



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES**

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE TRANSMISIÓN DE SEÑALES ÓPTICAS CON  
MODULACIÓN POLIBINARIA A TRAVÉS DE ENLACES DE FIBRA ÓPTICA**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**ING. JULIO AUGUSTO RODRÍGUEZ GAYTÁN**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**DR. RAMÓN GUTIÉRREZ CASTREJÓN**

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Matías Maruri José María

Secretario: Dra. Moumtadi Fátima

Vocal: Dr. Gutiérrez Castrejón Ramón

1<sup>er.</sup> Suplente: Dr. Martynyuk Oleksandr

2<sup>d o.</sup> Suplente: Dr. Ceballos Herrera Daniel Enrique

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Gutiérrez Castrejón Ramón

-----  
**FIRMA**

---

# *Índice*

---

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>2</b>
1.1 Sistemas Ópticos de Telecomunicaciones	3
1.1.1 Emisores de luz	5
1.1.2 Fibra óptica	5
1.1.3 Receptores	6
1.2 Sistemas WDM	7
1.3 Eficiencia espectral	8
1.4 Dispersión cromática	9
1.5 Organización de la tesis	14
1.6 Referencias	15
<b>2 Modulación</b>	
2.1 Modulación directa	17
2.2 Modulación externa	19
2.3 Modulador Mach – Zendher	20
2.4 Formatos Avanzado de Modulación de señales ópticas con detección directa	25
2.4.1 No Return to Zero (NRZ)	26
2.4.2 Pulse Amplitude Modulation 4 (PAM-4)	27
2.4.3 Carrierless amplitude and phase modulation (CAP)	29
2.5 Referencias	30
<b>3 Modulación Polibinaria</b>	
3.1 Señales con codificación con correlación entre niveles	34
3.2 Modulación duobinaria	41
3.2.1 Señales ópticas duobinarias de 3 niveles	44
3.2.2 Señales ópticas duobinarias de 2 niveles	48
3.3 Señales Polibinarias	52
3.3.1 Polibinaria 1: 5 niveles, filtro a 50% de bitrate MZM en cuadratura	53
3.3.2 Polibinaria 2: 3 niveles, filtro al 50% de bitrate, MZM en punto nulo	55
3.3.3 Polibinaria 3: 5 niveles, filtro a 18% de bitrate, MZM en cuadratura	57
3.3.4 Polibinaria 4: 3 niveles, filtro al 18% de bitrate, MZM en punto nulo	60
3.4 Referencias	65

<b>4</b>	<b>Simulación de transmisión de señales polibinarias a través de fibra óptica</b>	
4.1	Elementos de simulación	67
4.2	Simulación de transmisión de señal NRZ	70
4.3	Simulación de señales duobinaria de 2 niveles	77
4.4	Simulación de señales duobinarias de 3 niveles	81
4.5	Simulación de señales polibinarias 1	86
4.6	Simulación de señales polibinarias 2	91
4.7	Simulación de señales polibinarias 3	96
4.8	Simulación de señales polibinarias 4	100
4.9	Conclusiones del capítulo	104
<b>5</b>	<b>Conclusiones Generales y Trabajo a Futuro</b>	<b>107</b>
5.1	Trabajo a futuro	109

---

## *Agradecimientos*

---

Agradezco a mis padres y hermano que tanto amo y que tanto apoyo y paciencia me han brindado en la vida. A toda mi familia que me hace dichoso día con día, así como a mis amigos que han caminado a mi lado, en las buenas y las malas, en todo este proceso de preparación profesional.

Agradezco a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM por el apoyo recibido para la realización del proyecto PAPIIT IN103416.

---

## *Resumen*

---

En este trabajo, como primera instancia se realizó un ahondamiento en los beneficios que conllevan los formatos de modulación avanzados sobre los sistemas de comunicaciones ópticas de alta capacidad. Consecuentemente, se hizo un enfoque en las señales ópticas con formato de modulación polibinario, dicho formato ha sido poco abordado y estudiado en el mundo de las comunicaciones ópticas como opción para los enlaces de alta capacidad. En este trabajo, se recae en los beneficios que presentan estos tipos de modulación, sobre todo en los efectos de distorsión debido a dispersión cromática dentro de la fibra monomodo SMF-28, la cual sigue las recomendaciones hechas por la ITU en su norma ITU-T G.652 y que a su vez, es la fibra con mayor implementación en los sistemas ópticos de comunicaciones a nivel mundial. Posteriormente se desarrollaron simulaciones de modulaciones, transmisiones y recepciones de las señales ópticas con las modulaciones ya mencionadas a distintas distancias, se recopilaron resultados y análisis del comportamiento de dichas señales a partir de la calidad presentada en el punto de recepción.

A través de la simulación de la generación de distintas señales ópticas, cuya tasa fue de 10 Gbps en todos los casos y el uso de un modulador Mach-Zehnder bajo las configuraciones de cuadratura o punto nulo, se analizó, midió y comparó los distintos formatos de modulación respecto a la calidad con la que era recibida la señal, el ancho espectral que ocupaba, la complejidad para hacer la recepción adecuada y su resistencia ante efectos dispersivos en la fibra óptica.

---

## *Capítulo 1: Introducción*

---

Las tecnologías de la comunicación son una necesidad en el mundo global en que vivimos actualmente, a tal grado que sectores esenciales de las sociedades son totalmente dependientes de estas tecnologías. La economía, por ejemplo, es un sector que hoy no se concibe sin el intercambio de una gran cantidad de información [1] a través de cortas, medianas y largas distancias. La necesidad de enlaces de comunicación cuya capacidad permita una considerable cantidad de intercambio de bits por segundo es una demanda básica en esta actualidad, en donde casi cualquier persona puede ser consumidora o productora de contenido multimedia para ser transmitido por cada uno de los enlaces de comunicación que constituyen la *World Wide Web*.

Actividades como el consumo de video, videollamadas, enlaces intercontinentales para video jugadores en tiempo real, contenidos multimedia por demanda o transmisión de videos por *streaming* son solo algunas de las actividades que múltiples empresas han convertido en una necesidad para muchas personas y cuya demanda de ancho de banda debe ser satisfecha en todo momento, dado que no sólo se demanda la funcionalidad sin interrupciones o errores de estos contenidos, sino que debe ser en la más alta calidad posible, y estas exigencias seguirán creciendo constantemente.

El intercambio de información a grandes distancias y capacidades, empuja a la humanidad hacia un desarrollo acelerado de nuevas tecnologías de la información que permite la existencia de dichos servicios, encontrándonos en una carrera de investigación y desarrollo para mantener el ritmo de los sectores económicos ya existentes, así como, los que se avecinan en un futuro. No estamos muy lejos de la implementación a grande escala de otros servicios o productos que requerirán en un futuro de un consumo cada vez mayor de ancho de banda para su funcionamiento como por ejemplo, el denominado internet de las cosas [2], enlaces múltiples para servicio a través de la nube [3] cómputo en la nube o incluso, la operación de dispositivos complejos en tiempo real como bien podría ser un sistema de cirugía operado a distancia [4].

La demanda de capacidad de conexiones ha seguido creciendo constantemente [5], las tecnologías ópticas han sido una excelente opción tanto comercial como tecnológica, debido a que estas han tenido un comportamiento de reducción en el costo por bit transmitido [6] por cada fibra óptica, permitiendo con ello el crecimiento de la capacidad de los sistemas ópticos, así como sus coberturas. En promedio, la capacidad de transmisión sobre una sola fibra óptica ha ido incrementando en una magnitud de 100 veces cada diez años, durante los últimos 30 años [7].

Aplicaciones con un consumo alto de ancho de banda, incluyendo complejos contenidos digitales multimedia, como lo son videojuegos *online* en calidades cercanas a *4K*, o bien, contenido de video en el mismo formato de calidad, son los servicios que han encaminado a la mayor evolución de plataformas de servicio y transmisión, y a su vez han generado la mayor producción e inversión en infraestructura de las comunicaciones. Durante estos años ha habido una correlación entre los requerimientos de los contenidos multimedia y la siguiente generación de redes ópticas tanto en la arquitectura como en los servicios y la tecnología desarrollada. Hoy en día el contenido multimedia no sólo se ha convertido en el mayor flujo de información [6], sino que se espera que continúe creciendo a un ritmo del doble de tráfico de información cada 12 o 18 meses [8]. De acuerdo al *Cisco Visual Network Index Forecast*, el tráfico dentro de áreas metropolitanas llegará al 66 por ciento del tráfico IP total para 2019[1].

Hasta hace un par de décadas, a los sistemas de comunicación óptica se les consideraba todavía como aquellos que permitirían canales de comunicación cuya capacidad sería “ilimitada”, sin embargo, esos días han quedado atrás. El interminable crecimiento de la demanda de ancho de banda y particularmente el reciente impulso [9] de los *data centers*, así como los paradigmas que trae consigo el cómputo en la nube, ha puesto a los sistemas de comunicaciones ópticas bajo extrema presión. Los más recientes desarrollos e investigaciones acerca de los sistemas ópticos se han enfocado en encontrar nuevas soluciones para maximizar la capacidad de las fibras ópticas y aprovechar cada vez más el máximo de los beneficios que ofrecen para estar cada vez más cerca del límite de Shannon. Actualmente se han logrado [10] enlaces 100G / 400G, con la ayuda de DSP (*Digital Signal Processing*) con base en circuitos integrados, enlaces WDM (Wavelength Division Multiplexing) de hasta 80 km a tasas cercanas a los 8 Tbits/s utilizando modulación coherente y una eficiencia espectral de 2 bits/Hz/s. Es entonces que los formatos avanzados de modulación en las señales ópticas son una de las respuestas a estas tendencias de demanda de capacidades cada vez más grandes.

### 1.1 Sistemas Ópticos de Telecomunicaciones

Las frecuencias ópticas de los sistemas ópticos de comunicación son la razón por la que las señales pueden servir como portadoras de información de un gran ancho de banda. Las fibras representan un medio de transmisión muy atractivo que ofrece tanto pérdidas ultra bajas como baja dispersión cromática.

La ventaja que presentan las redes ópticas de alta capacidad que interconectan ciudades, países o continentes completos son la base para la existencia y funcionamiento de la *World Wide Web*. Los enlaces a través de fibra óptica son esenciales para satisfacer la demanda de consumo e intercambio de información en casas, negocios o grandes



empresas, todas interconectadas todo el tiempo. La creciente implementación de los sistemas FTTX [11] (*Fiber to the x*) demuestran que los sistemas de comunicaciones ópticos son la solución más eficiente para cumplir requerimientos de los usuarios y los proveedores de servicios de internet. Entre sus grandes ventajas están su mayor eficiencia de gasto de energía y de costo económico, primordialmente.

Un Sistema de Comunicaciones Ópticas consiste esencialmente, como todo sistema básico de telecomunicaciones, en un sistema que conlleva 3 acciones fundamentales para llevar a cabo la transmisión de información: la emisión de una señal que contenga información desde un punto determinado A (origen/emisor), dicha señal de información debe poder viajar a través de un medio físico (fibra) con la mayor eficiencia posible y evitar que dicha información se pierda en el transcurso de su recorrido; y por último, que en un punto B (destino/receptor) la señal que había sido enviada desde el punto A se pueda recuperar en su totalidad y con esta la información originalmente emitida.

