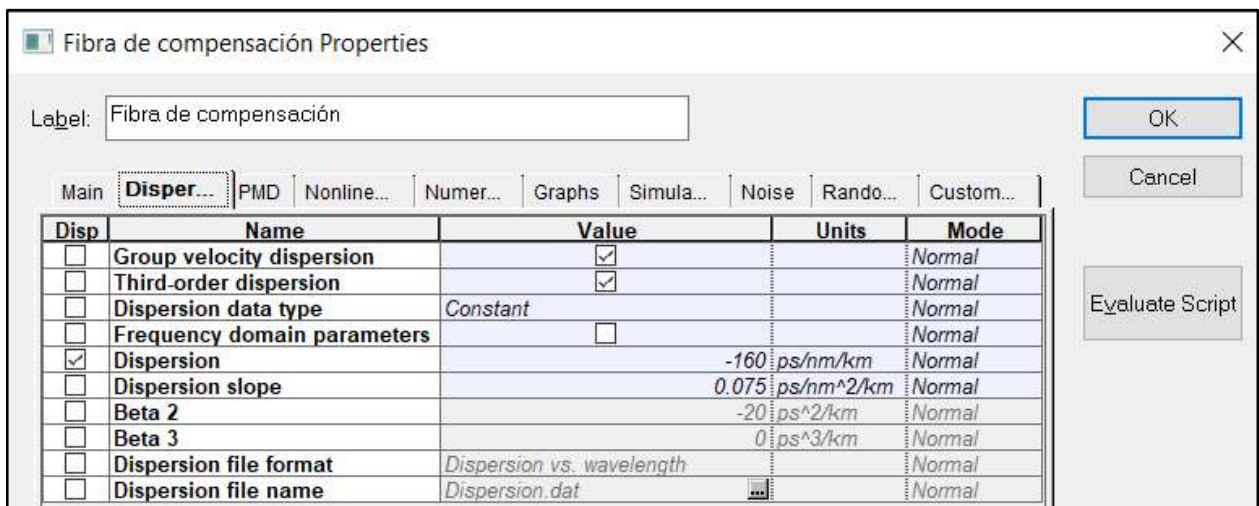


Figura 31.- Dispersión fibra de compensación. Fuente: Propia

Atenuador Óptico.- este componente atenúa la potencia óptica según el valor configurado.

Este elemento se añadió a la simulación para representar la atenuación por curvaturas fusiones que presentaría una fibra óptica y implementada.

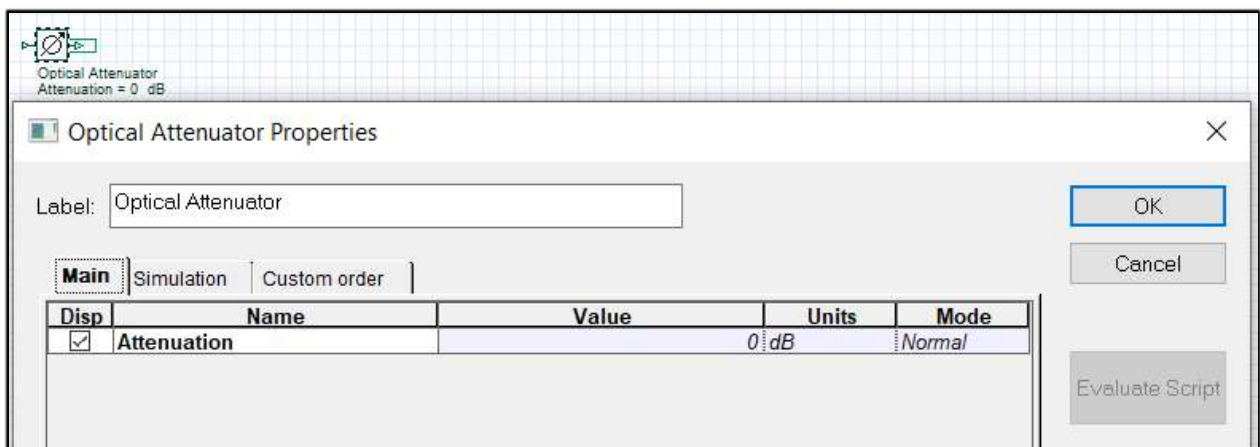


Figura 32. Atenuador Óptico. Fuente: Propia

Optica Power Meter.- Este visualizador permite al usuario calcular y mostrar la potencia media de las señales ópticas. Permite observar la potencia óptica en vatios (W) y decibelio-milivatio (Dbm).

En nuestra simulación este componente se lo coloco antes del ingreso de la fibra al receptor óptico, nos proporcionó los datos de la potencia óptica en dBm para construir nuestra grafica de resultados.

