

# **PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

## **MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN**

**Propuesta metodológica y tecnológica avanzada  
(TESIS)**

**TEMA:**

“Estudio y simulación de una PAM-4 PON basada en el entrelazado de bits de dos señales NRZ”.

**AUTOR:** Iván Mauricio León Albiño, Ing.

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

**Quito - 2021**

## DEDICATORIA

En primer lugar, dedico a Dios el haberme permitido llegar hasta este momento tan importante de mi vida el cual es el término de una etapa más de preparación profesional, además por brindarnos la salud en estas fechas tan difíciles que estamos viviendo todo el mundo, ya que sin su poder y grandeza nada en esta vida se cumpliría.

A mi madre y a mi padre que me apoyan, me animan a seguir adelante en todas las decisiones que tomo, que con sus consejos siempre han estado ahí conmigo estimulándome para que me supere día a día, asimismo a mis hermanas y a mis pequeños sobrinos que me motivan a ser mejor siempre.

## **AGRADECIMIENTO**

Mi sincero agradecimiento al PhD. Germán Arévalo, por su paciencia, su valiosa dirección, su amistad, su experiencia y tiempo en el desarrollo de esta tesis, y a través de él a la Universidad Politécnica Salesiana, por las facilidades brindadas al utilizar sus recursos que fueron fundamentales para concluir este trabajo de titulación.

A la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y a todos los docentes de la Maestría en tecnologías de la información por el conocimiento brindado durante las clases y el tiempo de permanencia en las instalaciones, permitiéndome crecer profesionalmente.

Finalmente, agradezco a mi familia y a todos mis seres queridos por su comprensión, comunicación constante y apoyo en este tiempo de ausencia.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTO .....	III
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS .....	VII
INTRODUCCIÓN.....	VIII
JUSTIFICACIÓN.....	IX
ANTECEDENTES.....	X
OBJETIVOS .....	XI
Objetivo General: .....	XI
Objetivos Específicos: .....	XI
CAPÍTULO I.....	1
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	1
1.1 Que es fibra óptica.....	1
1.2 Componentes de la FO.....	1
1.3 Elementos de un sistema óptico .....	1
1.3.1 Transmisores ópticos.....	2
1.3.2 Receptores ópticos .....	3
1.4 Código no retorno a cero (NRZ).....	5
1.5 Modulación de no retorno a cero (NRZ).....	5
1.6 Señal digital PAM .....	6
1.7 Modulador PAM.....	6
1.8 Demodulador PAM .....	7
CAPÍTULO II.....	8
2. ESTUDIO DEL ARTE .....	8
CAPÍTULO III.....	11
3. DISEÑO DEL SISTEMA .....	11
3.1 Diseño PAM4 tradicional.....	11
3.2 Diseño PAM4 con entrelazado de bits .....	12
CAPÍTULO IV .....	14
4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA .....	14
4.1 Simulación PAM4 tradicional .....	14
4.2 Simulación PAM4 con entrelazado de bits.....	15

CAPÍTULO V .....	17
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	17
CONCLUSIONES .....	22
RECOMENDACIONES.....	23
BIBLIOGRAFÍA.....	24
ANEXOS.....	26

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Estructura de la Fibra. ....	1
Figura 2.- Diseño de una red de fibra óptica.....	1
Figura 3.- Encapsulamiento de diodo LED.....	2
Figura 4.- Gráfica potencia vs longitud de onda de un LED.....	2
Figura 5.- TO-can package for datacom applications showing the VCSEL (1), monitor photodiode (2), submount (3), flat window cap (4), plastic barrel (5), plastic lens (6), barrel for connection to a fiber ferrule (7) and electrical feedthroughs (8).....	3
Figura 6.- Gráfico de potencia óptica de salida vs longitud de onda de un láser.....	3
Figura 7.- Estructura básica de un fotodiodo PIN. ....	4
Figura 8.- Estructura de Fotodiodo APD.....	5
Figura 9.- Códigos de línea NRZ. ....	5
Figura 10.- Modulación PAM. ....	6
Figura 11.- Ejemplos de Modulaciones PAM.....	7
Figura 12.- Diseño PAM4 tradicional.....	11
Figura 13.- Transmisor PAM4 mediante entrelazado de bits. ....	12
Figura 14.- Diseño PAM4 con entrelazado de bits.....	13
Figura 15.- Grafica de la señal PAM4 tradicional generada en Matlab. ....	14
Figura 16.- Grafica de la señal 1 de Matlab. ....	15
Figura 17.- Grafica de la señal 2 de Matlab. ....	15
Figura 18.- Grafica de la suma de la señal 1 y 2 de Matlab. ....	16
Figura 19.- Grafica de la señal Pam4 tradicional recibida en el módulo RX de Matlab. ....	17
Figura 20. Bits sobrepuestos para formar el diagrama del ojo. ....	18
Figura 21.- Diagrama del ojo de una señal PAM4 tradicional recibida luego de un enlace de 50km de fibra óptica. ....	18
Figura 22.- Diagrama del ojo de una señal PAM4 generada con la técnica de entrelazado de bits recibida luego de un enlace de 70km de fibra óptica. ....	19
Figura 23.- Grafica de la señal recibida con entrelazado de bits en modulo RX de Matlab. ....	20
Figura 24.- Grafica del BER vs Potencia Recibida para las dos técnicas de generación de señal PAM (con y sin entrelazado de bits). ....	21

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Tabla de distancias y potencias recibidas con PAM4 Tradicional.....	20
Tabla 2.- Tabla de distancias y potencias recibidas con PAM4 con entrelazado de bits. .	20

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se centra en el diseño, estudio y simulación de una PAM-4 PON mediante el entrelazado de bits a partir de dos señales NRZ, solución que nos permite comprender el desempeño de este sistema, así como también la comparación con una PAM4 tradicional.

En el capítulo I, se describe un marco conceptual y teórico de tecnologías ópticas, así como de sus componentes tecnológicos presentes en el diseño.

En el capítulo II, se determinan las investigaciones previas que proveen la información necesaria para buscar otras alternativas en los diseños de Modulación por amplitud de pulsos (PAM) así como también los respectivos niveles de codificación.

En el capítulo III, se diseña una solución con la información obtenida y con investigación bibliográfica, tanto técnica como científica, el diseño de una solución basada en el entrelazado de bits que permita transmitir y recibir la información codificada a lo largo de la fibra óptica.

En el capítulo IV, se realiza las simulaciones respectivas de los diseños para determinar las ventajas y desventajas de implementar una solución de los dos sistemas.

Finalmente, en el capítulo V, se realiza el análisis de los resultados obtenidos en esta investigación.

## JUSTIFICACIÓN

Se analiza que con el gran avance tecnológico que se vive en estos días se ha provocado que la demanda de los usuarios en la red vaya aumentando considerablemente, debido al incremento de más y más requerimientos mínimos para los servicios de voz, video de alta definición, streaming, juegos en línea y datos, las redes PON (passive optical network- red óptica pasiva) están presentando problemas como la dispersión, la cual provoca que se degrade la señal enviada induciendo un efecto negativo en la transmisión de señales por lo cual se ve limitada la velocidad de transmisión.

Se ha detectado que las transmisiones de señales en formato PAM2 presentan resultados de rendimientos muy pequeños lo que ha venido provocando y ocasionando en muchos de los casos la pérdida de señal.

En las redes PON se presenta inconvenientes al momento de aumentar la distancia debido a que comienza a presentar degradado de señal y problemas al tratar de recuperar en óptimas condiciones la transmisión de bits desde el transmisor hacia el receptor.

En las redes PON que se transmiten datos PAM, se ha podido constatar que existe un pésimo desempeño debido al no utilizar pre-compensación de dispersión, con lo que su BER no podrá ser admitido en este tipo de comunicaciones.

Debido al problema detectado se pretende construir en el sistema de transmisión a partir de las señales non return to zero (NRZ) tener 2 señales, combinarlas y entrelazarlas con el fin de obtener PAM-4 y en el sistema de recepción se construirá un decodificador mediante un fotoreceptor PIN que detecte varios niveles de esa manera nos permitirá leer las modulaciones PAM4, lo que teóricamente nos permitiría tener mejor rendimiento.

Mediante la configuración adecuada del sistema de transmisión y recepción óptico para lograr las modulaciones de PAM4, vamos a prevenir que exista degradado en las señales a pesar del aumento de la distancia.

Con el diseño de un PAM4 se pretende el mejoramiento considerable del desempeño de la red basándonos en los diagramas del ojo y su valor de BER.

El propósito de esta investigación es realizar una simulación que nos permita contribuir a mejorar servicios y aplicaciones como video streaming de alta velocidad y realidad aumentada, además de poder evaluar el desempeño del esquema de modulación PAM-4 en un sistema de comunicación óptica de redes PON con pulsos de señales NRZ.

## ANTECEDENTES

Las redes óptica pasivas han alcanzado estos últimos años un avance considerable ya que han permitido conectar mucho más al mundo en el que nos encontramos, convirtiéndose en factor importante en el segmento de acceso, por lo que el presente estudio plantea a partir de un artículo científico, en (Arevalo et al., 2019) aportaría en el desarrollo de mi investigación como punto de partida, ya que aportara lo necesario desde el punto de vista científico y teórico.