Cuando se hace referencia a un sistema óptico de comunicaciones, el transmisor debe ser un dispositivo de emisión de luz, dicho dispositivo tiene la tarea de enviar la señal luminosa que se propagará a lo largo de la fibra óptica. Generalmente el transmisor o emisor es un dispositivo de emisión láser o un diodo emisor de luz (LED). El medio físico por el cual la luz es conducida sin deteriorarse ni sufrir pérdidas o distorsiones es la fibra óptica. Por último, el receptor del sistema es generalmente un transductor óptico-eléctrico comúnmente conocido como fotosensor, este dispositivo es capaz de detectar y medir una señal óptica y transformarla en una señal eléctrica.

Algunas de las ventajas [12] de los sistemas ópticos de comunicaciones son:

- ✓ Las señales ópticas que viajan dentro de la fibra óptica no se ven afectadas por interferencias electromagnéticas o de radiofrecuencia.
- ✓ El tamaño de las fibras ópticas es de mucho menor dimensión y peso que los cables que se emplean en transmisión de señales eléctricas, esto los hace mucho más fáciles de instalar y transportar, reduciendo con ello costos significativamente.
- ✓ La seguridad de la información que viaja por la fibra óptica es mayor, debido a que una fibra óptica no se puede intervenir por medio de mecanismos eléctricos convencionales. La luz que viaja dentro de la fibra no puede escapar, incluso si la intervención fuese exitosa, se podría detectar inmediatamente monitorizando la señal óptica recibida al final de la fibra.

### 1.1.1 Emisores de luz

La función de un transmisor en los sistemas de comunicaciones ópticas es fundamental, ya que este dispositivo es el encargado de generar la señal óptica que viajará por la fibra, la cual generalmente es a partir de una señal eléctrica. Los dispositivos más comunes que se usan en los sistemas de telecomunicaciones ópticos [13] son los diodos emisores de luz (LED) y los láseres de semiconductor. La elección de estos dispositivos generalmente es por tener ventajas destacables por sobre otras tecnologías. Entre algunas de estas ventajas están el reducido tamaño de estos dispositivos, la alta confiabilidad de su funcionamiento, la operación en la longitud de onda adecuada y en algunas ocasiones es debido a que el dispositivo emisor de la señal óptica es capaz de modular la señal directamente a frecuencias relativamente altas [14].

El principio básico del funcionamiento de los emisores de luz, se sustenta [15] en el cambio de energía de los átomos del material luminiscente del que están constituidos. Los átomos de estos materiales son capaces de subir de un estado bajo de energía a un estado alto de energía al ser estimulados por una fuente externa. Posteriormente, el átomo regresará a su estado inicial de energía, al regresar a su estado inicial liberará energía en forma de un fotón, este proceso es la emisión de luz. La emisión de luz ocurre de dos maneras posibles, una es la *emisión espontánea* de luz, que es la que ocurre cuando un átomo desciende a un nivel más bajo de energía y libera la energía en forma de un fotón, o bien puede emitir la luz a través de una *emisión estimulada*, en este proceso un fotón previamente liberado, estimula a un átomo que se encuentra en un nivel de energía alto y con dicha estimulación, el átomo pasa a un estado más bajo de energía consiguiendo liberar un fotón. El principio de funcionamiento de los LEDs tiene como base la emisión espontánea, mientras que el de los láseres la emisión estimulada.

### 1.1.2 Fibra óptica

La fibra óptica es el canal o medio por el cual la luz emitida por el transmisor óptico puede viajar hasta llegar al receptor óptico, en los sistemas de comunicación óptica se usa fibra óptica debido a las bajas pérdidas que garantiza, éstas se encuentran en un orden menor a 0.2 dB/km [16], al mismo tiempo que permite que la luz sea propagada dentro de la fibra, también la aísla de efectos externos que distorsionen la información que transporta, garantizando a su vez que llegue a su destino con la misma información con la que fue emitida.

La fibra óptica es esencialmente un núcleo cilíndrico de vidrio de sílice que está rodeado de un revestimiento cuyo índice de refracción es ligeramente menor al del núcleo, teniendo en la frontera de estas dos partes de la fibra, un cambio abrupto de índice de

refracción, a este tipo de fibras se les conoce como fibras *step-index*. La existencia de esta variación de índices de refracción permite que se presente el fenómeno conocido como reflexión total interna, con el cual se garantiza que la luz viajará dentro del núcleo de la fibra a lo largo de su recorrido desde el emisor hasta el receptor. Cuando la variación del índice de refracción entre el revestimiento y el núcleo no es abrupta, sino que el cambio se da de manera gradual, a ese tipo de fibra se le conoce entonces como fibra de índice graduado.

Las fibras ópticas se pueden clasificar de distintas maneras debido a los múltiples parámetros físicos [14] que se pueden “controlar” dependiendo, por ejemplo, de la geometría con la que están construidas, los materiales de los que consiste su fabricación, el tipo de cubierta externa para hacer la fibra más robusta a fenómenos del medio, etc. Sin embargo, una manera simple de caracterizar a las fibras ópticas puede ser sencillamente en fibras monomodo y fibras multimodo.

Las fibras monomodo son aquellas que soportan únicamente el modo fundamental de propagación. Este tipo de fibra está diseñado de tal manera que todos los demás modos de propagación son rechazados. Las fibras monomodo tienen un núcleo estrecho cuyo diámetro suele ser de entre 8 y 10 micrómetros, el diámetro exterior del revestimiento es de 125 micrómetros aproximadamente. Este tipo de fibras es la más utilizada en sistemas de comunicaciones de alta capacidad debido a que permite tasas elevadas de bits transmitidos y a grandes distancias (decenas de kilómetros) [16].

### 1.1.3 Receptores

La función de un receptor óptico es la de transformar la energía óptica recibida a través de la fibra óptica en energía eléctrica y con esto poder recuperar la información contenida en la señal originalmente transmitida. El componente fundamental de un receptor óptico es un fotodetector, el cual convierte la señal óptica en señal eléctrica a través del efecto fotoeléctrico. Los parámetros importantes de un receptor óptico son muy parecidos a los de un emisor óptico, ya que prácticamente un buen receptor se enfoca en que tenga una alta sensibilidad, respuesta rápida, bajo costo, bajo ruido y una alta confiabilidad [14].

## 1.2 Sistemas WDM

Un importante aspecto de los sistemas de comunicaciones ópticos yace en la ventaja de poder enviar diferentes longitudes de onda a través de una sola fibra óptica simultáneamente dentro de la banda espectral de los 1300nm ~ 1600 nm [14]. La tecnología de combinar diferentes longitudes de onda dentro de una sola fibra se le conoce con el nombre de Multiplexado por División de Longitud de Onda, o bien WDM por sus siglas en inglés (*Wavelength Division Multiplexing*). En los sistemas WDM las longitudes de onda (frecuencias ópticas) deben tener un espaciamiento apropiado [18] dentro del campo espectral para de esta manera poder evadir interferencia de intercanal entre ellas, también conocida como intercorrelación cruzada.

La aplicación primordial de los sistemas WDM es aumentar [13] significativamente la capacidad de transmisión, es decir, si a través de una sola fibra se puede transmitir información sobre una frecuencia óptica a cierta tasa de bits, la capacidad de transmisión total de la fibra se podrá incrementar por la cantidad de longitudes de onda que se propaguen al mismo tiempo dentro de la fibra. Otro aspecto importante de los sistemas WDM es la transparencia que presentan, dado que las distintas longitudes de onda pueden tener su propio formato de modulación, pueden cargar información digital o análoga, tener una velocidad baja o alta, síncrona o asíncrona y no se verán afectadas ningunas de las señales viajando al mismo tiempo. Así mismo, el posible enrutamiento de cada una de las frecuencias ópticas es otro de los aspectos atractivos de los sistemas WDM.

El dominio espectral de las señales ópticas en las telecomunicaciones se divide en 6 bandas [13]: la banda O (1260 [nm] – 1360 [nm]), la banda E (1360 [nm]– 1460 [nm]), la banda S (1460 [nm] – 1530 [nm]), la banda C (1530 [nm] – 1565 [nm]), la banda L (1570 [nm] – 1620 [nm]), y la banda U (1620 [nm] – 1675 [nm]). Las bandas ópticas donde primordialmente operan los sistemas WDM son la O, S, C y L [30]. La adecuada selección de la banda de operación corresponde a las particularidades de cada sistema, generalmente es dependiendo del tipo de fibra óptica a implementar.

El espaciamiento intercanal o bien la diferencia entre las frecuencias de cada señal óptica que se encuentra dentro del sistema WDM es una parte muy importante para el diseño de estos sistemas. El espaciamiento intercanal de un sistema WDM se ilustra en la Fig. 1.1. El espaciamiento intercanal, primordialmente nos da una idea de la cantidad de señales ópticas que pueden viajar dentro de un ancho de banda dado; si hay poco espaciamiento intercanal pueden viajar más frecuencias ópticas en un ancho de banda menor, sin embargo, si se tiene poco espaciamiento intercanal pueden contraer efectos no deseados como la degradación de la señal por intercomunicación cruzada [13], o bien,

puede resultar más difícil el multiplexado o demultiplexado de los canales debido a que se necesitarían filtros más selectivos para poder separar cada una de las señales.

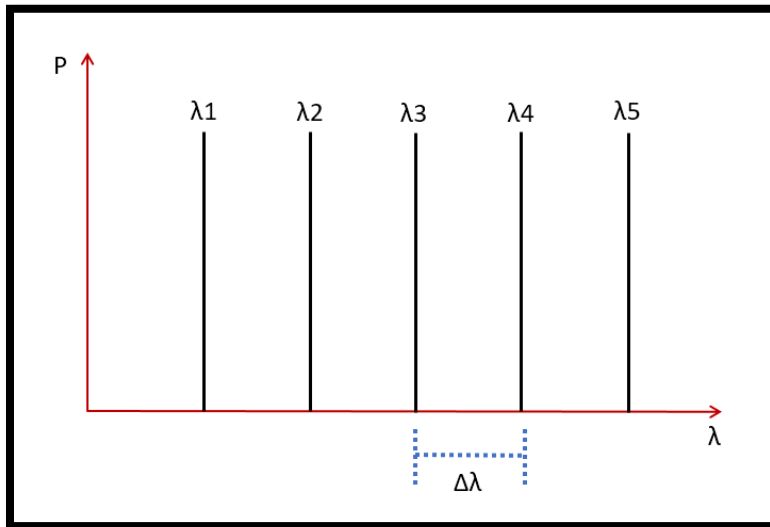


Figura 1.1 Espaciamiento intercanal dentro del espectro de una señal óptica con 5 canales.

Existen dos tipos generales de recomendaciones para una adecuada separación intercanal en los sistemas WDM: DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) y CDWM (Coarse Wavelength Division Multiplexing). La diferencia entre ambas es que en el caso de DWDM existe un menor espaciamiento intercanal para un mejor aprovechamiento del ancho de banda y es por eso que este es el que cuenta con mayor uso en la industria de las telecomunicaciones. La *International Telecommunications Union* en su estándar ITU-T G.671[20] menciona que un sistema CWDM es aquel cuyos dispositivos operan con espaciamientos de longitud de onda menores a 50 [nm], pero mayores a 1000 [GHz] (cerca de 8 [nm]) a una longitud de onda de 1550 [nm] y 5.7 [nm] a longitud de onda de 1310 [nm]). Por otro lado, menciona que los sistemas WDM son aquellos cuyos dispositivos operan con un espaciamiento de longitud de onda menor o igual a 1000 [GHz].