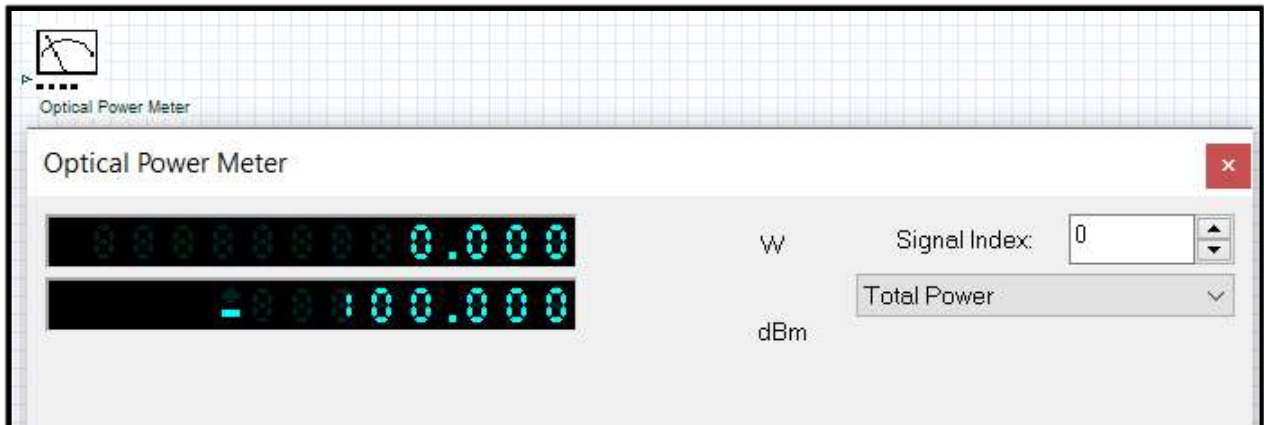


Figura 33.- Optical Power Meter. Fuente Propia

Receptor Óptico.- Este componente es un subsistema de receptor óptico construido con un fotodetector PIN o APD, un filtro Bessel y un regenerador 3R.

En el caso de nuestra simulación se usó como un fotodetector PIN

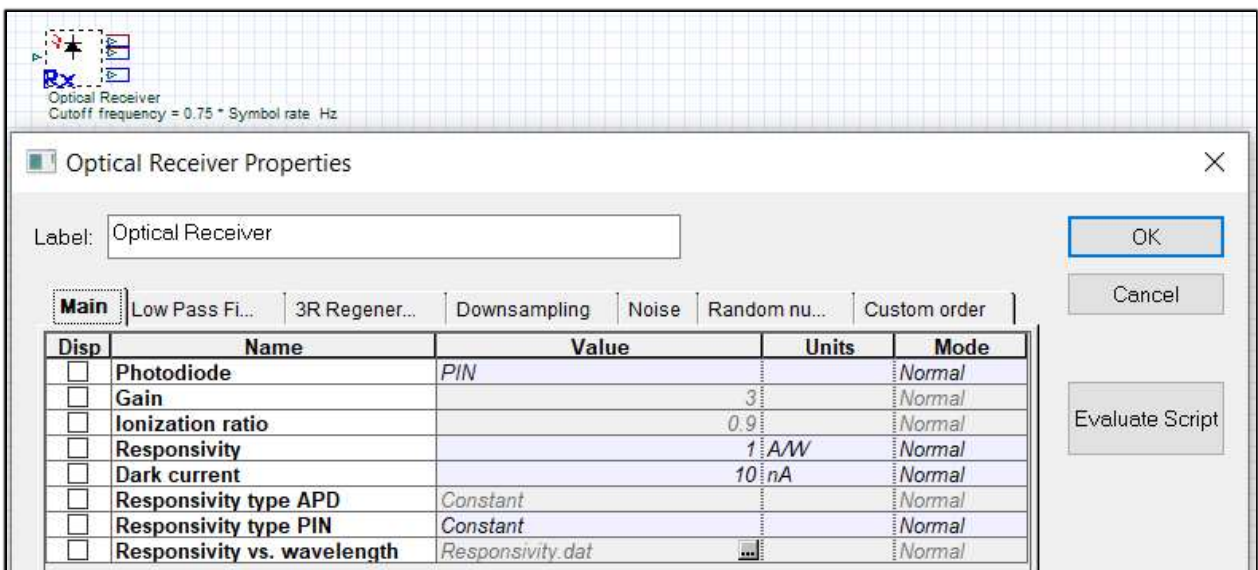


Figura 34.- Receptor Óptico. Fuente Propia.

Amplificador de Voltaje.- Este componente es un amplificador limitador eléctrico con factor de ruido definido por el usuario. Tiene ganancia dependiente de la señal y ruido térmico aditivo.

Este componente se lo uso para amplificar el voltaje en la recepción, dependiendo del nivel de PAM, a valores que nos permiten realizar la demodulación y decodificación en el componente MATLAB.

Para el caso de PAM-2 se lo configuro a 2V, para PAM-4 a 7.2 V y para PAM-8 a 14.2 V.