De acuerdo con la investigación propuesta por (J. Zhang et al., 2015) el uso de las señales PAM-4 con velocidad de transmisión menos de 56 GBaud, requiere más de 2 carriles para Soluciones 400GE, incluso teniendo en cuenta la diversidad de polarización, de acuerdo con el autor se cree que aumenta continuamente la velocidad de transmisión para lograr 400GE en un soporte óptico único PAM-4 para corto alcance, con lo que la comunicación óptica sería atractiva, prometedora y una solución rentable para la próxima generación de redes de alta velocidad.

Mientras que (Lin et al., 2017) presenta un método simple y de bajo costo para estimar la SER y BER para señales PAM-4. La forma de onda recibida es reconstruida con enfoque de muestreo asíncrono, por lo que ahí no es necesario utilizar un reloj o circuito de recuperación de datos (CDR) para monitorear la calidad de la señal.

Mientras que por otra parte (Ma et al., 2019) en el artículo científico presenta un reloj digital de media velocidad y datos un circuito de recuperación de datos que puede funcionar tanto en modo NRZ como en PAM4, lo cual aporta como antecedente a la investigación propuesta.

Así mismo, la información proporcionada por (Flores & Villavicencio, 2019) y (Grzegorz et al., 2015) forman parte del estudio previo que contribuirá a la investigación propuesta ya que con ayuda de su línea de investigación se alcanzó a entender un diseño de una PON empleando PAM4 con pre-compensación y la información de cómo se utiliza la modulación PAM para la transmisión de datos respectivamente aportando sustantivamente mi investigación.

## OBJETIVOS

### Objetivo General:

Realizar el estudio y simulación de una PAM-4 PON basada en el entrelazado de bits de dos señales NRZ.

### Objetivos Específicos:

- Realizar un estudio del arte de los sistemas ópticos que emplean PAM-4
- Diseñar un sistema PAM-4 en redes ópticas pasivas apoyado con el entrelazado de bits de señales NRZ
- Simular el sistema PAM4, basado en el entrelazado de señales NRZ, por medio de software para obtener resultados de su desempeño, en comparación con un sistema PAM-4 tradicional.
- Analizar los resultados obtenidos con el fin de caracterizar el desempeño del sistema PAM4 que se está estudiando.

## CAPÍTULO I

### 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 1.1 Que es fibra óptica

La fibra óptica es una delgada hebra de vidrio o silicio fundido que es utilizada para conducir la luz, esta luz representa la información transmitida de una manera guiada, se requieren dos filamentos para una comunicación bi-direccional los cuales representan al transmisor (TX) y al receptor (RX).

#### 1.2 Componentes de la FO

La fibra óptica se encuentra constituida por una varilla de vidrio muy delgada, que se encuentra rodeada por una capa protectora de plástico, la varilla de vidrio contiene dos partes, la parte interior de la varilla (núcleo) y la capa que le cubre(revestimiento).

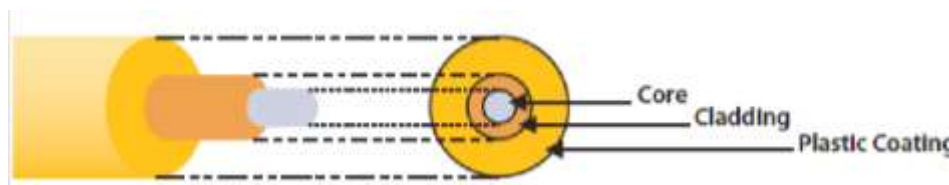


Figura 1.- Estructura de la Fibra.  
Fuente: (JDSU et al., 2010).

#### 1.3 Elementos de un sistema óptico

Los elementos que se encuentran presentes en un sistema óptico son básicamente 3: los transmisores, medio de transmisión y receptor.

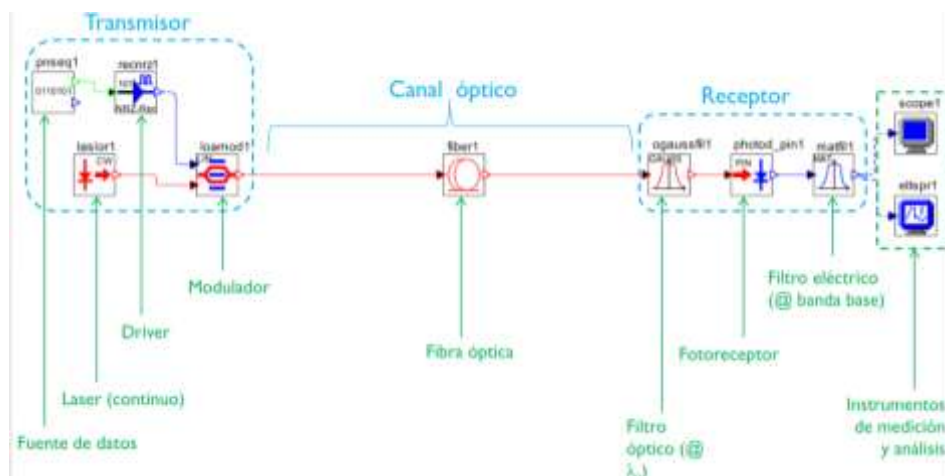
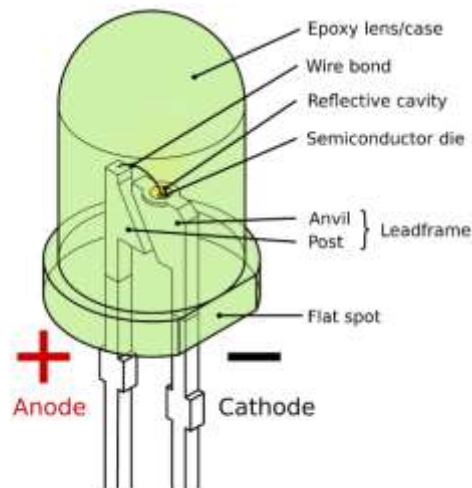


Figura 2.- Diseño de una red de fibra óptica.  
Fuente: (Arevalo, 2019). Curso de Sistemas de Medios de Transmisión - Material de estudio del Tema 4. (esquema de simulación empleando Optsim®). Universidad Politécnica Salesiana.

### 1.3.1 Transmisores ópticos

Tienen como función principal generar la señal que va a ser transmitida a través de la fibra óptica, las fuentes de luz tienen una estructura basada en dispositivos semiconductores con uniones P-N, tales como son los LED o LÁSER, los cuales emiten luz en determinadas longitudes de onda acorde a las ventanas de operación de la fibra.

Diodo LED (Light Emitting Diode): es una fuente de luz empleada para las comunicaciones por fibra óptica, las longitudes de onda típicas en las que trabaja están entre 850nm o 1300nm, y además se las utiliza con fibra multimodo en LAN o enlaces cortos.



Fuente de la Figura: Public domain (disponible públicamente)

Figura 3.- Encapsulamiento de diodo LED.  
Fuente (Deutsch, 2017).

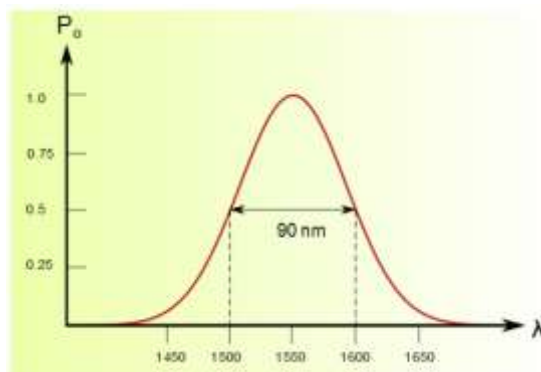
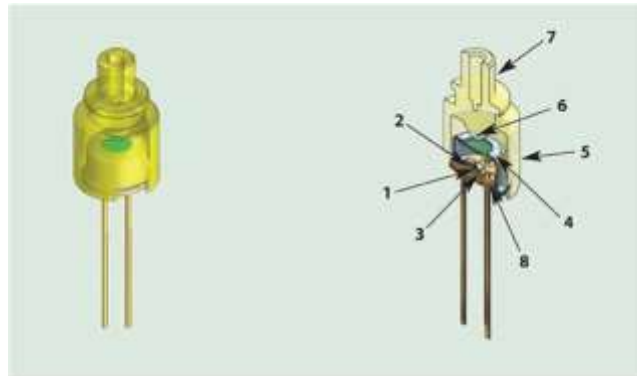


Figura 4.- Gráfica potencia vs longitud de onda de un LED.  
Fuente: (Bravo Barahona & Sánchez González, 2012)

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation): es una fuente de luz empleada para las comunicaciones en fibras monomodo, su funcionamiento está basado en la emisión estimulada o inducida que provoca un fotón al inducir a un electrón a pasar de estado de alta energía a estado de menor energía, lo cual produce la emisión de un nuevo fotón con la misma frecuencia y fase (monocromáticos) del estimulante, lo que genera una luz más coherente y sincronizada.