### 1.3 Eficiencia Espectral

En los sistemas WDM cada uno de los canales que son lanzados simultáneamente dentro de una fibra óptica de longitud  $L$  cuenta con su propia tasa de bits  $B_1, B_2, B_3, \dots B_N$ . Entonces se considera que el producto total del *bitrate* por la distancia de la fibra es:

$$BL = (B_1 + B_2 + B_3 + \dots + B_N)L \quad (1)$$

A esto se le considera como la capacidad total de la fibra para transmitir cierta cantidad de información considerando todos sus canales por la distancia del enlace óptico, y se mide en (Bits/s)-km.

La capacidad de un sistema de comunicaciones ópticas WDM depende de qué tan cercanos se encuentren sus canales de comunicaciones uno del otro (espaciamiento intercanal) dentro del dominio de la longitud de onda permitida. El espaciamiento intercanal  $\Delta\eta_{ch}$  está limitado por la posible intercomunicación cruzada [15], por tanto, para evitar este tipo de degradación de las señales se considera dejar un margen de guarda o de seguridad entre un canal y otro. Este requerimiento representa un gasto considerable de ancho de banda dentro de los sistemas WDM.

Una forma de cuantificar qué tanto se aprovecha o se desperdicia el ancho de banda dentro de un sistema WDM es midiendo la eficiencia espectral  $\eta_s$ . La eficiencia espectral  $\eta_s$ , es la razón del *bitrate* transmitido dentro del ancho espectral  $\eta_s = \frac{B}{\Delta\eta_{ch}}$ , y se mide en (Bits/s/Hz). Los sistemas WDM más recientes buscan hacer uso eficiente del espectro, por lo que su eficiencia espectral es muy alta. Para ello hacen uso de modulación con base en formatos avanzados, que permiten transmitir la información a altas tasas de bits en anchos de banda pequeños, lo que permite “empaquetar” más canales en un ancho de banda dado. Así se podrá contar con sistemas WDM con mucha mayor capacidad de transmisión dentro de una sola fibra óptica. Por ello es que los esfuerzos en conseguir canales ópticos más angostos y evitando la intercomunicación cruzada es un punto fuerte para seguir maximizando la capacidad de los sistemas ópticos WDM.

Gran parte de la motivación del trabajo de esta tesis es conseguir señales ópticas que tenga una eficiencia espectral por encima de las señales promedio y con eso mejorar los sistemas de comunicaciones ópticas WDM, mediante procesos de poca complejidad y bajos costos económicos.

#### 1.4 Dispersión cromática

El índice de refracción nos indica en qué proporción la velocidad de la luz es más lenta al viajar en algún medio dado con respecto a cuando ésta viaja en el vacío, por eso es que el valor adecuado para hacer referencia a la velocidad de la luz en todo momento es  $\frac{c}{n}$ . Dentro de la fibra óptica la luz viaja más lento que en el vacío o aire, esto se debe a

que el material de la fibra es más denso que el aire, y sus componentes “frenan” la luz cuando ésta viaja en la fibra. Es por eso que el valor que se conoce como la velocidad de la luz  $c$ , que es referente a  $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$  aproximadamente, se refiere al valor en el caso único cuando la luz viaja en el vacío o el aire (que prácticamente es el mismo valor) y en cuyo caso el índice de refracción  $n$  es prácticamente igual a 1.

Los principales factores [15] que deterioran la calidad de información que contiene el haz propagándose dentro de la fibra son: la atenuación, que se origina principalmente por reflexiones que ocurren dentro de la fibra debido a dobleces, empalmes, dispositivos o al mismo material del que está fabricada la misma fibra, las no linealidades, que son efectos dependientes de la potencia del haz y su interacción con el acomodo de las partículas de la fibra y, por último, pero no menos importante, la dispersión, que es un efecto de sumo interés en este trabajo.

La velocidad con la que viaja la luz es dependiente del índice de refracción del material del medio en la que ésta se propaga, esto se debe a que al mismo tiempo el índice de refracción del material depende de la longitud de onda del haz que viaja a través de este [15]. La dispersión cromática es el efecto ocasionado por la diferencia de velocidades con las que viaja cada uno de los componentes espectrales del haz dentro de la fibra. Este fenómeno existe debido a que todo espectro de un haz está compuesto por un rango de distintas longitudes de onda, y cada una de estas longitudes de onda tiene un comportamiento distinto sobre el medio en que se propaga, esto se debe a que el índice de refracción del medio tendrá un valor distinto para cada una de las longitudes de onda que compone el haz óptico. Las longitudes de onda de las que está compuesto el haz óptico, viajan a distintas velocidades, a esto se le conoce como dispersión de velocidad de grupo [14] (GVD), lo que ocasiona que lleguen a su destino (receptor) a tiempos distintos, generando así un ensanchamiento o reducción del pulso enviado. En la Figura 1.2, se muestran dos tipos de retrasos de las longitudes de onda en un pulso al viajar por determinada fibra óptica.

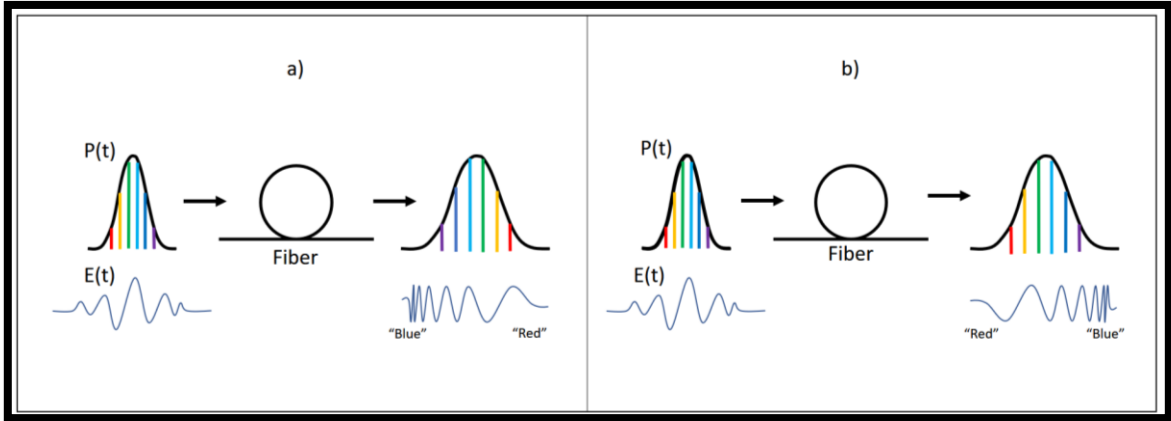


Figura 1.2. Tipos de retraso de las longitudes de onda dentro de una fibra óptica: a) dispersión normal, frecuencias altas viajan más lento que las frecuencias bajas. b) Dispersión anormal, frecuencias bajas viajan más lento que las frecuencias altas

Para analizar el efecto de dispersión bajo una explicación más contundente, consideremos una fibra SMF de una longitud  $L$  por la cual viajará un haz de luz centrado en la frecuencia  $\omega$  y  $T$  es el tiempo que se retardará en recorrer la fibra ese componente espectral del haz. La velocidad con la que viaja ese componente está dada entonces por  $v = \frac{L}{T}$ .

Sabemos que el tiempo en que tarda en llegar un componente espectral centrado en  $\omega$  es  $T = \frac{L}{v_g}$ , sin embargo, si quisiéramos calcular la variación de llegada de cada una de las componentes dependiendo de la frecuencia, sería:

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{L}{v_g} \right) \Delta\omega = L \frac{d}{d\omega} \left( \frac{1}{v_g} \right) \Delta\omega, \quad (2)$$

No obstante, dado que

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda n} = k \frac{c}{n}, \quad (3)$$

Donde se puede deducir la siguiente expresión que relaciona la velocidad de grupo con la razón de cambio entre  $k$  y  $\omega$



$$\frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n_g} = v_g \quad (4)$$

Donde  $n_g$  y  $v_g$  son el índice de refracción de grupo y la velocidad de grupo. Luego entonces si se sustituye (4) en (2), tenemos que:

$$\Delta T = L \frac{d}{d\omega} \left( \frac{dk}{d\omega} \right) \Delta\omega = L \frac{d^2k}{d\omega^2} \Delta\omega \quad (5)$$

La expresión  $\frac{d^2k}{d\omega^2}$  también se le conoce como  $\beta_2$  o bien parámetro de dispersión de velocidad de grupo. Teniendo entonces la expresión final de:

$$\Delta T = L \beta_2 \Delta\omega \quad (6)$$

Si se requiere reescribir la misma expresión usando en lugar de la frecuencia  $\omega$ , la longitud de onda  $\lambda$ , a partir de la expresión  $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ , donde a partir de derivar omega con respecto a lambda se tiene:  $\Delta\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \Delta\lambda$ . Sr reescribe entonces la ecuación como:

$$\Delta T = DL \Delta\lambda, \quad (7)$$

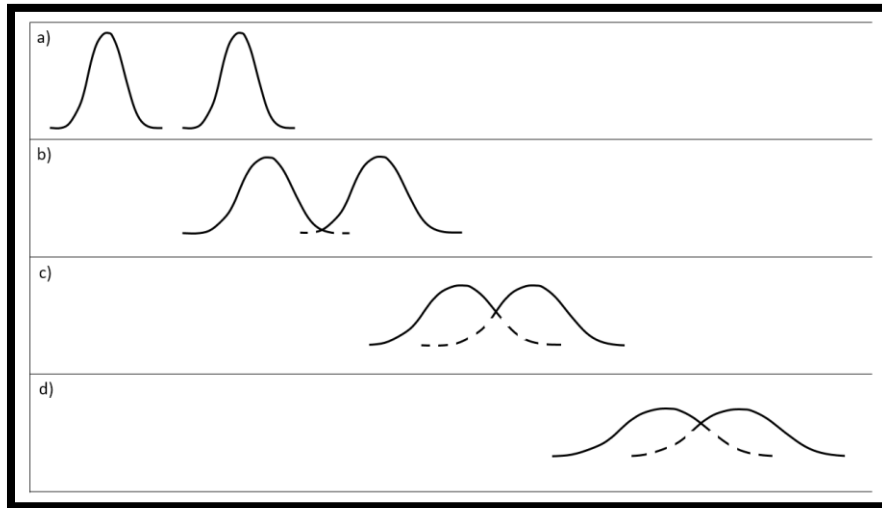
Donde:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (8)$$

A D se le conoce como parámetro de dispersión [14] expresado en las unidades de ps/(km·nm) y define la dispersión de la señal en función de la longitud de onda.

La principal y más importante consecuencia de la dispersión cromática del pulso emitido a través de la fibra óptica es el ensanchamiento del pulso. Este fenómeno no es deseado dado que el efecto de ensanchamiento de los pulsos ópticos que contienen la información emitida, puede llegar al punto en que un pulso se interponga en el dominio de la

existencia del pulso vecino, ocasionando entonces que no quede claro en qué punto se dividen ambos pulsos, resultando en una equívoca recepción y traducción de información por parte del receptor. A este fenómeno se le conoce como Interferencia Intersimbólica (ISI) [14] y se muestra gráficamente en la Fig. 1.3.