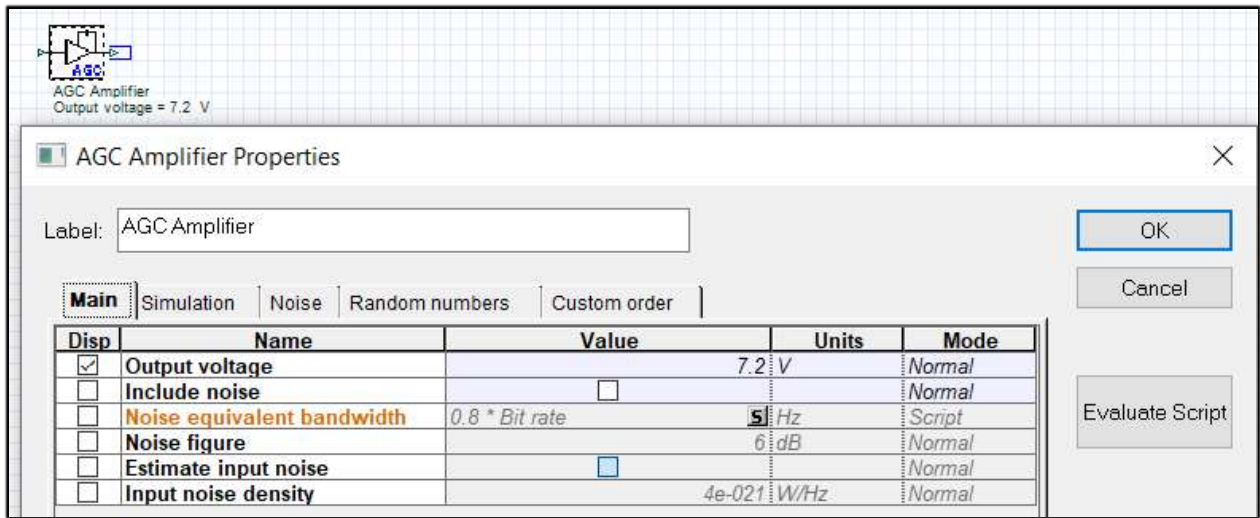


Figura 35.- Amplificador de Voltaje. Fuente: Propia.

3.4 Cosimulación en MATLAB

3.4.1 Modulador

El proceso de modulación se realizó en MATLAB, se tomó como ingreso los datos entregados por el generador de secuencia de Bits, el número de Bits transmitidos se los puede modificar en los parámetros de diseño (figura 37), una vez detectado los datos la programación en MATLAB procede a construir los símbolos dependiendo del nivel de PAM, si es PAM-2 no se realiza ninguna codificación de símbolos, en el caso de PAM-4 se toman de dos en dos los Bits para codificarlos, y de ser el caso de PAM-8 de tres en tres.

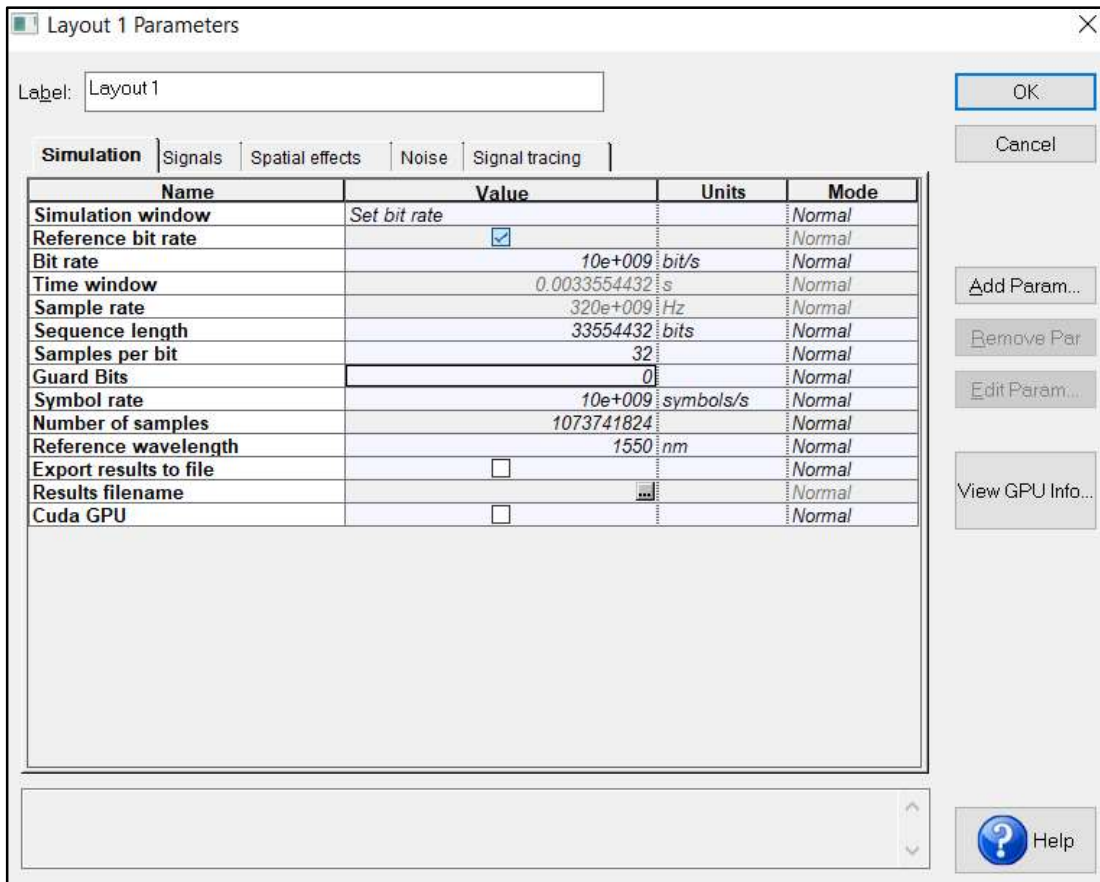


Figura 36.- Layout Parameters. Fuente propia

En esta parte de la programación hay q definir la variable “k” según el nivel de modulación PAM, definida la variable “k”, se procede a codificar los símbolos si “k” es igual a 2 o 3.

```

if strcmp(InputPort1.TypeSignal, 'Binary')
N_BIT=length(InputPort1.Sequence);%longitud data
k=1; M=2^k;%number of bits, amplitudes
Fb=8; Ns=8; Fs=Ns*Fb;%symbol rate and sampling rate
  
```

Figura 37.- Definición del nivel de modulación PAM. Fuente: Propia

Codificados los símbolos, se asigna a cada símbolo un nivel de voltaje según la codificación Gray, tomando en cuenta los valores de pre-distorsión explicados en la páginas 33 y 34, y esta es la salida del modulador hacia MZ Modulator Analytical.