Fuente: <http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=35514>

Figura 5.- TO-can package for datacom applications showing the VCSEL (1), monitor photodiode (2), submount (3), flat window cap (4), plastic barrel (5), plastic lens (6), barrel for connection to a fiber ferrule (7) and electrical feedthroughs (8).

Fuente: (Wipiejewski, n.d.)

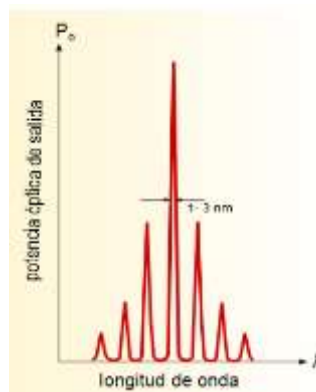


Figura 6.- Gráfico de potencia óptica de salida vs longitud de onda de un láser.

Fuente: (Bravo Barahona & Sánchez González, 2012)

### 1.3.2 Receptores ópticos

El receptor óptico es el dispositivo que se encuentra al final del sistema de transmisión por fibra óptica y se encarga de transformar los bits ópticos en bits eléctricos, que pueden ser decodificados como ceros y unos para recuperar la información enviada originalmente. Existen dos fotoreceptores comerciales: el PIN (Positive-Intrinsic-Negative) y el APD (Avalanche Photodiode).

Fotodiodos PIN (Positive-Intrinsic-Negative): Son fabricados generalmente con germanio (Ge) y GaAs, GaInAs, InP, con resultados muy buenos. Entre las capas de material semiconductor n y p se tiene una capa intrínseca, casi pura, de material semiconductor. La luz que entra en el fotodiodo es absorbida por el material intrínseco, una vez ocurrido esto los electrones se mueven de su banda de valencia lo que hace que el fotodiodo conduzca la energía eléctrica (Suarez Morales, 2017).

Los fotodiodos PIN son de gran duración, que es una característica deseada en los receptores ópticos. Además, trabajan con bajas tensiones y son adecuados para trabajar en la segunda y tercera ventana de transmisión, con longitudes de onda de 1300 y 1550 nm, respectivamente. Poseen una velocidad de respuesta rápida lo que permite velocidades de recepción de datos elevada (Suarez Morales, 2017).

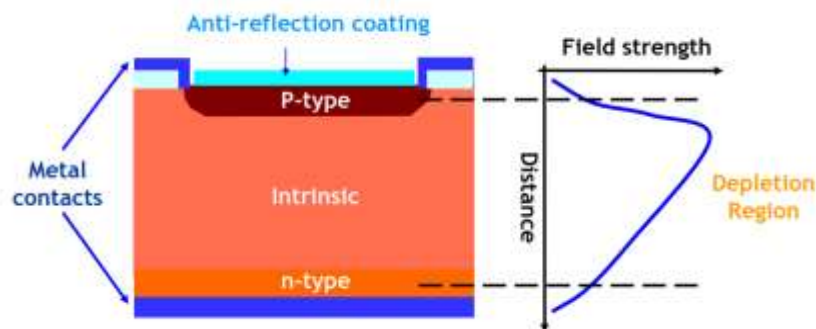


Figura 7.- Estructura básica de un fotodiodo PIN.

Fuente: Dirk Plettemeier (2017). VPI Photonics Curriculum V9.8. Recuperado de <http://vpiphotonics.com/Community/>

Fotodiodo APD (Avalanche Photodiode): Entre su característica principal tenemos que son 10 veces más sensibles que los fotodiodos PIN por lo que son usados en sistemas donde las pérdidas suelen ser grandes. La desventaja de estos elementos es que su tiempo de vida útil es poco haciendo que el mantenimiento de los equipos de comunicaciones que los contienen tenga que ser más frecuente. Su estructura interna consiste en un material semiconductor ordenado en forma p-i-p-n (Suarez Morales, 2017).

Cuando un haz de luz incide en el diodo es absorbida por la capa n, esto provoca que algunos electrones pasen de la banda de valencia a la de conducción. Como el campo eléctrico que se genera por la polarización inversa es grande, los electrones adquieren altas velocidades y al colisionar con los electrones de otros átomos hacen que éstos se ionicen, estos a su vez ionizan otros creando un efecto avalancha que da el nombre a estos fotodiodos (Suarez Morales, 2017).

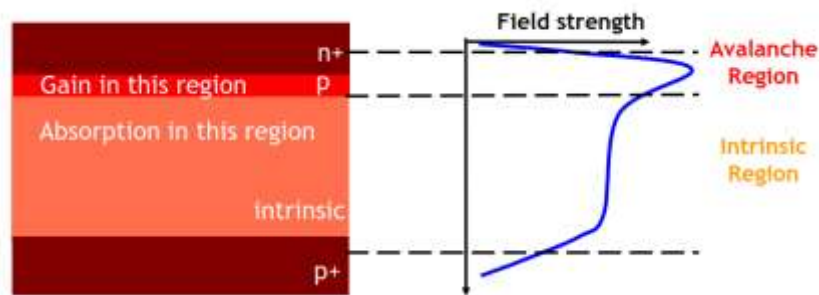


Figura 8.- Estructura de Fotodiodo APD.

Fuente: Dirk Plettemeier (2017). VPI Photonics Curriculum V9.8. Recuperado de <http://vpiphotonics.com/Community/>

## 1.4 Código no retorno a cero (NRZ)

Esta señal es la más cómoda desde el punto de vista circuital, porque todos los circuitos lógicos funcionan según el principio SI o NO y por tanto el código NRZ es el que se usa en el interior de los equipos. En la señal se observa que todos los bits 1 son representados por un nivel de voltaje del mismo valor positivo por lo que su espectro presenta una componente continua, mientras que el cero es representado por la ausencia de nivel (Navarro, Mariam; Ballestas, 2003).

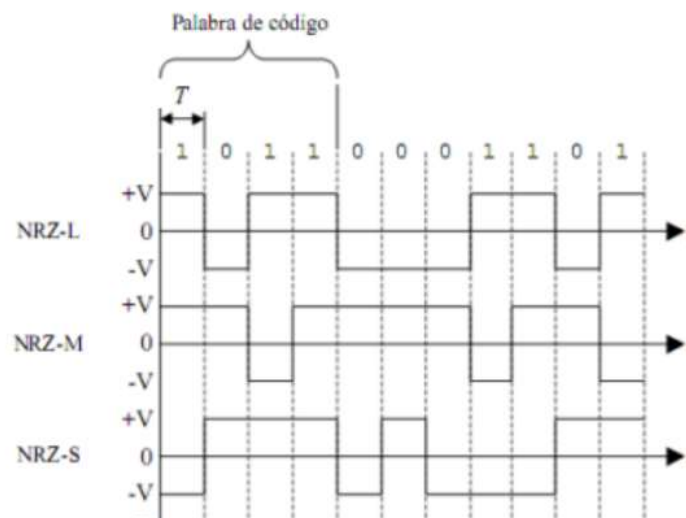


Figura 9.- Códigos de línea NRZ.

Fuente: (Espantoso España, 2018)

## 1.5 Modulación de no retorno a cero (NRZ)

El formato de modulación de intensidad más sencillo es no retorno a cero (No Return to Zero, NRZ). NRZ se crea modulando entre 0 y  $V\pi$  en la curva de transferencia de MZM y se caracteriza por el hecho de que las marcas consecutivas no vuelven a cero

entre bits. Por lo tanto, las cadenas largas de las marcas tienden a tener grandes cantidades de información de baja frecuencia (Guerrero Navia, 2019).

## 1.6 Señal digital PAM

PAM (Pulse Amplitude Modulation o Modulación de Pulsos en Amplitud) no es más que una sucesión de pulsos  $g(t)$ , enviados cada  $T$  segundos, y modulados en amplitud cada uno de ellos por un valor  $a_k$ , que es donde realmente reside la información digital (Flores Asenjo, 2017).

$$S_{PAM}(t) = \sum_k a_k g(t - kT) \quad (1)$$

## 1.7 Modulador PAM

La modulación de amplitud de pulso (PAM, por sus siglas en inglés Pulse Amplitude Modulation), es la transmisión de datos mediante la variación de la amplitud de los pulsos individuales en una secuencia temporizada regularmente. Dependiendo de las diferentes amplitudes posibles se llama modulación M-PAM. Para que la señal de salida pueda ser digital las amplitudes del pulso tiene que ser una potencia de 2, así que en el caso de 16-PAM hay 24 posibles amplitudes de pulsos discretos (Triviño Romero, 2016).

La modulación PAM trabaja con una única portadora, la cual puede ser seno o coseno, por esta razón su espacio de señal es unidimensional, se podría ver como una línea horizontal llena de puntos uniformemente espaciados entre sí. El modulador PAM consta de un multiplexor controlado por los bits a transmitir  $K$ , con los  $A_m$  de entrada, los cuales son los símbolos que representa cada uno de los bits (GORDILLO et al., n.d.).