*Figura 1.3 Ejemplificación de cómo los pulsos, en la mayoría de los casos, se ensanchan respecto a la distancia que se propagan debido a la dispersión cromática de la fibra óptica.*

Es entonces el efecto de dispersión cromática un factor que limita la velocidad de transmisión [23] de pulsos ópticos, dado que, si los pulsos son emitidos a una tasa de velocidad alta, estos están más cerca uno de otros, lo que puede repercutir en que con una menor dispersión cromática sea más fácil que la interferencia intersimbólica exista.

No obstante, la interferencia intersimbólica no es el único efecto negativo ocasionado por la dispersión cromática. El ensanchamiento de un pulso se traduce también en una dispersión de su energía [15], resultando en que, si un pulso óptico se ensancha demasiado, perderá su forma. Luego entonces, si un pulso óptico se degrada demasiado después de una distancia de propagación dentro de la fibra, el receptor óptico no sabrá certeramente si se trata de un pulso (uno) o de una señal en estado bajo (cero).

Se ha corroborado que la modulación polibinaria es un formato en el cual la señal óptica es mucho más resistente a los efectos de dispersión cromática, debido a que el espectro de la señal es mucho más angosto y su energía está mucho más concentrada en un ancho de banda reducido, por lo que la variación de la velocidad de grupo es mínima, incluso a distancias de cientos de kilómetros (sin considerar efectos no lineales ni de atenuación de señal). En este trabajo se demostrará numéricamente que efectivamente esto ocurre.

## 1.5 Organización de la Tesis

En el siguiente capítulo de este trabajo se presenta un acercamiento a los formatos de modulación en las señales ópticas de comunicaciones, sus variantes, ventajas y estado del arte respecto a este tema. En el tercer capítulo se ahonda en el formato de modulación denominado como modulación polibinaria, sus orígenes, la tecnología requerida para lograr cada una de sus variantes que se pueden generar y un pequeño análisis comparativo entre dichas variantes. El cuarto capítulo desglosa el trabajo llevado a cabo mediante la simulación de envío de señales ópticas a través de fibra óptica bajo distintos formatos de modulación, enfocándonos principalmente en las variantes del formato polibinario, obteniendo de esta manera resultados comparativos cuantitativos y cualitativos de este trabajo. Por último, en el quinto capítulo se expresan las conclusiones del trabajo realizado y trabajo posible a futuro.

## Referencias

- [1] Hecht, Jeff (2012). *Telecommunications Bubble Pumps Up the Optical Fiber Communications Conference*.
- [2] Jayavardhana, Gubbi & Rajkumar, Buyya & Slaven, Marusic & Marimuthu, Palaniswami. (2013). *Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, Future Generation Computer Systems*. Volume 29, Issue 7, September 2013.
- [3] R. W. Tkach (2010). *Scaling optical communications for the next decade and beyond. Bell Labs Technical Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 3-9, Winter 2010.
- [4] J. Arata & M. Mitsuishi & M. Hashizume (2014), *Robotic tele-surgery through the Internet — System development and its feasibility tests 2014. 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, Kuala Lumpur, 2014, pp. 11-12.
- [5] G. Ivanovs & S. Spolitis (2011). *Extending the reach of DWDM-PON access network using chromatic dispersion compensation*. 2011 IEEE Swedish Communication Technologies Workshop (Swe-CTW), pp. 29-33, 2011.
- [6] M. Novell & V. Vusirikala & R. Hays. *Overview of requirements and applications for 40 gigabit and 100 gigabit ethernet*. Ethernet Alliance White Paper, Jun. 2010.
- [7] A. Jukan & J. Mambretti (2012), *Evolution of Optical Networking Toward Rich Digital Media Services. Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 4, pp. 855-871, April 2012.
- [8] Rod C. & Alferness (2012), *The Evolution of Optical Communications Networks since 1990* (2012)
- [9] T.B. Zahariadis & G. Pau & G. Camarillo (2011). *Feature topic on future media Internet*, IEEE Commun Mag., vol. 49, no.3, Mar. 2011
- [10] D. Sadot (2016). *Pushing optical fiber communications to the Shannon limit: Advanced modulation formats and digital signal processing. 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Trento, 2016, pp. 1-3.
- [11] D. Sadot (2015) et al., *Single channel 112Gbit/sec PAM4 at 56Gbaud with digital signal processing for data centers applications*. Optics Express, 23, no. 2, pp. 991-997, Jan. 2015.
- [12] Bongtae Kim (2015), *FTTx migration to Giga-bps hyper-connectivity networking infrastructure. 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, Los Angeles, CA, 2015, pp. 1-3.

- [13] R. Gutiérrez Castrejón (2016). Notas del curso Sistemas Ópticos de Alta Velocidad. UNAM.
- [14] K. Gerd. (2000). *Optical Fiber Communications*. 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw-Hill, Singapore.
- [15] Govind, P.A. (2002). *Fiber-optic communication systems*. John Wiley, New York
- [16] B. Saleh & M. Teich. *Fundamentals of Photonics*, 2<sup>nd</sup> ed. Wiley (2007).
- [17] D.J. Richardson et al. *Space-division multiplexing in optical communication networks*. Proc. IEEE 100(5), 1035 [2012].
- [18] ITU-T 694.1, *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*  
[Online] Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/es>
- [19] Torres Ferrera, Pablo. (2012). *Análisis de Sistemas WDM como interfaz óptica para Ethernet a 100 y 400 Gb/s con alcance máximo de 40 km*. Tesis de Maestría. UNAM. Ciudad de México
- [20] ITU-T G.671, Transmission characteristics of optical components and subsystems (2012)  
[Online] Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.671/es>
- [21] ITU-T G.652, Characteristics of a single-mode optical fibre and cable (2009)  
[Online] Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/es>
- [22] D. Marcuse (1979), *Interdependence of waveguide and material dispersion*. Appl. Opt. vol. 18, pp 2930-2932, Sept. 1979.
- [23] G. Ivanovs & S. Spolitis, *Extending the reach of DWDM-PON access network using chromatic dispersion compensation*. 2011 IEEE Swedish Communication Technologies Workshop (Swe-CTW), pp. 29-33, 2011.

---

## *Capítulo 2: Modulación*

---

En los sistemas de comunicaciones ópticas, al igual que en los demás sistemas de comunicación, la modulación es parte esencial para poder alcanzar un mejor aprovechamiento de la señal transmitida (señal portadora), y así montar la mayor cantidad de información posible, siempre y cuando, se pueda recuperar en su totalidad en el receptor. Una de las ventajas de las señales ópticas está en la señal portadora, la cual permite un mucho mayor ancho de banda en comparación con otro tipo de señales de comunicaciones como lo pueden ser las señales de microondas o la gran mayoría de las señales inalámbricas, esto se debe a que la portadora de las señales ópticas cuenta con una frecuencia de oscilación mucho mayor. Lo anterior permite entonces, montar información a una mayor tasa de velocidad y tener gracias a ello, transmisiones de mayor capacidad [1].

### **2.1 Modulación directa**

La modulación directa consiste en la modulación en el transmisor láser mediante el control de la fuente de energía que lo alimenta. El esquema de este tipo de modulación se muestra en la Fig. 2.1. A partir de la información que se desea transmitir (ceros y unos) se genera una señal eléctrica que pueda controlar a la fuente de alimentación del láser, logrando encendiendo y apagando el láser mismo para generar señales 1 y 0, a esto es a lo que se le conoce como modulación directa de láser [2] (DML). En este caso, la señal eléctrica que alimenta al láser se sincroniza con la información que se quiere montar en la portadora, esta señal que se constituye de unos y ceros hará que el láser emita luz cuando se trata de un “1”, o bien se mantenga la corriente por debajo del umbral para que este no emita luz cuando se trate de un “0”. Los casos de modulación directa y generación de modulación de fase o frecuencia, son procesos más complejos [3,4], que para objetivos de este trabajo la explicación a detalle de estos casos queda fuera de alcance.

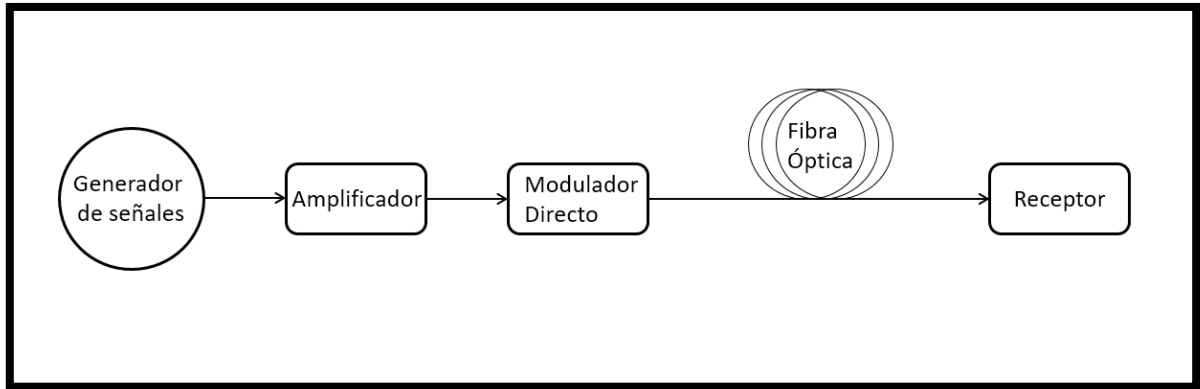


Figura 2.1 Esquema de implementación de un sistema de señales ópticas con modulación directa.

Los sistemas de comunicación de modulación directa, suelen tratarse de sistemas cuyo costo de instalación es bajo, y a su vez suele contar con la implementación de dispositivos más compactos y económicos, sin embargo, no suelen ser la mejor opción cuando se requieren sistemas ópticos de alta capacidad, debido al límite de velocidad de respuesta que tiene la manipulación constante del encendido y apagado del láser, así como los efectos negativos que produce el chirp [5] en la calidad de la señal.

La capacidad de los sistemas de modulación directa ha mejorado considerablemente en la última década, ya que a mediados de la década de los 2000s su máxima capacidad era de apenas 2.5 Gbps en los láseres de semiconductor [6], trayendo su constante evolución hacia el desarrollo de láseres DFB (*Distributed Feedback Laser*) obteniendo con ellos sistemas ópticos modulados directamente con capacidades de hasta 25.8 Gbps en una línea y distancias de hasta 50 km a esas tasas de velocidad [7].

No obstante, un efecto negativo que va relacionado con la manipulación de los láseres, como se mencionó anteriormente, es el chirp. El chirp es el nombre con el que se le conoce a la modulación de fase residual que lleva consigo el funcionamiento del láser. El efecto de chirp expande el espectro óptico emitido [1,3], lo que puede repercutir en un ensanchamiento de los pulsos de manera mucho más anticipada a lo largo de la transmisión por la fibra. Este ensanchamiento espectral que ocasiona el chirp en la señal es un gran impedimento para tener señales DWDM de alta capacidad con modulación directa, debido a que el chirp ocasionará que los espectros de cada canal sean más anchos de lo esperado y los canales no puedan coexistir dentro del rango óptico de manera eficiente.

Por último, pero no menos importante, se debe tomar en cuenta que los efectos de ruido generados por un láser modulado directamente producen degradación en la calidad de la transmisión por la fibra [8], estos tipos de ruido suelen ser: ruido RIN (*Relative Intensity Noise*), ruido de fase y/o ruido de frecuencia, los cuales se generan desde el láser mismo, estos efectos producen una penalización adicional en el rendimiento global del sistema. Por los motivos antes explicados, una modulación externa es más adecuada cuando se requiere de sistemas ópticos de alta capacidad.