3.4.2 Demodulador

Una vez que la señal recorre la fibra óptica de transición y de compensación llega al fotorreceptor donde la potencia óptica es transformada en potencia eléctrica, esta potencia es inyectada en un amplificador para llevarla a niveles que maneja cada modulación PAM.

Mediante un análisis cualitativo con la ayuda del diagrama de ojo y una calibración manual se determinaron los límites de decisión para la decodificación.

Niveles de decisión = $n - 1$, donde n es el nivel de modulación PAM.

Para PAM-2 será un nivel de decisión, para PAM-4 serán tres y para PAM-8 serán 7.

La toma de decisión se la va a realizar en un medio del tiempo de periodo, traducido esto a lenguaje de programación en MATLAB es a un medio de las muestras por periodo que se realizan para cada pulso, se toman 32 muestras por periodo de pulso, así que la toma de decisión es a la muestra número 16 para cada periodo.

Voltaje de decisión para PAM-2: $V_1 = 1$

Criterios de decisión PAM-2:

$$\text{Si } V_m < V_1, V_{RX} = -1;$$

$$\text{Si } V > V_1, V_{RX} = 1;$$

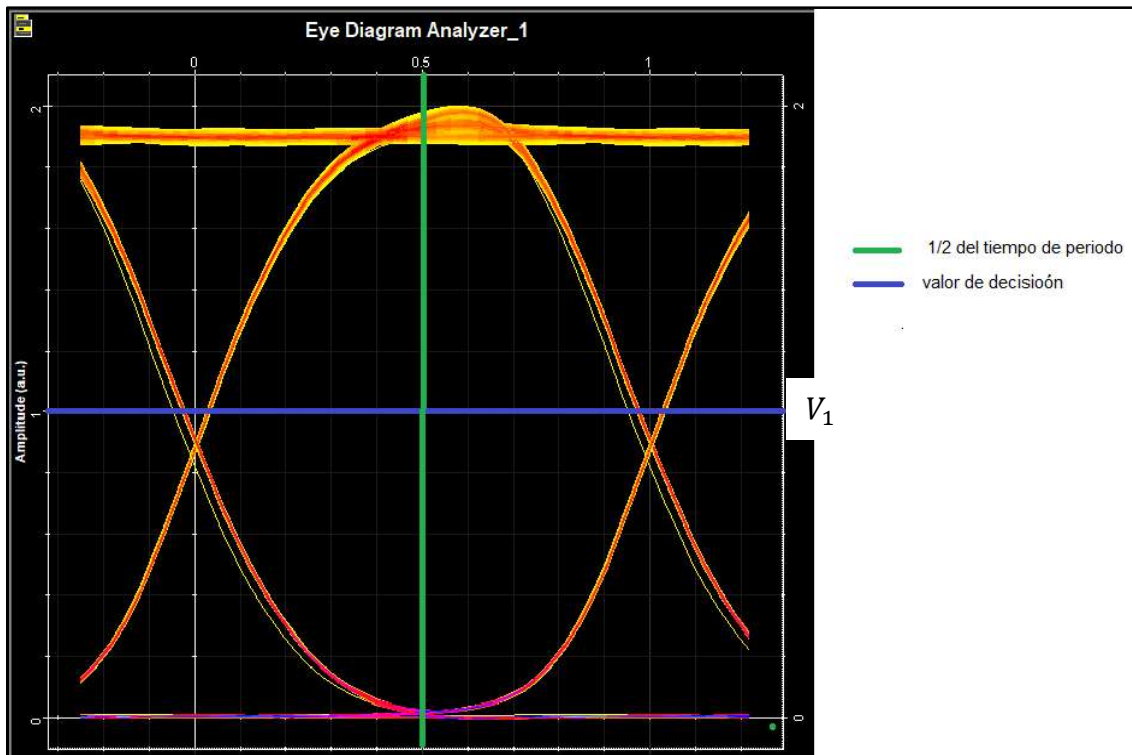


Figura 38.- Voltaje de decisión para PAM-2. Fuente: Propia

Voltajes de decisión para PAM-4: $V_1 = 1.2$

$$V_2 = 3.5$$

$$V_3 = 5.9$$

Criterios de decisión PAM-4:

$$\text{Si } V_m < V_1, V_{RX} = -3;$$

$$\text{Si } V_1 < V_m < V_2, V_{RX} = -1;$$

$$\text{Si } V_2 < V_m < V_3, V_{RX} = 1;$$

$$\text{Si } V_m > V_3, V_{RX} = 3;$$

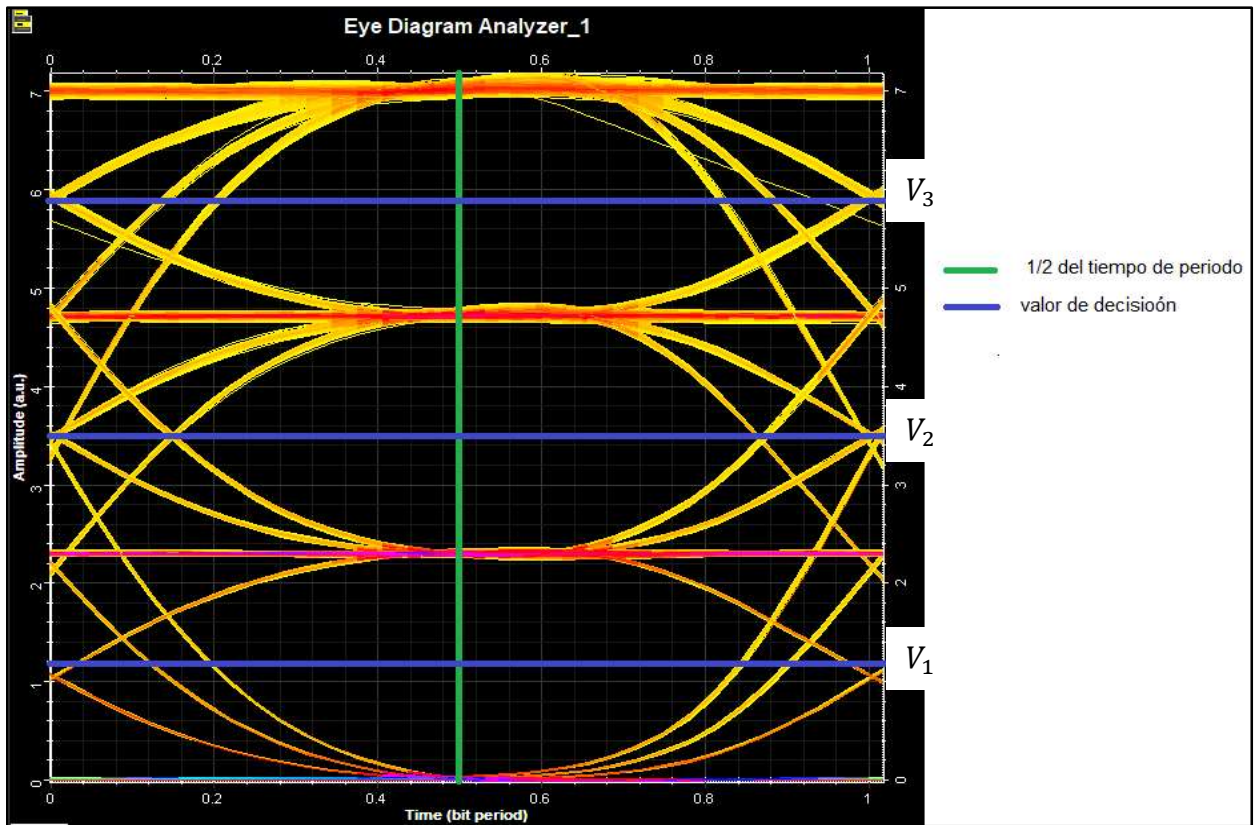


Figura 39.- Voltajes de decisión para PAM-4. Fuente: Propia

Voltajes de decisión para PAM-8: $V_1 = 1.52$

$$V_2 = 3.28$$

$$V_3 = 5.02$$

$$V_2 = 6.80$$

$$V_3 = 8.50$$

$$V_2 = 10.13$$

$$V_3 = 12.12$$

Criterios de decisión PAM-8:

$$\text{Si } V_m < V_1, V_{RX} = -7;$$

- $Si V_1 < V_m < V_2, V_{RX} = -5;$
- $Si V_2 < V_m < V_3, V_{RX} = -3;$
- $Si V_3 < V_m < V_4, V_{RX} = -1;$
- $Si V_4 < V_m < V_5, V_{RX} = 1;$
- $Si V_5 < V_m < V_6, V_{RX} = 3;$
- $Si V_6 < V_m < V_7, V_{RX} = 5;$
- $Si V_m > V_7, V_{RX} = 7;$