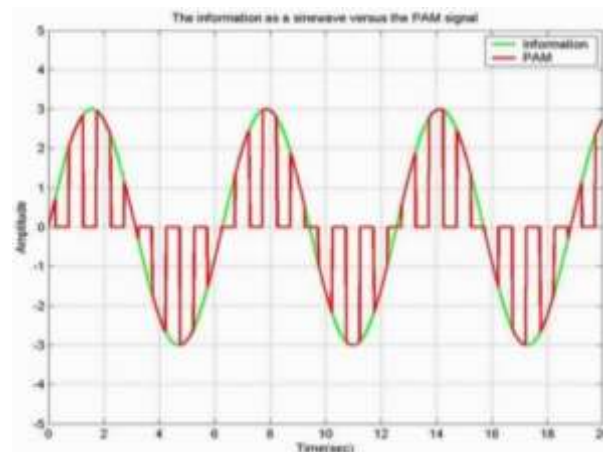


Figura 10.- Modulación PAM.  
Fuente: (Triviño Romero, 2016)

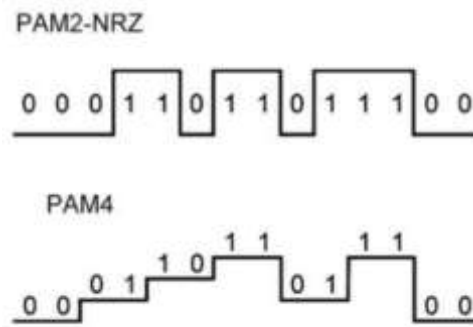


Figura 11.- Ejemplos de Modulaciones PAM.  
Fuente: (Arévalo,2020)

## 1.8 Demodulador PAM

El demodulador PAM está conformado por un correlacionador, el cual se encarga de comparar la señal modulada PAM para encontrar cuantas unidades de la señal base están presentes en un instante de tiempo, estos valores se transmiten a un decodificador el cual dependiendo los niveles obtenidos por el correlacionador decide qué conjunto de bits asigna (GORDILLO et al., n.d.).

*“La transmisión de las señales moduladas por amplitud de pulsos impone condiciones severas respecto a las respuestas en magnitud y fase del sistema, a causa de la corta duración de los pulsos. Por otra parte, el comportamiento de un sistema PAM respecto al ruido nunca puede ser superior al de transmisión en banda base. Sin embargo, la modulación por amplitud de pulsos es el primer paso indispensable en la conversión de señales analógicas a digitales, entendiéndose aquí por señal digital aquella que solamente tiene dos niveles. La señal PAM es una señal discreta, no necesariamente digital” (Pérez Vega, 2016).*

## CAPÍTULO II

### 2. ESTUDIO DEL ARTE

En el desarrollo de esta línea de investigación, se analizó la expectativa de los nuevos servicios de comunicaciones, donde las exigencias de los usuarios son cada vez mayores y donde los operadores deben considerar una postura dinámica en su desarrollo y despliegue de red para poder cubrir las nuevas exigencias, así como también demandas del mercado presentes en esta nueva etapa de la vida del ser humano.

Por este motivo, es importante que se analice la evolución de las tecnologías ópticas en la última década y las tendencias del mercado, de forma que podamos consolidar este trabajo, como una inversión actual y con un desarrollo a corto y largo plazo en el desarrollo de los sistemas ópticos.

El tráfico de datos que soportan las redes de telecomunicaciones con el pasar de los días es cada vez más heterogéneo e impredecible debido no solo al desarrollo de nuevos servicios para el usuario (TV 4K / 8K, AR y VR9), sino la situación que también se lo vio reflejado en este tiempo de la pandemia en el 2020 lo que contribuyó y dio paso a buscar más allá de las técnicas PON de 10 Gb/s tradicionales para satisfacer la demanda de banda ancha, por lo que en su artículo científico (Ye et al., 2017) expone cómo lograr 40 Gb / s, incluso 50 Gb / s por canal reutilizando 10 GHz, además de como la óptica ha entrado gradualmente en el horizonte de las personas, así también las interacciones entre dos principales restricciones, sin embargo, frena los pasos para alcanzar 50 Gb/s usando una óptica heredada de 10 GHz, la una es la interferencia estricta entre símbolos (ISI) mientras que el otro es la no linealidad de fibra óptica. El primer problema es inducido por un ancho de banda óptico insuficiente en comparación con la alta velocidad en baudios, y el otro se origina tanto de la electricidad presente en amplificadores y óptica como la modulación y la ley cuadrática directa de detección en PIN, (Ye et al., 2017) concluye que este tipo de tecnologías son muy prometedoras para las altas velocidades que se manejarán en el futuro siendo flexibles en los precios.

Podemos deducir que partir del artículo de (Arevalo et al., 2019) se demostró la efectividad de utilizar técnicas de pre-compensación de dispersión de baja complejidad en redes PON con datos transmitidos por PAM-4, basándose en la distorsión de las amplitudes de los pulsos transmitidos a 4 niveles. Con una velocidad en baudios correspondiente a 10 Gbaud/s, que pertenece al uso de PAM-4, a una velocidad de bits de 20 Gb/s, se verifico mediante simulaciones y pruebas experimentales que esta técnica de compensación de dispersión resulta útil para distancias de enlace óptico mayores que enlaces estándar de 20 km de redes PON. La mejora de la compensación de dispersión se pudo apreciar en un enlace de 45 km. Hay una mejora de casi 1 dB, para alcanzar un BER de  $10^{-3}$ , cuando se usa el método de compensación previa de dispersión, al igual que la investigación presentada por (GLADYS JANNETH & VILLAVICENCIO TENELEMA, 2019) lograron obtener un BER de  $10^{-3}$  con una potencia de recepción aproximada de -10.13 dBm sin pre-compensación de dispersión, mientras que con pre-compensación de dispersión se logra el mismo BER con una potencia de recepción aproximada de -11.14 dBm, después de 45 km de fibra a 10 Gbaud/s llegando a ser mejor un sistema de pre-compensación debido a que necesita aproximadamente 1dbm de potencia menos en el receptor para un BER deseado en este tipo de comunicaciones.

Por otro lado, el uso de PAM-4 también podría aumentar el ancho de banda de transmisión gracias a que PAM-4 ofrece cuatro niveles de amplitud en un símbolo y, por lo tanto, su velocidad de bits es el doble que OOK a la misma velocidad en baudios. Para (W. Zhang et al., 2019), la multiplexación por división de modo (MDM) en un chip con PAM-4 es un enfoque para mejorar la capacidad de transmisión en Circuitos fotónicos integrados. En su artículo, informa de un circuito fotónico MDM integrado de cuatro canales que se implementa en una Plataforma de silicona con un tamaño pequeño y diafonía de canal bajo con el fin de satisfacer demandas debido a las aplicaciones informáticas que están impulsando mayor demanda, debido que las capacidades presentan una creciente para comunicaciones ópticas de corto alcance, con lo que se pretende ampliar la capacidad de ancho de banda aprovechando los modos espaciales de una guía de onda óptica para transmitir múltiples señales ópticas, concluyendo como un circuito MDM puede emplearse en un sistema de radio sobre fibra (RoF) para aumentar capacidades de transmisión de datos del enlace RoF.

(Lin et al., 2017) enfatiza que, en sistemas de alta velocidad de datos, el monitoreo de la calidad de la señal siempre es necesario, y menciona que la calidad de la señal se puede obtener midiendo tasa de error de símbolo (SER) y tasa de error de bit (BER), que normalmente requieren un muestreo síncrono de alta velocidad de la forma de onda óptica recibida. Hace una referencia a la técnica de muestreo de forma de onda síncrona que resulta relativamente complicada y costosa para implementación masiva en las aplicaciones de centros de datos, de su artículo el autor describe a la forma de onda recibida como reconstruida con enfoque de muestreo asíncrono, con lo que no es necesario usar un circuito de recuperación de datos / reloj (CDR) para monitorear la calidad de la señal. (Lin et al., 2017) concluyó que el punto de decisión óptimo es determinado dividiendo el patrón de ojo completo en tres sub-ojos tales que la instancia de tiempo con la apertura máxima de los ojos puede ubicarse desde los sub-ojos superpuestos. Este método puede ser aplicado a señales con distorsiones y ruido, determinando que la viabilidad de este enfoque se justifica comparando los resultados con simulaciones en el VPI Transmission Maker™.

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO DEL SISTEMA

Para el diseño del sistema propuesto se utilizó la ayuda de dos softwares como lo son Optsim y Matlab. Para la generación de la información a transmitir se utilizó el software Matlab, mientras que para el diseño de la red óptica se utilizó Optsim, que gracias a una de sus funcionalidades permite la co-simulación en Matlab, al mismo tiempo que trabajamos en Matlab lo hacíamos en Optsim con módulos conectados gráficamente permitiendo el fácil desenvolvimiento.

Se realizaron dos diseños con el fin de observar las diferentes variantes que se presentan al tener una PAM4 tradicional y otra con el entrelazado de bits.