## 2.2 Modulación externa

La modulación externa se produce a partir de la generación de un láser que emite luz con una longitud de onda continua e intensidad constante CWL (Continuos Wave Laser). Este láser de onda continua es direccionado hacia un dispositivo óptico externo conocido como modulador óptico externo, este dispositivo es el encargado de montar la información en el CWL y dirigir el haz con la información hacia la fibra óptica. El esquema correspondiente se muestra en la Fig. 2.2.

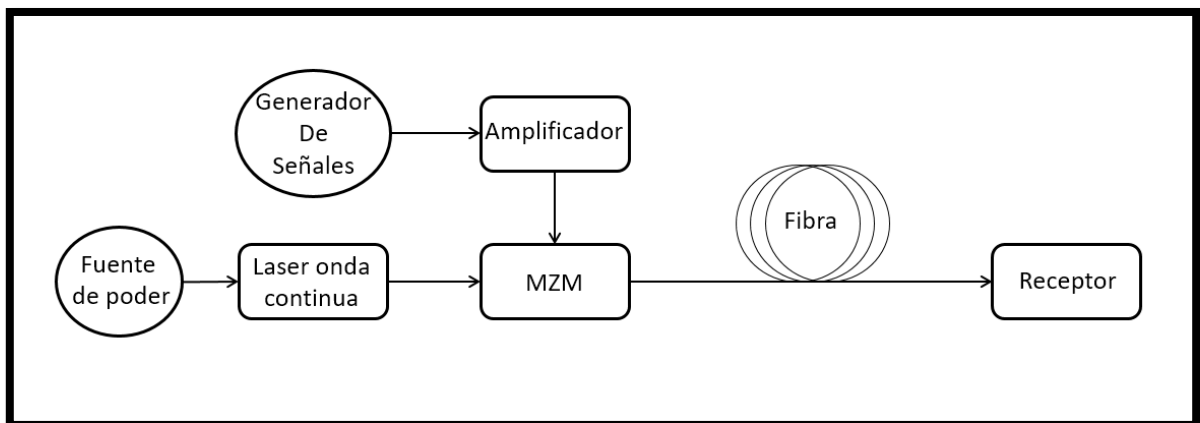


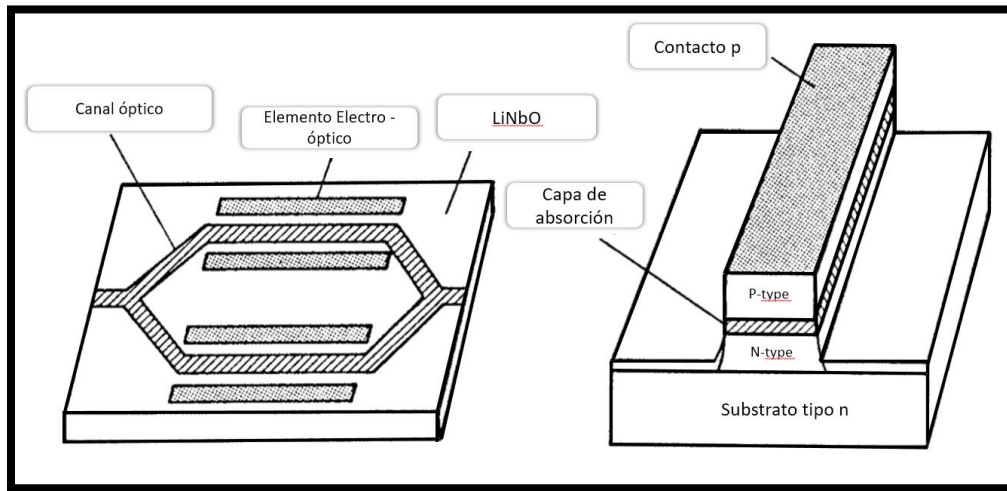
Figura 2.2 Esquema de un sistema de señales óptica de modulación externa, utilizando un Modulador Mach-Zehnder.

La modulación externa suele ser la mejor opción cuando de sistemas ópticos de alta capacidad se trata. Esto se debe a que los efectos negativos que se encuentran en la modulación directa como el chirp o ruidos por comportamientos en las variaciones de la generación del láser no están presentes o lo están en una cantidad mucho menor.

Existen dos tipos principales de moduladores ópticos externos: los moduladores electro-ópticos (EOM) y los moduladores de electro-absorción (EAM). Ver Fig. 2.3. Los



moduladores EAM, funcionan con base en la absorción de la luz en los semiconductores que los constituyen (efecto Franz-Keldysh) [3], dicha absorción de luz es proporcional a una corriente eléctrica externa que se le aplica. Una de las ventajas de este tipo de modulador externo es que generalmente se constituye del mismo material semiconductor que el láser, por lo que unificarlos en un mismo dispositivo (chip) no resulta en complicación alguna [3].



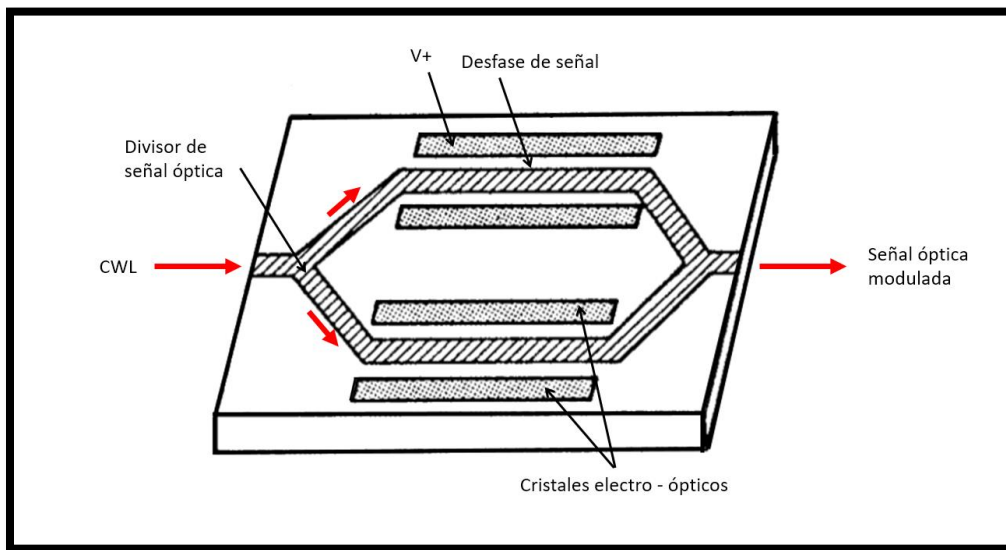
*Figura 2.3 Moduladores ópticos. En el lado izquierdo se representa un modulador electro-óptico como un Mach-Zehnder, mientras que del lado derecho se representa un modulador de electroabsorción*

Por otro lado, los EOM, generalmente están formados por un interferómetro Mach-Zehnder, el cual cuenta con cristales electro-ópticos en sus caminos ópticos, estos tienen la virtud de modificar el índice de refracción del material por el que viaja la luz, el índice de refracción se controla por medio de una señal eléctrica externa, la cual es la información que se quiere enviar. Este tipo de moduladores externos son los más utilizados en sistemas ópticos [9].

### 2.3 Modulador Mach-Zehnder

Los moduladores EOM, constan de cristales electro-ópticos, los cuales tienen la propiedad de modificar su índice de refracción en respuesta a un campo eléctrico aplicado en una posición determinada, en la mayoría de los casos estos cristales están constituidos de Niobato de Litio (LiNbO<sub>3</sub>) y, el cambio del índice de refracción de estos cristales pueden modificar las propiedades de la señal óptica que viaja dentro del EOM, estos cambios pueden manipularse de manera controlada y tener con esto modulación

de la señal en su intensidad o su fase. Al efecto del cambio de índice de refracción de los cristales electro-ópticos mediante una señal eléctrica, se le conoce como efecto Pockels [10]. Uno de los moduladores externos cuyo funcionamiento tiene como base la operación de cristales electro-ópticos es el Modulador Mach-Zehnder (MZM), este tipo de modulador es el más utilizado, incluso para sistemas ópticos de alta capacidad como, por ejemplo, el caso de redes a 400 Gbps y 1 Tbps [11], demostrando un comportamiento muy confiable y una respuesta ultrarrápida para que la modulación a esta tasa de bits ocurra sin problema alguno.



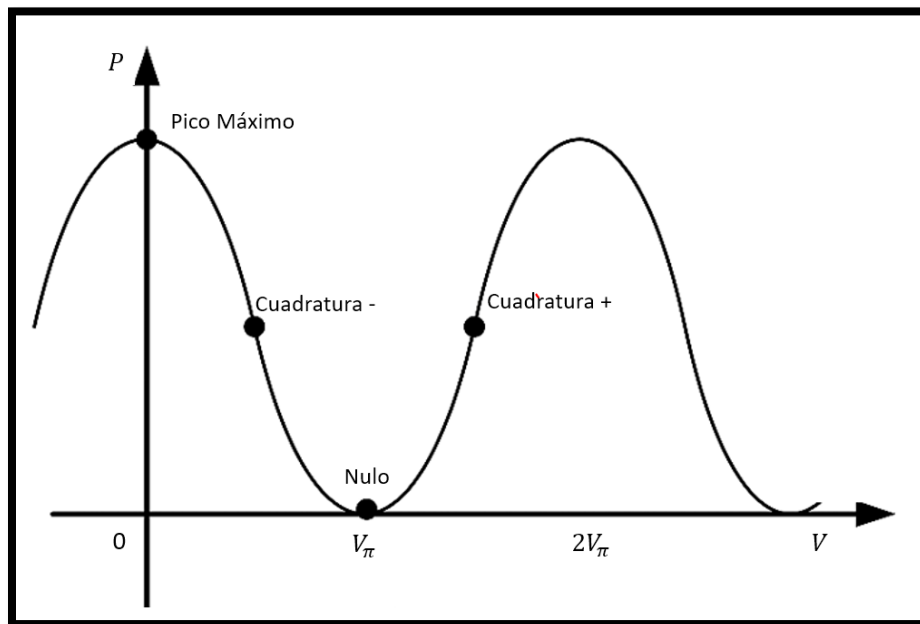
*Figura 2.4 Esquema físico interno de un Modulador Mach-Zehnder, utilizado en sistemas de modulación externa.*

Si bien es cierto que un modulador Mach-Zehnder (MZM) puede ser usado para modular en fase o frecuencia, en este trabajo se considera pertinente abordar la parte de modulación de intensidad a fondo debido a que es este tipo de configuración y funcionamiento del MZM es con el que se operó y desarrolló la herramienta computacional para llevar a cabo las simulaciones reportadas en este trabajo y que más adelante se detallarán. Un modulador óptico externo de intensidad, generalmente se logra con base en un MZM, como el ilustrado en la Fig. 2.4. Su estructura interferométrica es fundamental, ya que dentro del MZM la señal óptica es dividida en dos caminos mediante una unión “Y”. Cada uno de los 2 caminos ópticos sufre una modulación de fase distinta, de manera que al unirse nuevamente se logra un efecto de interferencia [1], este efecto puede tratarse de interferencia destructiva en caso de que las fases de ambas señales tengan una diferencia de  $\pi$ , resultando en una señal “0” o nivel bajo, o bien se puede tratar de una interferencia constructiva cuando ambas señales ópticas tienen la misma fase, resultando en una señal “1” o nivel alto.