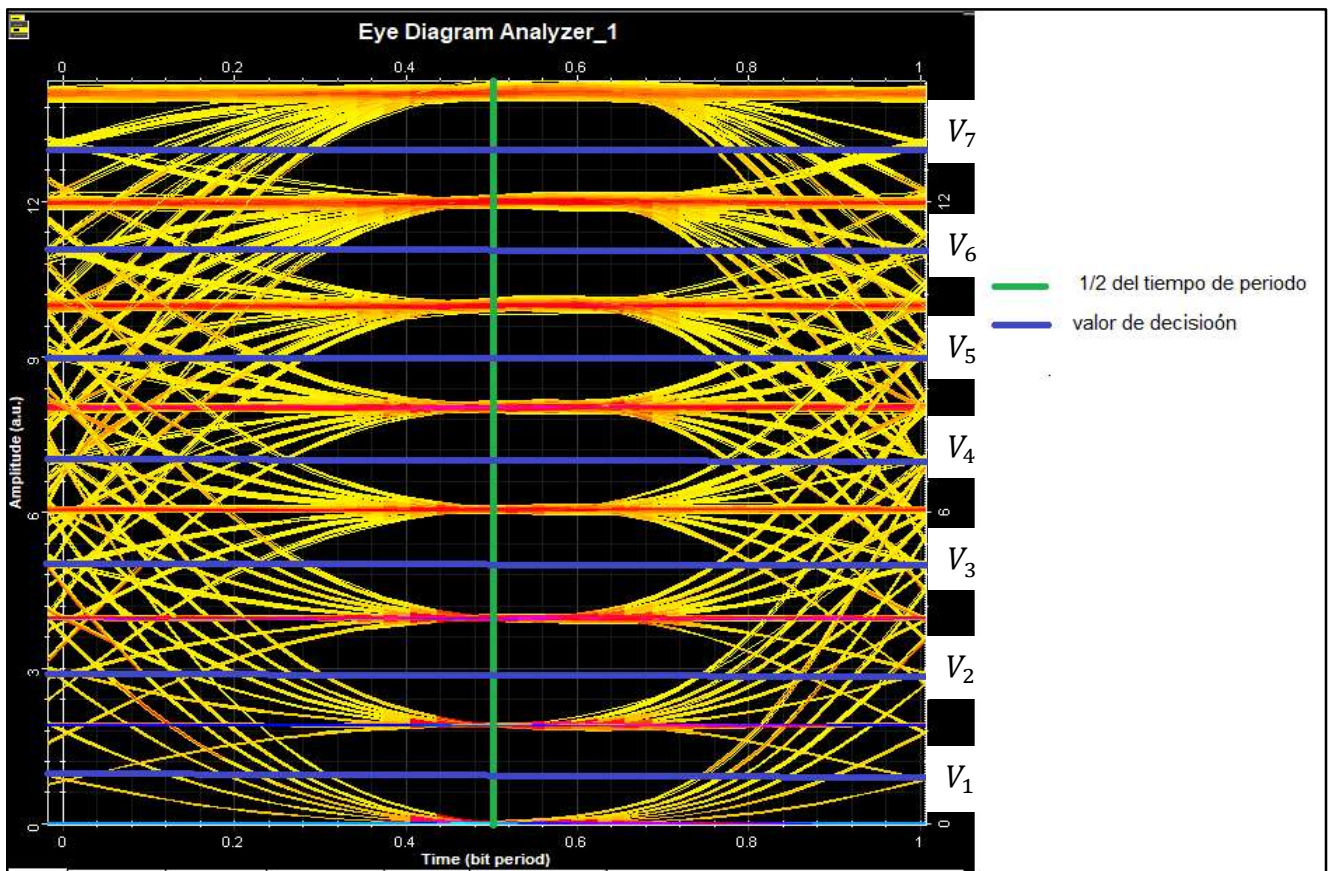


Figura 40.- Voltajes de decisión para PAM-8. Fuente: Propia

También en el atenuador se realiza el cálculo del BER, este cálculo se lo realiza comparando los bits transmitidos con los bits recibidos, se determina la cantidad de bits erróneos, a continuación se divide el número de bits errados para el numero de bits transmitidos.

$$BER = \frac{\text{Número de bits erroneos recibidos}}{\text{Número de bits transmitidos}}$$