#### 3.1 Diseño PAM4 tradicional

En este diseño se creó un módulo de Matlab (CCM1), el que cuenta con un código donde se generaron los 212.992 bits transmitidos los mismos que fueron codificados mediante un código gray, luego fueron modulados con una Modulación de Amplitud de Pulso de cuatro niveles (PAM-4) tradicional, la cual es conectada a un modulador lineal y a su respectivo laser de onda continua (continuous wave –CW) creando de esta manera el transmisor, el enlace óptico constó de una fibra (fiber1) misma que la variamos en diferentes longitudes.

Para el lado del receptor se tiene un fotodiodo pin conectado al segundo módulo de Matlab (CCM2) en el cual se presenta el código para obtener la señal eléctrica resultante después de la transmisión a través de la fibra óptica, en este punto se realizó el procesamiento de la señal PAM-4 logrando los tres niveles en el diagrama del ojo de la PAM4 y de esa manera poder evaluar el BER respectivo.

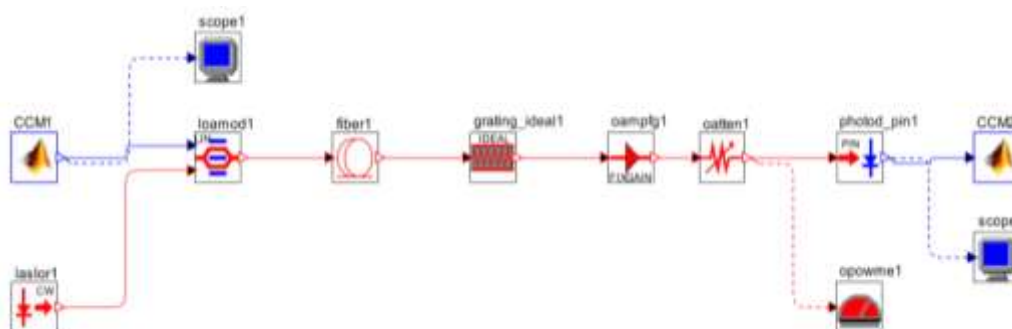


Figura 12.- Diseño PAM4 tradicional.  
Elaborado por: El autor.

### 3.2 Diseño PAM4 con entrelazado de bits

Para el diseño del entrelazado de bits se consideró un transmisor modelo como en la figura 13. En el cual la generación de los datos estará de igual manera en el bloque de Matlab sin embargo este bloque constara de 2 salidas eléctricas, lo primero que se realiza en código de MATLAB es dividir al vector en dos secuencias de igual número de bits transmitidos (secuencia 1 y secuencia 2), por la primera salida del módulo tendremos la secuencia 1 (primera parte de los datos generados), mientras en la salida 2 se tendrá la señal 2 (que será igual a la XOR entre la secuencia 1 y 2), las dos salidas eléctricas del módulo de Matlab se sumaran entre si antes de ingresar a un modulador lineal y a su respectivo laser de onda continua (continuous wave – CW), en el lado del receptor se tiene un fotodiodo pin conectado al segundo módulo de Matlab (CCM2) en el cual se presenta el código para obtener la señal eléctrica resultante después la transmisión a través de la fibra óptica, en este punto se realizó el procesamiento de la señal PAM-4, a fin de poder evaluar el BER respectivo.

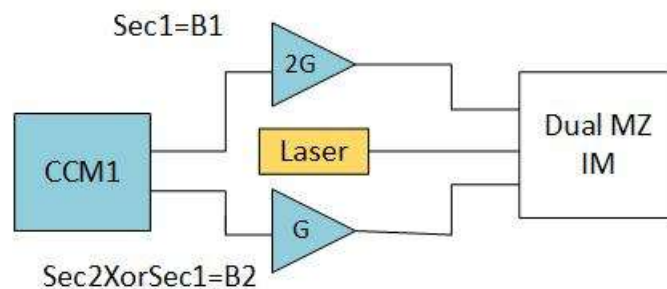


Figura 13.- Transmisor PAM4 mediante entrelazado de bits.  
Fuente: El autor.

La figura 14 nos muestra el diseño esquemático ya implementado en el software Optisim, del cual se aprecia que las salidas eléctricas del módulo de Matlab de Tx (CCM1) se las suma con ayuda del módulo Add1 de Optisim, posteriormente se le aplica un filtro Bessel antes de conectarlo al modulador lineal y a su respectivo laser de onda continua, en los bloques del enlace óptico y en el receptor es prácticamente igual al diseño ya propuesto para una PAM4 tradicional debido a que al sumarse las señales tenemos una similar, la cual se procedió a decodificar de la misma manera que si fuese una PAM4 tradicional.

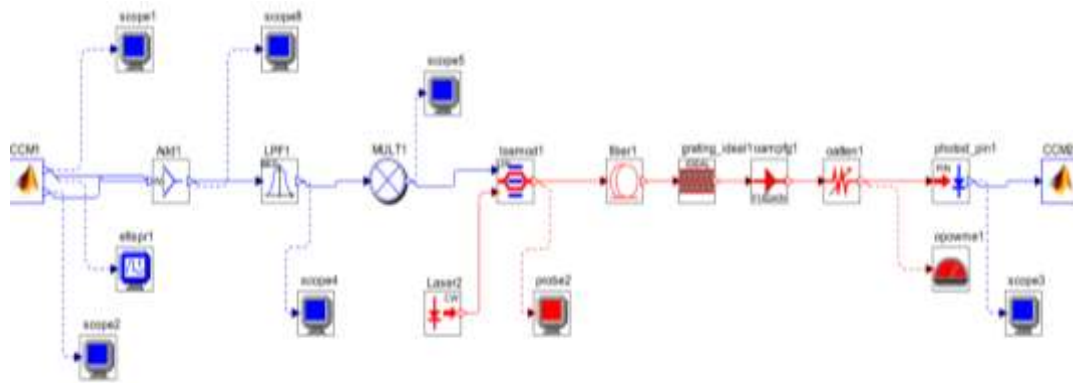


Figura 14.- Diseño PAM4 con entrelazado de bits.  
Elaborado por: El autor.

## CAPÍTULO IV

### 4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA

En ambos casos los sistemas constaron con los parámetros en el enlace óptico de una fibra óptica monomodo estándar G.652.D con variaciones de 20 km a 80 Km, con una dispersión de 17 ps/(nm\*km) y atenuación de 0.25 dB/km.

En la parte del transmisor aparte del láser que se ubica en los 1550nm se creó un archivo txt en el cual se guardó los bits que se generaban de manera aleatoria en cada simulación, este archivo es utilizado también en el módulo del receptor al momento del análisis del BER. Para el receptor se colocó un fotodiodo PIN, donde el bloque de co-simulación se encargó del procesamiento de la señal PAM-4.

#### 4.1 Simulación PAM4 tradicional

La señal generada en el módulo de Matlab es una PAM4 tradicional (figura 15) en la cual se observa los 4 niveles transmitiendo 8 muestras en cada uno de ellos, así mismo cada nivel posee 2 bits (1 baudio) codificados mediante código de Gray.

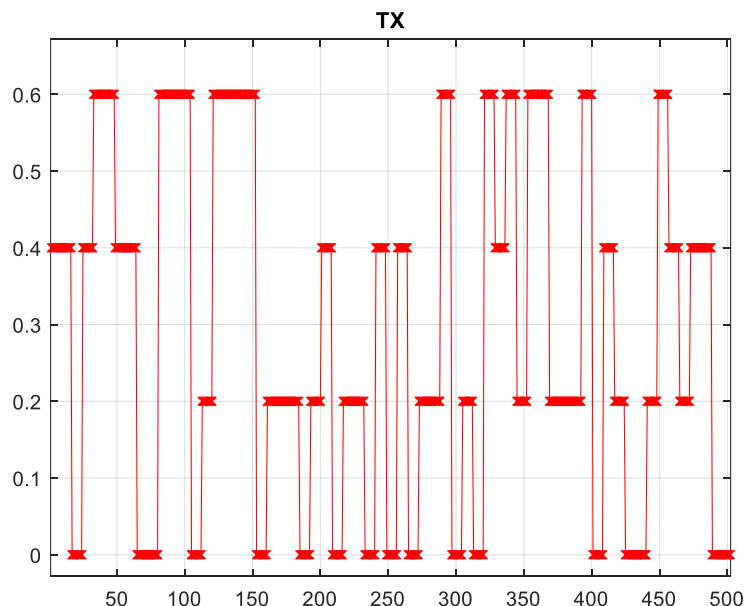
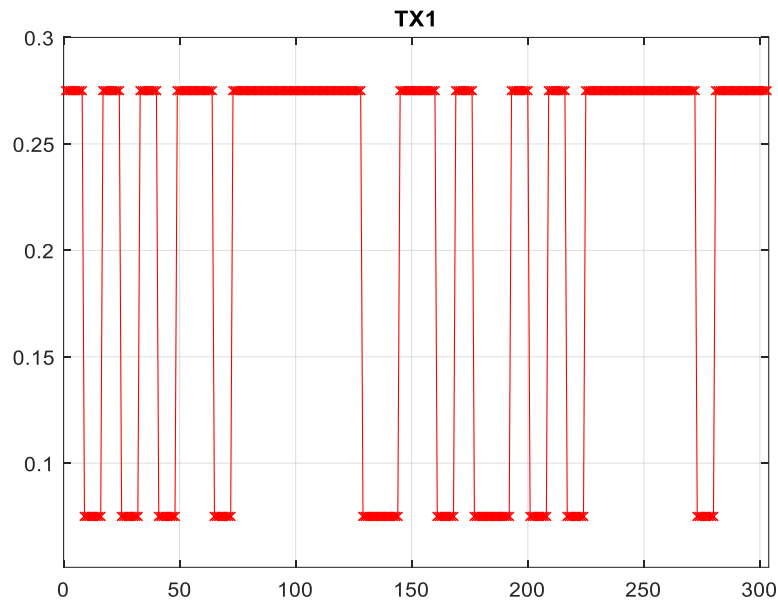