La función de transferencia que describe el comportamiento de las señales a la entrada y la salida en correlación con el campo eléctrico externo aplicado  $V(t)$  es una función no lineal [12] sinusoidal:

$$\frac{|E_o|^2}{|E_i|^2} = \cos^2\left(\frac{\pi V(t)}{2 V_\pi}\right) \quad (9)$$

En esta expresión  $V_\pi$  es la diferencia de potencial requerida para que la señal de salida se lleve de un valor máximo a un valor mínimo o viceversa. La Figura 2.5 muestra el comportamiento de la expresión (9), donde se puede observar que el valor de  $V(t)$  está dentro de un rango (swing) que va de 0 a  $V_\pi$ , y es entonces que la variación de  $V(t)$  hará que la señal a la salida varíe a su vez entre el valor de entrada de la señal óptica y cero.



*Figura 2.5 Función de transferencia de un MZM donde se observan los puntos de configuración y los rangos para que este pueda funcionar bajo un régimen de cuadratura o bien bajo un régimen de punto nulo*

Una de las configuraciones más comunes a partir de la cual se puede diseñar, manipular o simular un MZM es la que se muestra en la Figura 2.6, en esta configuración existen en ambos caminos ópticos dos electrodos para poder manipular por separado la señal RF ( $V_{rf}$ ) y la parte de DC ( $V_{dc}$ ). Así mismo se puede tener un cierto control en la división “Y” o splitter, en este punto, cuando se trata de simulación (como es el de este trabajo),

es posible tener un acercamiento lo más cercano a un MZM real a través del valor de ER [12], esto se debe a que en un MZM nunca se puede tener una división de 50/50 exacta de la señal entre los dos caminos ópticos del modulador, pero sí se puede tener una aproximación muy cercana.

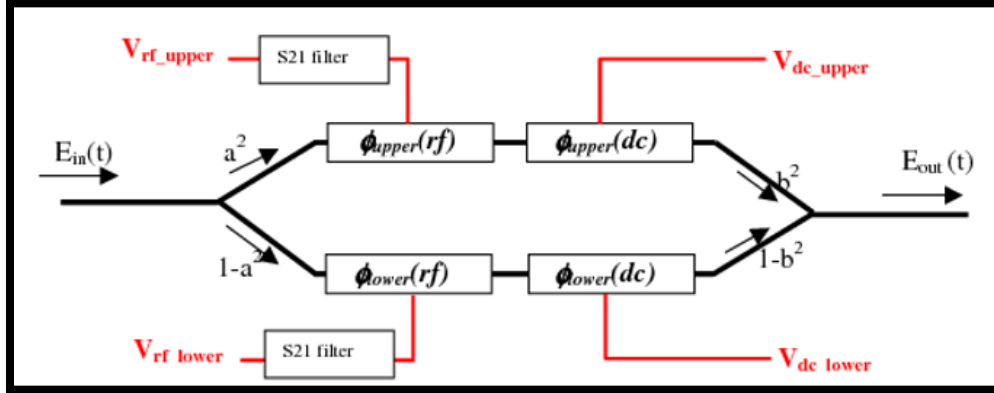


Figura 2.6 Esquema de funcionamiento de MZM utilizado en los simuladores virtuales como VPI, y el cual fue referencia para las simulaciones que fueron programadas y hechas en este trabajo de investigación. Disponible en VPIPhotonics: Modulator Differential MZ (Data Sheet Model)

La relación que existe entre la señal de campo eléctrico a la entrada  $E_{in}$  con la señal de campo eléctrico a la salida  $E_{out}$  está dada por:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) h(t), \quad (10)$$

Donde  $h(t)$  es la función de transferencia [21] del MZM y está definida como:

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{Y_{split_{up}} \exp(j\phi_{up}) + Y_{split_{down}} \exp(\pm j\phi_{down})}{Atenuación} \quad (11)$$

De esta expresión se encuentran los términos que corresponden a la fase de cada señal óptica en su respectivo camino óptico dentro del Mach-Zehnder:

$$\phi_{up} = \left[ \frac{\pi V_{rf_{up}}(t)}{V_{\pi_{rf}}} + \frac{\pi V_{dc_{up}}}{V_{\pi_{dc}}} \right] \quad (12)$$

Y

$$\phi_{down} = \left[ \frac{\pi V_{rf\ down}(t)}{V_{\pi\ rf}} + \frac{\pi V_{dc\ down}}{V_{\pi\ dc}} \right] \quad (13)$$

Los parámetros  $V_{\pi\ rf}$  y  $V_{\pi\ dc}$ , son los voltajes requeridos para ocasionar un desfase de 180 grados entre las dos señales ópticas que recorren por cada camino óptico del MZM, tanto para RF como para DC, respectivamente.

Como se mencionó previamente, la separación de la señal óptica, y que se convierte en dos señales ópticas divididas por el splitter, no mantiene una división exacta del 50 por ciento en cada uno de los caminos, no obstante, una muy buena aproximación para expresar el porcentaje de división de la señal por cada camino óptico en términos del campo, puede expresarse como:

$$Y_{split\ up} = a = \sqrt{0.5 + \varepsilon} \quad (14)$$

$$Y_{split\ low} = a = \sqrt{1 - a^2} \quad (15)$$

El término  $\varepsilon$  representa la diferencia entre los ER de los dos caminos ópticos del MZM. Por ejemplo, si se tuviera un MZM que lograra la división de la señal óptica en un 50/50,  $\varepsilon$  sería igual a 0, lo que permitiría tener un *extinction ratio* (ER) máximo infinito, sin embargo, los dispositivos reales Mach-Zehnder, no pueden tener divisiones perfectas de la señal óptica, lo que significa que el MZM tendrá un ER máximo finito; a esto se le conoce como el ER intrínseco del dispositivo [12]. En los dispositivos MZM típicos se suele contar con valores de ER entre los 30 [dB] y 40 [dB].

Para conocer la relación que tiene el ER con  $\varepsilon$ , partimos de que el ER es la razón entre la potencia óptica máxima y la potencia óptica mínima:

$$ER = \frac{P_{MAX}}{P_{MIN}} \quad (16)$$

Sin embargo, se puede hacer la aproximación de ER a la siguiente expresión, siempre y cuando se pueda asumir que  $\varepsilon \ll 1$ .

$$ER = \left(\frac{1}{\varepsilon^2}\right) \quad (17)$$

Ésta es entonces una aproximación que relaciona el ER con divisores imperfectos. Cabe destacar que el valor de ER en las expresiones anteriores no se encuentra en decibeles.

#### **2.4 Formatos Avanzados de Modulación de señales ópticas con detección directa**

La proliferación del uso intensivo de ancho de banda en servicios y cómputo en la nube ha conducido a que las tecnologías de las comunicaciones, y en particular, los sistemas ópticos de comunicaciones, busquen caminos para mejorar su desempeño, capacidad y al mismo tiempo reducir los costos que esto pueda representar. Un camino que se ha encontrado para poder mantener este progreso en los sistemas de comunicaciones ópticas ha sido por medio del desarrollo e implementación de formatos de modulación avanzados. A través de la implementación de formatos avanzados de modulación se ha podido lograr, entre otras cosas, un mejor aprovechamiento del ancho de banda, incrementando así la eficiencia espectral al incrementar al mismo tiempo las tasas de transmisión.

Existen múltiples formatos de modulación que son implementados en los sistemas de señales ópticas, estos pueden ser clasificados por múltiples condiciones, desde la variable o variables que son manipuladas para poder llevar a cabo la transmisión (intensidad, frecuencia, fase, polaridad), o bien el tipo de detección que se requiere para cierto formato (detección directa o detección coherente), o incluso el tipo de codificación o comportamiento que la señal llega a tener durante su variación (NRZ o RZ, por ejemplo). No obstante, a continuación, se hace una introducción a algunos de los formatos de modulación con detección directa más utilizados y con mayor promesa de uso (para las siguientes generaciones de redes ópticas como 100G o 400G) en las redes ópticas de alta capacidad. Los formatos de modulación con detección directa son el tipo de modulación con mayor demanda en la industria de las telecomunicaciones [13] debido a que el costo y complejidad de los sistemas de recepción es mucho menor a aquellos que

implementan detección coherente. Esta pequeña introducción a los formatos de modulación con detección directa más usados en los sistemas de señales ópticas, busca la creación de un punto de referencia para poder entender en el capítulo 3 de mejor manera las bondades que ofrece el formato de modulación polibinaria en los sistemas de señales ópticas.

#### 2.4.1 NRZ

El formato de modulación más simple de generar, y al mismo tiempo el más utilizado alrededor del mundo en los sistemas ópticos [14], es el formato Non-Return to Zero (No regreso a cero, NRZ). Este formato contiene un abecedario de dos símbolos: unos y ceros únicamente, y recibe este nombre puesto que la señal no regresa a un nivel bajo cuando se transmiten señales altas o “1” consecutivos, si se emiten dos “1” consecutivos, por ejemplo, la potencia óptica no retorna a cero, sino que se mantiene en estado alto hasta que exista un cero en la información a transmitir. El mantener la potencia óptica en cierto nivel sin haber transiciones de potencia en la señal a transmitir, como el caso de secuencias de varios “1” o varios “0” puede suponer un inconveniente y perder fácilmente la sincronización de los bits al no haber transiciones de potencia [15]. Este formato también es conocido como *On-Off Keying* (OOK), debido a que cuando la potencia óptica se encuentra en un punto alto se considera como una señal en “on” o “1”, y cuando se emite una potencia óptica a este bit se le denomina como “off” o “0”. La Fig. 2.7 muestra una secuencia de bits codificada en formato NRZ, así como otros ejemplos de modulación basada en OOK.

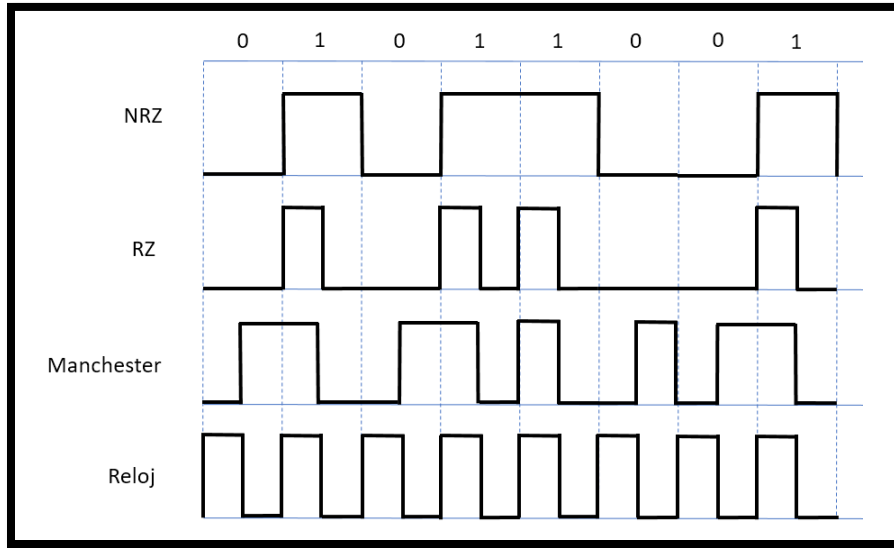


Figura 2.7 Formatos de modulación binaria más utilizados en las comunicaciones.