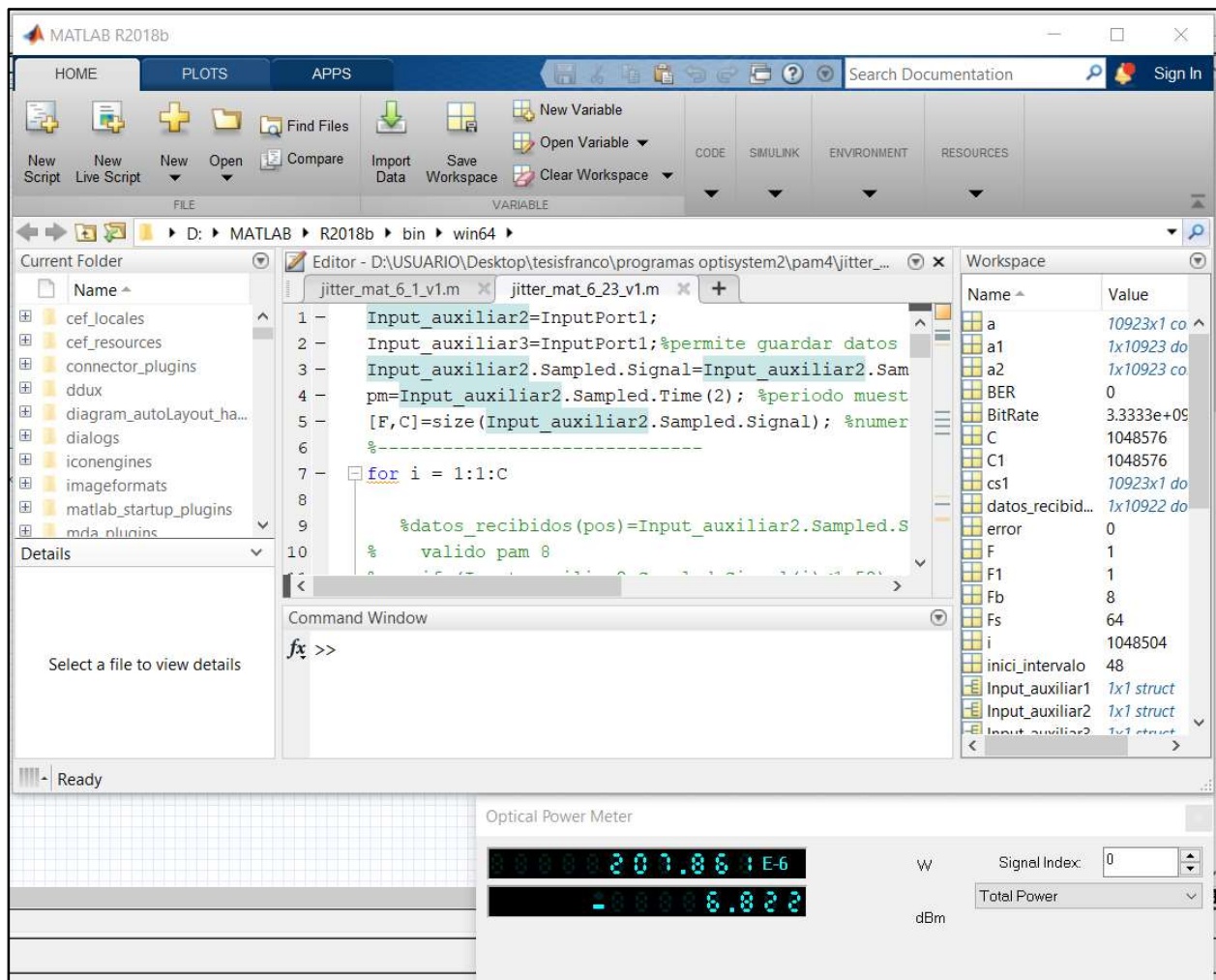


Figura 41. Medición de potencia recibida y BER. Fuente: Propia

3.5 Resultados.

Las simulaciones se las realizaron al 20 y 40 Km para cada nivel de modulación PAM, con 32718 Bits, se fue variando la atenuación mediante el atenuador óptico, la potencia óptica del circuito se la obtiene del Optical Power Metter componet, de Optisystem.

Para cada variación de atenuador óptico se obtiene una potencia del circuito y su respectivo valor de BER, con estos datos se procede a graficar los datos, por sus características se realiza una gráfica logarítmica para su mejor interpretación.

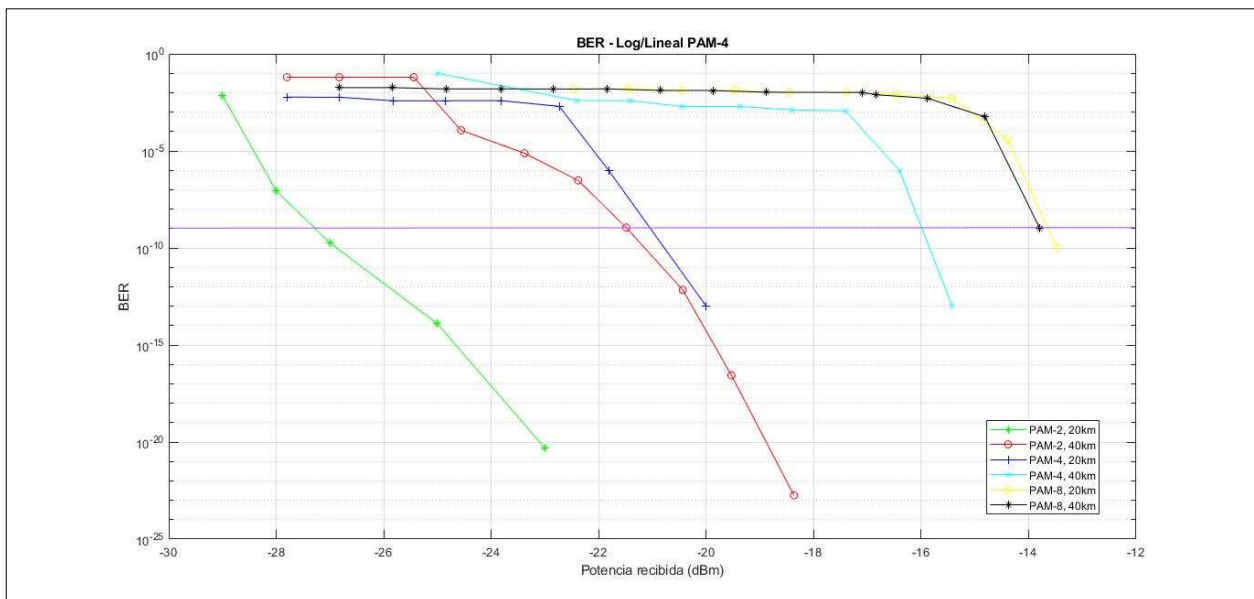


Figura 42.- BER vs Potencia recibida (dBm) Fuente: Propia

Para lograr una óptima recepción de los datos transmitidos y poder aplicar FEC (Forward Error Correction), se necesita un BER en el orden de 10^{-9} .

De los datos obtenidos de la simulación presentados en la figura 42 podemos deducir:

1. Que con una potencia recibida de -27 dBm, PAM-2 se logra una adecuada transmisión (BER = 10^{-9}) de los datos a 20 km de distancia.