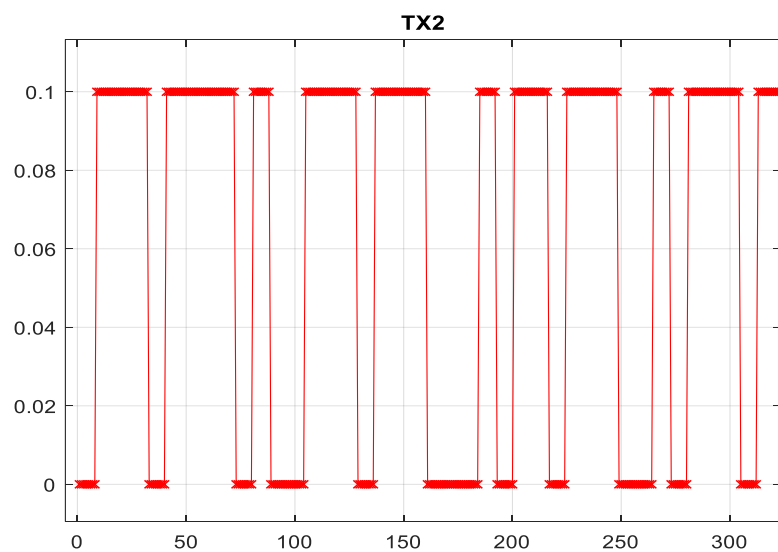
Figura 15.- Gráfica de la señal PAM4 tradicional generada en Matlab.  
Elaborado por: El autor (captura de la gráfica de Matlab).

## 4.2 Simulación PAM4 con entrelazado de bits

En este caso en el módulo de Matlab basto con generar de manera aleatoria un vector de 2 niveles con 212.992bits, al cual al momento de dividirlo obtuvimos nuestras 2 señales a trabajarlas que de igual forma se utilizó 8 muestras, en el esquema de Optsim se configuro un láser de igual manera y con los mismos parámetros que en el caso de la PAM4 tradicional.



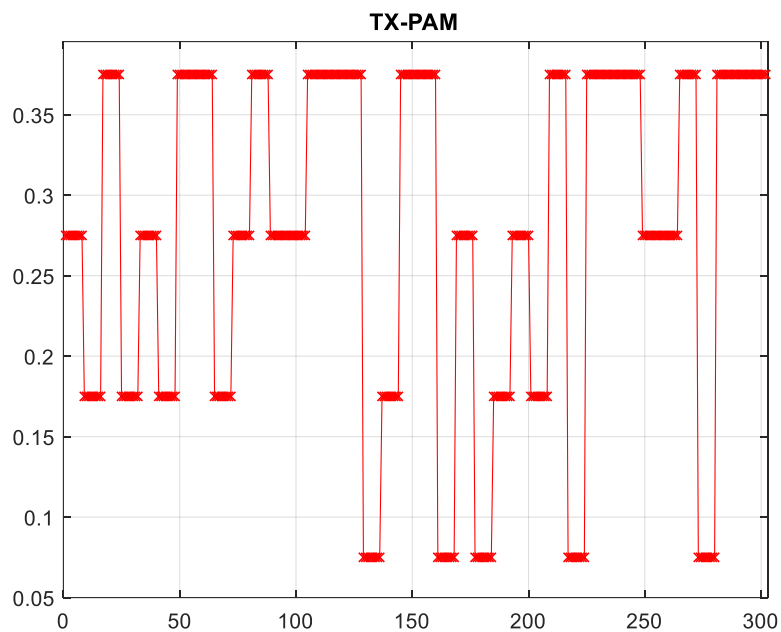
*Figura 16.- Grafica de la señal 1 de Matlab.*  
Elaborado por: El autor (captura de la gráfica de Matlab).



*Figura 17.- Grafica de la señal 2 de Matlab.*  
Elaborado por: El autor (captura de la gráfica de Matlab).

Al igual que en la simulación de una PAM4 tradicional se observa en las gráficas 16 y 17 una señal con sus muestras en cada nivel, en este caso al ser una señal NRZ tenemos dos niveles que representa el nivel máximo y mínimo, sin embargo, la señal TX2 es el doble en amplitud que la XOR de la señal 1 y 2.

Del módulo CCM1 de Matlab se obtiene la suma de las señales 1 y 2 (figura 18) con el fin de obtener una señal PAM4, la señal resultante a ser transmitida por la fibra óptica de igual manera consta con 8 muestras (1 símbolo PAM4) en cada nivel.



*Figura 18.- Grafica de la suma de la señal 1 y 2 de Matlab.  
Elaborado por: El autor (captura de la gráfica de Matlab).*

## CAPÍTULO V

### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan las gráficas más importantes y relevantes de todas las simulaciones realizadas para conseguir los resultados deseados y propuestos en el inicio de la investigación.

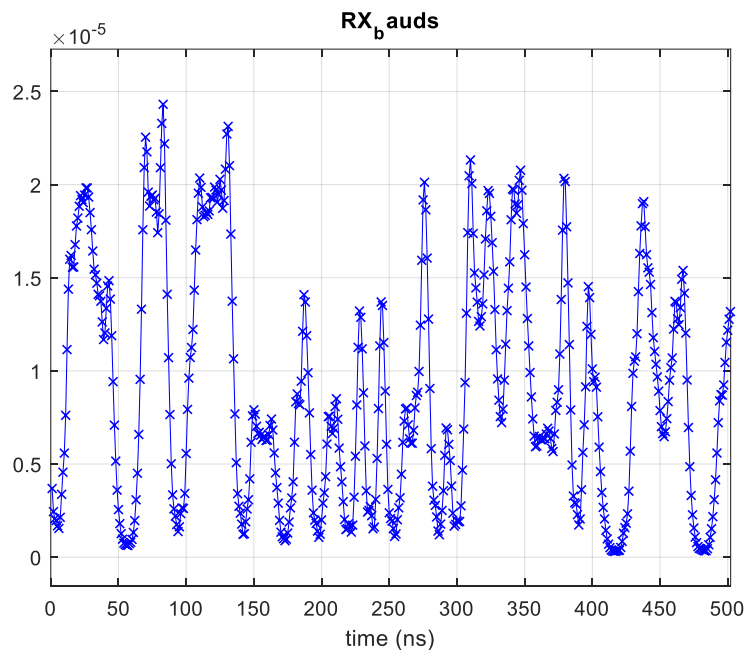


Figura 19.- Gráfica de la señal Pam4 tradicional recibida en el módulo RX de Matlab.  
Elaborado por: El autor (captura de la gráfica de Matlab).

Por otra parte, en la recepción tenemos la señal PAM4 tradicional después de la fibra óptica, la cual comparando con la señal transmitida presenta una pérdida de 16 muestras con respecto a la de transmisión, por esta razón al momento del cálculo del BER se igualó el tamaño del vector de recepción debido a que la función de Matlab necesita que los vectores a analizar sean del mismo tamaño.

El diagrama del ojo llamado así por su similitud al que posee el ser humano se construye a través de la superposición de una secuencia de bits, nos ayuda a determinar la calidad de un enlace ya que proporcionan datos visuales instantáneos que se pueden utilizar para comprobar la integridad de una señal, a partir del diagrama del ojo se puede estimar mediante su apertura y grosor factores relacionados con la calidad de la transmisión, como el ruido, atenuación y jitter.

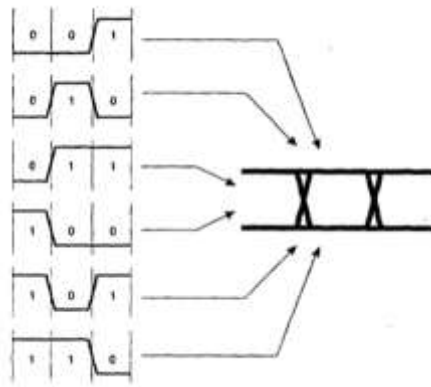


Figura 20. Bits sobrepuestos para formar el diagrama del ojo.  
Fuente: (Dinamarca José, 2002)

En la figura 21 se tiene el diagrama del ojo de una señal PAM4 tradicional donde se aprecia que su abertura se empieza a cerrar en comparación a un ojo ideal que es totalmente abierto, es en ese punto donde nuestros valores del BER dejaron de ser 0 como se aprecia en la tabla 1 y 2 respectivamente, al igual que en la figura 22 en cambio se tiene similar abertura en el entrelazado de bits sin embargo, para tener de resultado este diagrama del ojo se tuvo que llegar a la distancia de 70km a comparación del diseño tradicional que fue de 50km.