La eficiencia espectral del formato NRZ suele ser mejor dado que la no alternancia consecutiva de nivel de potencia óptica representa un ahorro en el ancho de banda, el valor de esta eficiencia es de 1 b/s/Hz [8]. Este formato, aunque es muy fácil de generar, tiene una gran desventaja contra las no linealidades que se pueden presentar en transmisiones de alta capacidad, ya que su espectro presenta un pico de potencia no deseable a la mitad de su espectro el cual favorecerá las no linealidades de la fibra en transmisiones cercanas a los 40 Gbps [16].

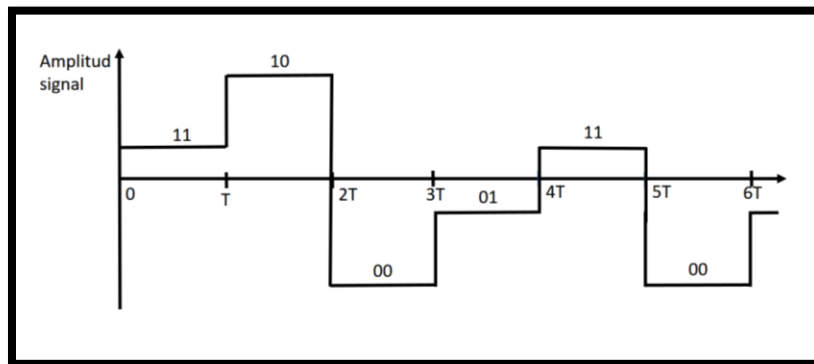
Al implementar una señal NRZ utilizando un Modulador Mach-Zehnder, se debe generar la señal eléctrica que contendrá la información a transmitir con un voltaje de pico a pico  $V_{\pi}$  [V] y con un valor medio que coincida con el 50% de la función de transferencia del modulador, a esto es a lo que se le conoce como la operación del MZM en cuadratura [8]. Ver Fig. 2.5. Existen registros [17] de transmisiones de señales ópticas NRZ por encima de los 40 Gbps a distancias cercanas a los 100 km, sin embargo, superar los 100 Gbps con este formato resulta muy complicado, en contraste con otros formatos de modulación que sí podrían alcanzar resultados similares sin los inconvenientes que NRZ presenta. Las principales limitaciones de este formato son: no linealidades, dispersión cromática, y ruido ASE [8].



### 2.4.1 Pulse Amplitude Modulation 4 (PAM-4)

Uno de los formatos de modulación avanzada más utilizados en la industria de las comunicaciones ópticas es PAM 4 [13], PAM 4 es una señal multinivel cuya base es el formato de modulación conocido como Pulse Amplitude Modulation (PAM). El formato PAM es un formato de modulación de intensidad del pulso y se le considera como uno de los formatos más simples tanto para transmitir como para recibir señales ópticas a través de fibra. Este formato se puede generar con un modulador MZM operando en cuadratura y recibir dicha señal por detección directa. El ejemplo más sencillo del formato PAM, es el formato NRZ-OOK, el cual no es otra cosa que PAM de dos niveles (PAM 2): “0” y “1”.

Con la implementación del formato M-PAM, el modulador puede transmitir  $M$  posibles niveles en la señal, tal y como se muestra en la Fig. 2.8. La tasa de transmisión que se encuentra en los sistemas M-PAM es de  $R_s = 1/T_s$ , donde  $T_s$  representa el periodo de un símbolo. El *bitrate* de este formato es entonces  $R_b = R_{sym} * \log_2 M$ , esto indica que, si se usa el formato de modulación M-PAM, el canal es capaz de transmitir a  $\log_2 M$  veces más rápido que un OOK. Sin embargo, los requerimientos para estabilizar la calidad de la señal a un cierto BER incrementarán con respecto al formato simple OOK [20].



*Figura 2.8 Señal PAM-4 en el dominio del tiempo. Nótese cómo en cada nivel, cada uno de sus símbolos contiene dos dígitos binarios.*

PAM 4 se trata entonces de una señal PAM de 4 niveles, estos 4 niveles contienen la información de dos bits de información cada uno: 00, 01, 10, 11. Se observa entonces que, una transmisión utilizando el formato PAM 4 tiene el doble de capacidad que una transmisión binaria simple (como NRZ), no obstante, esto tiene un precio. El voltaje adicional que se debe usar con PAM-4 reduce el nivel de espaciado entre niveles en un factor de 3 [21], por lo que hace a este formato mucho más susceptible al ruido (RIN

en este caso de señales ópticas). Esto explica por qué señales como PAM-8 o superiores contienen muchas más complicaciones para ser transmitidas. Sin embargo, a pesar de que hay muchos otros formatos de modulación que pueden duplicar o hasta triplicar la capacidad de transmisión, PAM-4 sigue siendo una de las preferidas debido a su simplicidad y su bajo consumo de potencia, siendo esta opción la más prometedora para técnicas de 100G y superiores [22]. En la Fig. 2.8 se muestra de manera esquemática una señal en formato PAM-4. En cada uno de los niveles se codifica un símbolo de dos bits.

Uno de los alcances más notables respecto a la modulación PAM 4, está en el impulso del estándar IEEE P802.3bs [23] el cual parece ser el camino definitivo hacia la estandarización de modulación de amplitud de pulso de cuatro niveles o bien, PAM-4, para la siguiente generación de transmisiones de 400 GbE sobre fibras de un solo modo (SMF). Hasta este punto se han definido tres clases de interfaces [24] para el alcance de dicha capacidad a distancias que van desde los 500 m hasta los 10 km sobre una longitud de onda de 1300 [nm]. Para operar sobre estas capacidades y reducir los costos de dichos alcances, la siguiente generación deberá desarrollar componentes innovadores, así como hacer más eficiente el uso de procesamiento avanzado de señales digitales [25].

#### 2.4.2 CAP

CAP (Carrierless Amplitude and Phase Modulation) u originalmente denominado como carrierless AM/PM fue propuesto por los laboratorios Bell Labs como una técnica de modulación multinivel y multidimensional viable para comunicaciones de alta capacidad en el año de 1975 [26]. CAP es un esquema de modulación en sistemas de comunicación digitales que puede ser considerado como una modulación de amplitud de pulso paso banda [27], en la cual la frecuencia de la portadora está muy cerca de la banda base. CAP tiene algunas similitudes con QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), sobre todo en su habilidad para soportar múltiples niveles de modulación en más de una dimensión. Sin embargo, en contraste con QAM, CAP no recae sobre una portadora, sino que utiliza filtros de longitudes de onda ortogonales para separar diferentes secuencias de información. Esto permite que CAP tenga dispositivos mucho más simples que QAM y con esto también alcanza una mejor eficiencia espectral.

Cuando se utiliza el formato CAP, la sincronización es muy importante para recuperar la información, lo cual en el formato de modulación CAP puede llegar a ser un inconveniente, ya que un apropiado tiempo de muestreo es difícil de obtener, lo que puede desencadenar en señales que se verán seriamente afectadas por la interferencia

intersimbólica y por intercomunicación cruzada (*Crosstalk*) entre los componentes en fase y en cuadratura. No obstante, ya que la distorsión ocasionada por ISI (*Intersymbol Interference*) o por intercomunicación cruzada es lineal, basta con un ecualizador adaptativo para recuperar la señal.

En los últimos años, CAP ha sido investigado principalmente en el ámbito de enlaces ópticos de corto alcance [11,13]. Uno de los aspectos más atractivos de la implementación de este formato de modulación yace en la habilidad del uso de filtros análogos para la generación de señales CAP, lo cual permite que en estos sistemas ópticos se cuente con un consumo bajo de potencia, lo que lleva a un menor impacto ambiental y económico. Recientemente [28] se han propuesto sistemas CAP que han mostrado tener alcances de 100 y 102.4 Gbps sobre fibra SMF desde 500 m hasta los 15 km con láseres directamente modulados tanto por el ámbito de simulación como por el experimental.

## Referencias

- [1] R. Gutiérrez Castrejón (2016). Notas del curso Sistemas Ópticos de Alta Velocidad. UNAM.
- [2] K. Gerd. (2000). *Optical Fiber Communications*, 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw-Hill, Singapore.
- [3] Macho Ortiz, A. (2013). *Comunicaciones Ópticas de Banda Ancha con Fase Modulada: Estudio de la degradación de la señal óptica*, Proyecto fin de carrera, Tutora: Paloma Rodríguez Horche. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Fotónica y Bioingeniería, 2013.
- [4] Pereda, J.A.M (2004). *Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones*. Pearson Educación. 2004
- [5] Govind, P.A. (2002). *Fiber-optic communication systems*. John Wiley, New York
- [6] Martin, E.M (2010). *Análisis de Sistemas de Comunicaciones Ópticas de Alta Velocidad que emplean Láseres Modulados Directamente*, Proyecto fin de carrera, Tutora: Paloma Rodríguez Horche. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Fotónica y Bioingeniería, 2010.
- [7] D. Noguchi (2016) *et al.*, *Wide Temperature Range Operation of 25.8 Gbit/s Uncooled Direct Modulated Laser (DML) TOSA With Extremely High Eye Mask Margin*. 2016 *IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, Las Vegas, NV, 2016, pp. 1093-1098.
- [8] Govind, P.A. (2002). *Fiber-optic communication systems*. John Wiley, New York
- [9] Winzer, Peter. Essiambre, René-Jean (2006). *Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks*. *Journal of Lightwave Technology* Vol. 24. No. 12. December 2006
- [10] Walkin, Sheldon (1997). *Multilevel Signaling for increasing the Capacity of High-Speed Optical Communication Systems*. University of Alberta.
- [11] Xu, X., Zhou & E., Ning Liu, G. *Advanced Modulation Formats for 400-Gbps short-reach optical inter-connection*. *Optics Express* 492. Jan 2015.
- [12] A. Yariv (1985). *Optical Electronics*. 3<sup>rd</sup> Edition, CBS College Publishing, N.Y., ch. 13, pp. 437-452, 1985.
- [13] Tao, Li. & Ji, Y. & Liu, J. & Pak Tao & A., Chi & N. Lu, C. *Advanced Modulation Formats for Short Reach Optical Communication Systems*. *IEEE Ntetwork*. December 2013.