2. PAM-2 logra una adecuada transmisión a los 40 km con una potencia recibida de -21 dBm.
3. PAM-4 es efectivo a 20 km si la potencia recibida está en el orden de los -21 dBm.
4. PAM-4 a 40 km ya no es práctica su implementación ya que la atenuación no debería ser mayor a los -16 dBm, pero, con una potencia de -19 dBm se logra un $BER = 10^{-3}$, el cual es el límite para realizar corrección de errores hacia adelante (FEC), con lo que se podría alcanzar tasas de errores iguales o mejores que 10^{-9} , al doble de velocidad de transmisión que PAM-2.
5. PAM-8 no es aplicable su implementación ya que es muy sensible a la atenuación óptica, en especial a la dispersión cromática. Sin embargo, si se lograra un presupuesto de potencia que garantice llegar con un presupuesto de potencias igual o mayor a -15 dBm, se puede usar FEC, ya que con dicha potencia se alcanza un BER de 10^{-3} , con la ventaja que el uso de este formato significa: triplicar la tasa de bits en comparación a PAM-2.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES.

Según los datos obtenidos de la simulación y su interpretación llegamos a las siguientes conclusiones:

Para lograr un mejor desempeño del sistema es recomendado utilizar la pre-distorsión de amplitud de los baudios a transmitir, esto genera una mejor simetría en el diagrama de ojo recibido, lo que permite utilizar niveles de comparación más precisos para la decodificación en cada nivel de modulación PAM.

El implementar la fibra de compensación para la dispersión cromática, ayuda a disminuir la dispersión de las señales transmitidas y por lo tanto, permite mejorar el BER y alcanzar mayores distancias, esta fibra de compensación se la calcula de acuerdo a la distancia del circuito óptico.

PAM-2 y PAM-4 son esquemas de modulación válidos para distancias de 20 km ya que logran un $BER = 10^{-9}$, con potencias recibidas de -27dBm y -21 dBm, respectivamente, mientras que para 40 km con PAM-2 se logra el BER de 10^{-9} con una potencia recibida de -21 dBm, PAM-4 alcanza a los 40 km con un $BER = 10^{-3}$ (límite para realizar FEC), con lo que se puede conseguir un $BER = 10^{-9}$ al aplicar esquemas de corrección de errores hacia adelante. PAM-8 ya no es aplicable para estas distancias, pero constituye una buena opción para distancias más cortas (que no son difíciles de encontrar en zonas urbanas densas).

4.2 RECOMENDACIONES.

Con base en las experiencias adquiridas en el presente trabajo se recomienda:

Para futuros trabajos similares que usen el simulador Optisystem, emplear servidores de alta capacidad de procesamiento de varios núcleos y gran capacidad de memoria RAM, para optimizar el tiempo de simulación y poder realizar las simulaciones con un número mayor de baudios.

Basarse en el análisis cualitativo del diagrama de ojo para calibrar los parámetros de la simulación y corroborar los resultados de las mediciones de los instrumentos de Optisystem, ya que, durante el presente trabajo se debió usar una cosimulación con MATLAB, por falta de coherencia entre los resultados numéricos y el diagrama de ojo.

Tomar en cuenta la desincronización de los baudios en la recepción y ajustar este parámetro en el demodulador programado en MATLAB.

Bibliografía

- Agbo, S. &. (2017). Principles of Morden Communication Systems. En S. &. Agbo, *Principles of Morden Communication Systems* (págs. 236-269). Cambridge: Cambridge University Press.
- Arcotel. (s.f.). <https://www.arcotel.gob.ec/>. Obtenido de <https://www.arcotel.gob.ec/>:
<https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/01/estadisticas-telecomunicaciones-mayo-2017.pdf>
- Grami, A. (2016). Chapter 6 - Baseband Digital Transmission. En A. Grami, *Introduction to Digital Communications* (págs. 265-297). London: Elsevier Inc.
- ITU. (2019). *International Telecommunication Union*. Obtenido de <https://www.itu.int/>
- Moreno Gomez, P. (2011). *Formatos de modulación avanzados para sistemas de comunicaciones ópticas coherentes*.
- Optiwave. (02 de Noviembre de 2020). Ayuda Optisystem 17.
- Optiwave. (20 de mayo de 2020). <https://optiwave.com>. Obtenido de
<https://optiwave.com/upgrades/optisystem-17-1-0-customer-upgrade/>
- Osorio, A. (2016). *Redes GPON-FTTH, evolución y puntos críticos para su despliegue en Argentina*. Buenos Aires.
- P. Gou, L. Z. (2017). 8. P. Gou, L. Zha Nonlinear Look-Up Table Predistortion and Chromatic Dispersion Precompensation for IM/DD PAM-4 Transmission . *IEEE Photonics Journal*, vol. 9 no. 5, 1-7.
- Arévalo, Germán. (2015). *Efectividad de la codificación grey en la transmisión de datos en un canal digital AWGN*, Revista Ingenius, 14, 30-34. DOI:
<https://doi.org/10.17163/ings.n14.2015.04>

Flores G. y Maldonado M. (2019). *Diseño e implementación de una red óptica pasiva (PON) a 10 GBAUD/S empleando PAM4 con pre-compensación* (tesis de grado). Universidad Politécnica Salesiana, Quito.