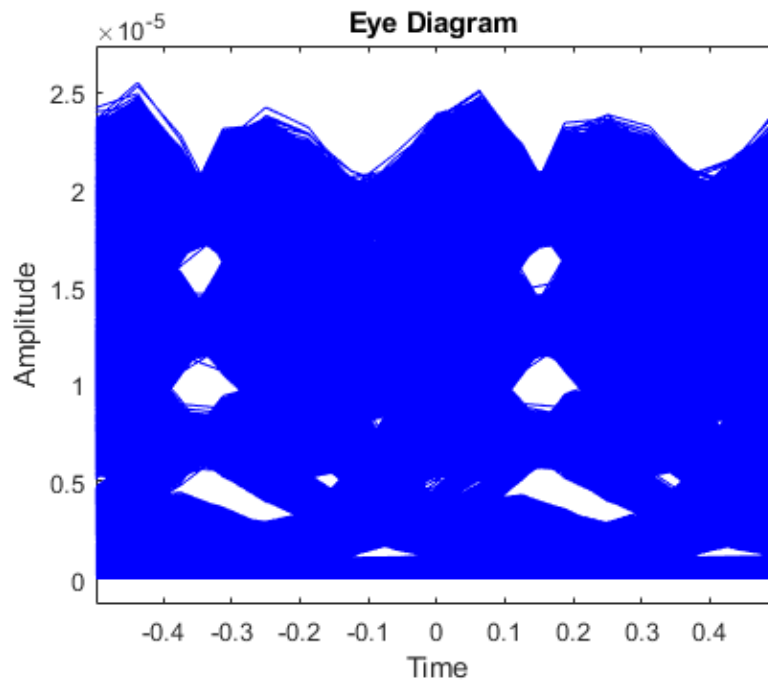
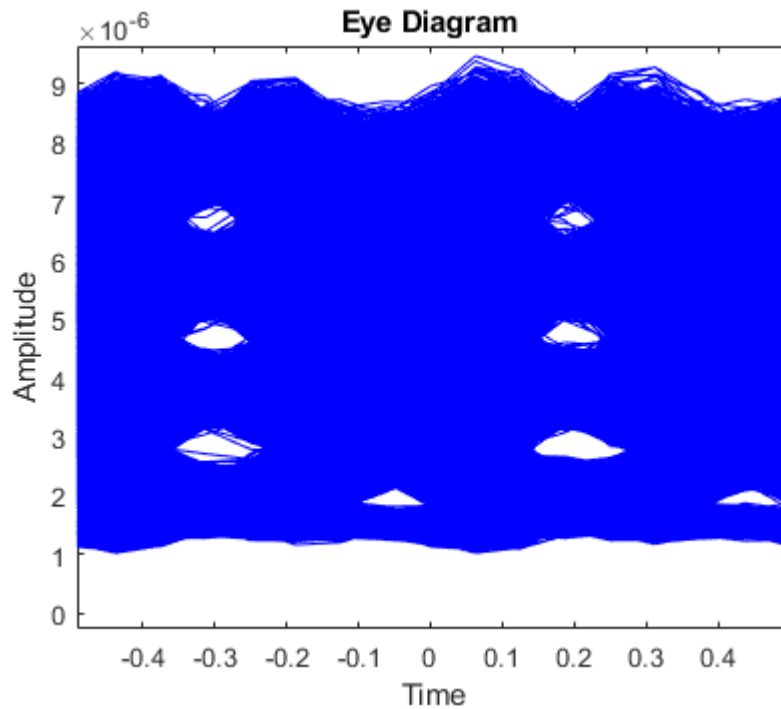


Figura 21.- Diagrama del ojo de una señal PAM4 tradicional recibida luego de un enlace de 50km de fibra óptica.  
Elaborado por: El autor (captura de la gráfica de Matlab).



*Figura 22.- Diagrama del ojo de una señal PAM4 generada con la técnica de entrelazado de bits recibida luego de un enlace de 70km de fibra óptica.  
Elaborado por: El autor (captura de la gráfica de Matlab).*

En la recepción se tienen los baudios de PAM4, mismos que fueron decodificados en 2 bits con ayuda de los niveles de umbral provistos en el diagrama del ojo, en pequeñas distancias se obtuvo un diagrama del ojo muy abierto siendo ideal para estas comunicaciones, al aumentar la longitud los valores del BER fueron disminuyendo hasta que en el rango de 70 a 80 km se pudo observar la pérdida de 1 baudio (2 bits).

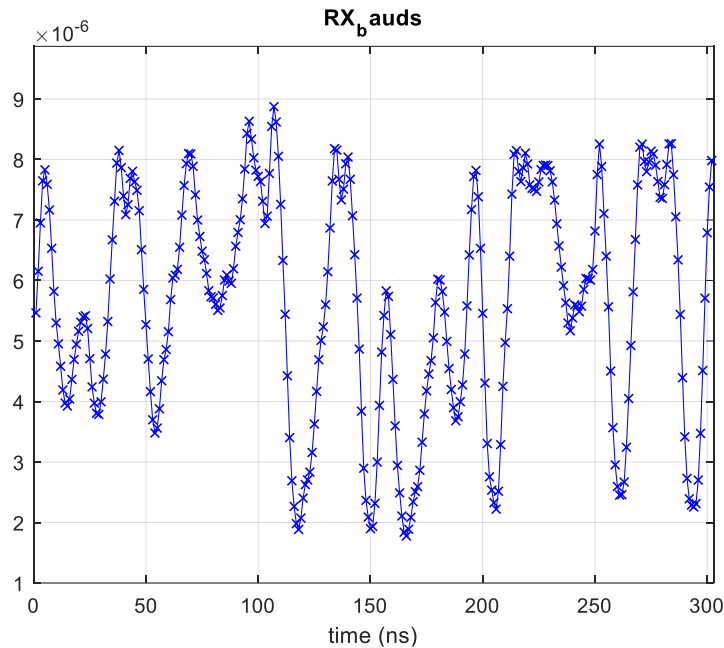


Figura 23.- Grafica de la señal recibida con entrelazado de bits en modulo RX de Matlab.  
Elaborado por: El autor (captura de la gráfica de Matlab).

Km	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61
BER	4.69 6423 2e- 06	1.40 8927 0e- 05	4.69 6423 2e- 05	1.64 3748 1e- 04	2.25 4283 1e- 04	4.46 1602 0e- 04	2.47 5015 0e- 03	1.49 3462 6e- 03	6.68 6297 7e- 02	6.02 5511 0e- 02	6.48 1064 0e- 02	7.38 5125 5e- 02
Potencia Dbm	- 19.1 75	- 19.9 38	- 20.1 70	- 20.4 30	- 20.7 07	- 20.8 77	- 21.1 38	- 21.4 00	- 21.6 35	- 21.9 48	- 22.1 91	- 22.4 25

Tabla 1.- Tabla de distancias y potencias recibidas con PAM4 Tradicional.  
Elaborado por: El autor.

Km	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
BER	4.696 4232e -06	9.392 8464e -06	3.757 1386e -05	7.044 6348e -05	5.635 7078e -05	8.453 5618e -05	1.878 5693e -04	2.301 2474e -04	3.038 5858e -03	9.706 0978e -02
Potencia Dbm	- 22.99 5	- 23.21 7	- 23.45 8	- 23.71 3	- 23.93 3	- 24.19 6	- 24.47 8	- 24.71 8	- 24.99 4	- 25.24 8

Tabla 2.- Tabla de distancias y potencias recibidas con PAM4 con entrelazado de bits.  
Elaborado por: El autor.

Finalmente, en la figura 24 se muestra los resultados del BER vs potencia recibida. Se observa que para señales PAM4 transmitidas a 20Gb/s, las curvas tienen un comportamiento similar (la misma tendencia), pero se logra un mucho mejor desempeño con la técnica de entrelazado de bits. Nótese que se logra mejorar el presupuesto de potencia de más cerca de 4dB al emplear la técnica de entrelazado

de bits para generar la señal PAM4: en la Figura 24 se observa que para lograr un BER de  $4 \cdot 10^{-6}$  se requiere una potencia recibida de -23dBm en el sistema que emplea una PAM4 generada con entrelazado de bits, mientras que si no usa entrelazado de bits se requiere una potencia de cerca de -19dBm para lograr el mismo BER.

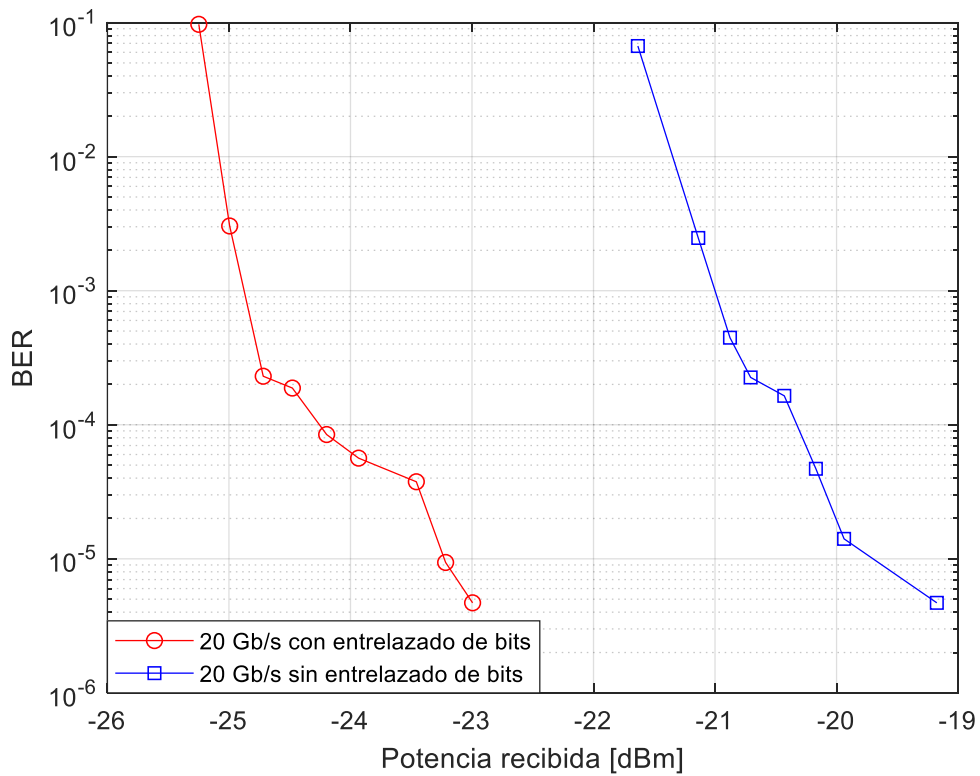


Figura 24.- Gráfica del BER vs Potencia Recibida para las dos técnicas de generación de señal PAM (con y sin entrelazado de bits).  
Elaborado por: El autor (captura de la gráfica de Matlab).

## CONCLUSIONES

- De acuerdo con las simulaciones propuestas de cada diseño y viendo las gráficas de los resultados existe una mejora de cerca de 4dB en el presupuesto de potencias, para lograr el mismo BER, si se usa entrelazado de bits con respecto a si no se usa esta técnica.
- En el entrelazado de bits se ha demostrado que podemos alcanzar distancias más grandes sin perder demasiada información a comparación de la PAM4 tradicional.
- Se ha demostrado la factibilidad de uso de la técnica de entrelazado de bits para, sin necesidad de insertar complejidad en el sistema, solo una pequeña modificación en la forma de generar la señal, lograr mejores resultados en la tasa de bits errados, para una señal PAM4 transmitida a 20Gb/s.

## RECOMENDACIONES

- En el proceso de co-simulación entre Matlab y Optsim se requiere el uso de varios archivos que se los genera previamente en el esquema de Optsim, estas están ubicadas en su mayoría en la dirección por defecto del software, es preferible no cambiar de directorio los archivos ya que genera errores en la ruta del sistema o a su vez al momento de crearlos especificar la ubicación que vamos a ocupar.
- Previo a correr las simulaciones en Optsim, es necesario asegurarse que el número de muestras, la frecuencia de muestreo, así como también los campos de las *timespan* sean correctos, y si este tiene alguna incompatibilidad Optsim la detectara, pero a pesar de ejecutar la simulación, no se pueden obtener los resultados.
- Continuando con la investigación sería conveniente considerar el uso de otros componentes de Optsim como el modulador Mach Zehnder de amplitud de brazo doble, esto permitirá comparar la eficiencia del mismo diseño de entrelazado de bits con diferentes componentes en mencionado diseño.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arevalo, G. V. (2019). *Curso de Sistemas de Medios de Transmisión - Material de estudio del Tema 4. (esquema de simulación empleando Optsim®)*.
- Arevalo, G. V., Villavicencio, M., & Flores, G. (2019). Experimental demonstration of a PAM-4 based 20 Gb/s PON using dispersion pre-compensation. *2019 18th Workshop on Information Processing and Control, RPIC 2019*, 283–285. <https://doi.org/10.1109/RPIC.2019.8882165>
- Bravo Barahona, C. I., & Sánchez González, L. J. (2012). *SIMULADOR DE ENLACE DE FIBRA ÓPTICA PUNTO A PUNTO USANDO INTERFAZ GRÁFICA DE MATLAB [ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL]*. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/21566>
- Deutsch, R. (2017). *Is there a gap in an LED between the plates (post & anvil) or a wire (or are there different kinds of each)?* <https://electronics.stackexchange.com/questions/338558/is-there-a-gap-in-an-led-between-the-plates-post-anvil-or-a-wire-or-are-the>
- Espantoso España, S. A. (2018). *Análisis comparativo de escenarios de simulación de códigos de líneas utilizados en sistemas de transmisión óptica sobre OptiSystem [Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]*. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/9784>
- Flores Asenjo, S. J. (2017). *Densidad espectral de potencia de una señal digital PAM multinivel*. <http://hdl.handle.net/10251/82983>
- GLADYS JANNETH, M. F. F. P., & VILLAVICENCIO TENELEMA. (2019). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED ÓPTICA PASIVA (PON) A 10 GBAUD/S EMPLEANDO PAM4 CON PRECOMPENSACIÓN. *Tesis*, 1–100. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>
- GORDILLO, H., BERNAL, M., & LADINO, I. (n.d.). *MODULACIONPOR AMPLITUD DE PULSO (PAM)*. [https://www.academia.edu/11979671/GUÍA\\_MODULACIÓN\\_PAM](https://www.academia.edu/11979671/GUÍA_MODULACIÓN_PAM)
- Grzegorz, J. S., Lukasz, M., & Siuzdak. (2015). *1,1 GBIT S white lighting LED-based visible light link with pulse amplitude modulation and Volterra DFE equalization.pdf*. 1620–1622.
- Guerrero Navia, B. A. (2019). *Diseño de un sistema de modulación Duobinario en redes ópticas utilizando OptiSystem [Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]*. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/13403>
- JDSU, Laferrière, J., Lietaert, G., Taws, R., & Wolszczak, S. (2010). *Reference Guide to Fiber Optic Testing Volume 1 (Vol. 1)*.
- Lin, S. Y., Tsao, H. W., & Lee, S. L. (2017). A novel method for PAM-4 signal quality estimation using asynchronous eye diagram reconstruction. *2017 Opto-Electronics and Communications Conference, OECC 2017 and Photonics Global Conference, PGC 2017, 2017-Novem*, 1–2. <https://doi.org/10.1109/OECC.2017.8114814>
- Ma, R., Cao, M., Chen, G., Duan, L., Song, Z., Chi, B., Detector, A. B. P., & Voltage, B. A. T. (2019). A 5 / 10 Gb / s Dual-Mode NRZ / PAM4 CDR in 65- nm CMOS. *2019 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)*, 1–3.
- Navarro, Mariam; Ballestas, A. (2003). ELABORACIÓN DE BANCO DE PRUEBAS PARA LA TRANSMISIÓN DIGITAL DE SEÑALES. *Zitteliana*, 19(8), 159–170.
- Pérez Vega, C. (2016). Capítulo 7 Modulación de Pulsos. *Departamento de Ingeniería de Comunicaciones*, 237–254.
- Suarez Morales, A. G. (2017). Estudio y simulación de un sistema de

- comunicaciones usando la tecnología FSO. [Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. In *Universidad Católica de Santiago de Guayaquil*.  
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/9201>
- Triviño Romero, Á. J. (2016). *Implementación de un sistema de transmisión y detección de señales M-PAM sobre fibra óptica de plástico*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Wipiejewski, T. (n.d.). *Photonics Packaging: Optical Communication Components*. Photonics. <https://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25514>
- Ye, C., Zhang, D., Huang, X., Feng, H., & Zhang, K. (2017). Demonstration of 50Gbps IM/DD PAM4 PON over 10GHz Class Optics Using Neural Network Based Nonlinear Equalization. *European Conference on Optical Communication, ECOC, 2017-Septe*, 1–3.  
<https://doi.org/10.1109/ECOC.2017.8346196>
- Zhang, J., Yu, J., Li, F., Li, X., & Wang, Y. (2015). Demonstration of Single-Carrier ETDM 400GE PAM-4 Signals Generation and Detection. *IEEE Photonics Technology Letters*, 27(24), 2543–2546.  
<https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2475315>
- Zhang, W., Ghorbani, H., Shao, T., & Yao, J. (2019). Mode-Division Multiplexed PAM-4 Signal Transmission in a Silicon Photonic Chip. *2019 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics, MWP 2019*, 1–4.  
<https://doi.org/10.1109/MWP.2019.8892155>

## ANEXOS

No aplica.