- [14] Aihan, Y. & Li, L. & Xynliang, Z (2010). *Analysis of Modulation Format in the 40 Gbps Optical Communication System*. In Optik 121. pp 1550-1557. Institute of Optoelectronics Science and Engineering Huazhong University of Science and Technology. China 2010
- [15] Bateman, A (2003). *Comunicaciones Digitales, Diseño para el Mundo Real*. Marcombo.
- [16] Winzer, P.J. & Essiambre, R.J. *Advanced Optical Modulation Formats*". In *Optical Fiber Telecommunications*. ISBN: 978-0-12-374172-1. 2008.
- [17] Veith, G., Lach, E. and Schuh, K (2008). *100 Gigabit-per-second: Ultra-high transmission bitrate for next generation optical transport networks*. In C.R. Physique, vol 9. Pp. 1002-1011, 2008.
- [18] Ivan P. Kaminow & Tingye Li & Alan E. Willner. *Optical Fiber Telecommunications VIA: Components and Subsystems*. Sixth ed. Elsevier.
- [19] Szczerba, K. & Westbergh, P. & Karout, J. & Gustavsson, J. & Haglund, A., Karlsson, M. & Andrekson, P. & Agrell, E. & Larsson, A. (2012). *4-PAM for High-Speed Short-Range Optical Communication*. Opt. Commun. Netw. Vol. 4, No. 11 November 2012
- [20] Way, W. PAM-4: A Key Solution for Next-Generation Short-Haul Optical Fiber.
- [Online] Disponible: <https://www.neophotonics.com/pam-4-key-solution-next-generation-short-haul-optical-fiber-links/>
- [21] "IEEE P802.3bsTM/D1.2 Draft Standard for Ethernet Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers and Management Parameters for 400 Gb/s Operation," 2016.
- [Online] Disponible: <http://www.ieee802.org/3/bs/>
- [22] "IEEE P802.3bsTM/D1.2 Draft Standard for Ethernet Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers and Management Parameters for 400 Gb/s Operation," 2016.
- [Online] Disponible: <http://www.ieee802.org/3/bs/>
- [23] Eiselt, N. & Griesser, H. & Wei, J., Hohenleitner, R. & Dochhan, A. & Ortsiefer, M. & Eiselt, M. & Neumeyr, C. & Vegas Olmos, J. & Tafur, I. (2017). *Experimental Demonstration of 84 Gb/s PAM-4 over up to 1.6 km SSMF Using a 20GHz VCSEL at 1525nm*. Journal of Lightwave Technology.
- [24] D. Falcooner (1975), *Carrierless AM/PM*. in Bell Laboratories Technical Memorandum.

- [25] Miguel Iglesias Olmedo et al., *Multiband Carrierless Amplitude Phase Modulation for High Capacity Optical Data Links*. J. Lightwave Technol., Vol. 32, Issue 4, pp. 798-804, Feb. 2014
- [26] H. Ochi and S. Sasaki, "Feasibility study of 100G Ethernet with carrierless amplitude and phase modulation," *2016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS)*, Niigata, Japan, 2016, pp. 1-3.
- [27] J. D. Ingham (2012) et al., *40 Gb/s Carrierless Amplitude and Phase Modulation for Low-Cost Optical Datacommunication Links*. Proc. OFC/NFOEC , Los Angeles, USA, paper OThZ3, Mar. 2012
- [28] L. Tao (2013) et al. *Experimental Demonstration of 10 Gb/s Multi-level Carrierless Amplitude and Phase Modulation for Short Range Optical Communication Systems*. Optics Express, vol. 21, no. 5, Mar. 2013, pp. 6459-65.

---

## *Capítulo 3: Modulación Polibinaria*

---

Dentro del ámbito de los sistemas de comunicaciones ópticas, el formato de modulación con mayor recurrencia de implementación es el formato NRZ. Este formato es el más utilizado debido a que requiere un bajo costo económico de implementación, al mismo tiempo que implica una baja complejidad en su operación, principalmente en la etapa referente a la recepción de la señal emitida. Sin embargo, este formato cuenta con muchas deficiencias y vulnerabilidades que limitan los alcances y el aprovechamiento propios de los sistemas de comunicaciones ópticas. Las principales deficiencias que presentan las señales ópticas bajo el formato de modulación NRZ son: su alta vulnerabilidad ante distorsiones de la señal ocasionadas por la dispersión cromática y el bajo aprovechamiento espectral que ofrecen las transmisiones bajo dicho formato.

Para lograr explotar los beneficios y ventajas que ofrecen las comunicaciones por señales ópticas a través de fibra, se ha recurrido a la implementación de formatos avanzados de modulación, los cuales, a diferencia de un formato binario simple como lo es NRZ, pueden ofrecer un mejor aprovechamiento espectral y baja vulnerabilidad ante distorsiones ocasionadas por dispersión cromática o por efectos no lineales propios de la fibra. Así mismo, estos formatos de modulación avanzada se pueden implementar en sistemas DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) [1], alcanzando así mayores capacidades de transmisión que pueden ofrecer únicamente los sistemas de transmisión de señales ópticas. Dentro de los formatos de modulación avanzada más utilizados en sistemas de señales ópticas, se encuentran CAP (Carrierless Amplitude Phase Modulation), DMT (*Discreet Multitone Modulation*) y PAM-4 (Pulse Amplitude Modulation). La implementación de estos formatos avanzados representa hoy en día una obligación más que una simple opción para aquellos que requieran del uso de enlaces por fibra óptica de altas capacidades, lo anterior con el fin precisamente de tener comunicaciones ópticas con mayor capacidad de transmisión, mayor aprovechamiento del espectro óptico, menor cantidad de dispositivos dedicados a la amplificación y/o regeneración de la señal óptica a lo largo del trayecto entre transmisor y receptor, etc. Actualmente los formatos de modulación avanzada están siendo cada vez más requeridos tanto en enlaces de corto alcance [2], como en enlaces de largo alcance [3,4].

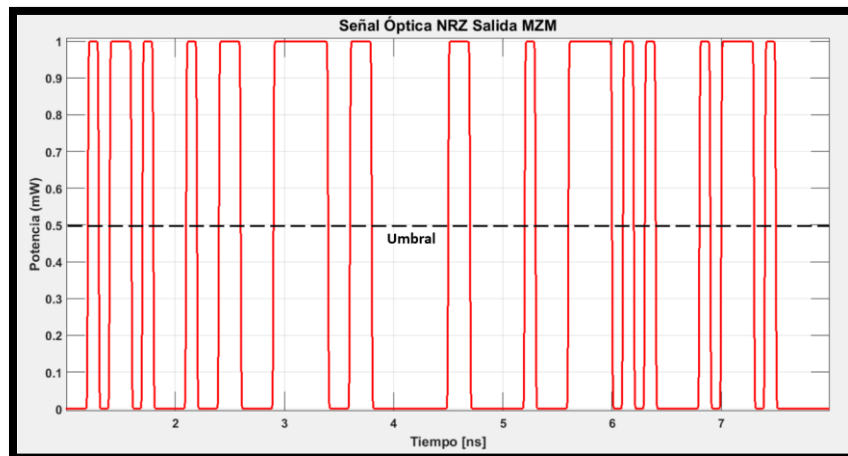
Los formatos de modulación que implementan codificación correlativa de nivel (*Correlative Level Coding*) son formatos que han sido analizados [5] por la robustez que presentan ante efectos de distorsión por dispersión cromática, así como por su alto aprovechamiento del espectro óptico [6]. Los principales formatos de modulación que

utilizan esta técnica de codificación son los formatos de modulación óptica polibinaria. Las señales polibinarias, son señales multinivel que brindan ventajas considerables ante efectos de distorsión por dispersión, al mismo tiempo que son señales cuyo espectro es mucho más estrecho que una simple señal NRZ. No obstante, las señales polibinarias hoy en día no han sido consideradas como una seria respuesta ante la necesidad de implementar formatos de modulación de señales ópticas que otorguen mejores desempeños y altas capacidades de transmisión competentes en el mundo actual, en donde la demanda de intercambio de información es fundamental. Aun así, no se puede decir que este tipo de modulación ha sido descartada totalmente, ya que actualmente el formato de modulación polibinaria que se llega a encontrar con relativa facilidad es la señal duobinaria [7]. Esta señal, es una señal polibinaria con únicamente 3 niveles de amplitud. Dicho formato de modulación será nuestro punto de partida dentro del presente capítulo para poder adentrarnos con mayor facilidad en el área de las señales polibinarias.

### **3.1 Señales con codificación de correlación entre niveles**

El método de transmisión de datos más común alrededor del mundo es la transmisión de datos por medio de señales binarias, una transmisión binaria es simple y llanamente la emisión de bits o pulsos que pueden tener únicamente uno de dos valores en amplitud (unos o ceros), la duración de estas señales es de un tiempo dado  $T$  y su velocidad o frecuencia de emisión es entonces  $1/T$ . El receptor de este tipo de señales debe ser capaz de detectar cuál de los dos posibles estados es el que se presenta en el tiempo adecuado de la recepción de la señal. La distinción entre los dos distintos valores, se debe emplear a partir de un umbral de decisión que ayude a saber si el valor se encuentra por encima de este o por debajo, y de esta manera saber si la señal binaria recibida se trata de un “1” o un “0”. Un ejemplo de un tipo de señal binaria se muestra en la Figura 3.1





*Figura 3.1 Señal binaria (formato de modulación NRZ) con un umbral de decisión para la diferenciación de los niveles de amplitud*

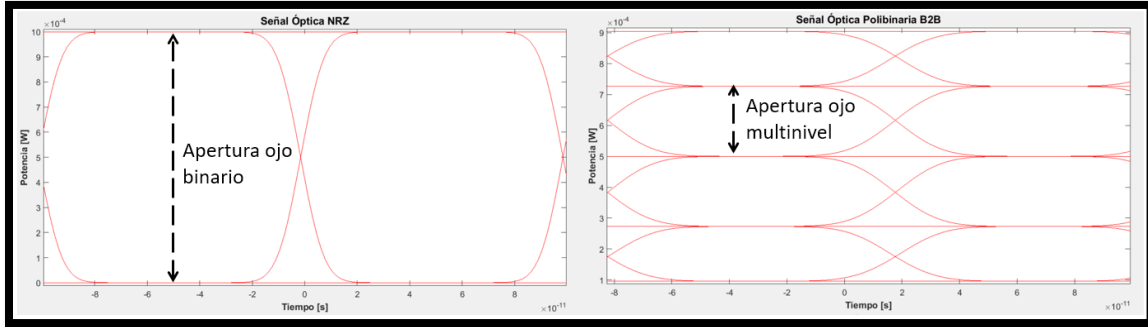
La señal binaria, como su nombre lo indica, consta únicamente de la posible detección de un dígito binario a cada tiempo de muestreo. En la mayoría de los casos de transmisión de señales ópticas, el medio por el cual se envía esta información es un medio de canal de banda limitada, luego entonces, una señal binaria transmitida por un medio de esta índole se encuentre lejos de alcanzar el mejor aprovechamiento del ancho de banda con el que se cuenta, este tema es de suma importancia para lograr transmisiones de señales ópticas de alta capacidad.

La distorsión que llega a sufrir una señal óptica con comportamiento binario es en general muy grande. Entre los factores principales que ocasionan efectos de distorsión de la señal en las transmisiones ópticas a través de fibra, se encuentran: la dispersión cromática, la atenuación y factores no lineales, principalmente. Todos estos efectos llegan a aportar en alguna medida a la distorsión total de la señal; sin embargo, para contrarrestar estos efectos se debe tener cuidado del manejo de ciertos parámetros dentro de la operación de la transmisión de la señal para que dicha distorsión sea mínima. Uno de estos parámetros es la tasa de transmisión [8]. Si no se procura una tasa de transmisión adecuada se puede presentar ISI a distancias muy cortas de la fibra. Por ejemplo, imaginemos que la dispersión cromática la podemos descartar en una transmisión de señales ópticas por fibra SMF, aun así, existe un límite en la máxima tasa de transmisión posible, ya que, de acuerdo a Nyquist [9], existen dos criterios a evadir para que no se presente la interferencia ISI:

- a) Todos los pulsos deben estar igualmente separados un tiempo  $T$  para asegurar que, en el tiempo de muestreo adecuado, sólo uno de los pulsos presente un valor máximo, y los pulsos precedentes presenten una amplitud de cero.
- b) Los tiempos de transición deben ser igualmente condicionados para asegurar una apertura óptima en el diagrama de ojo de las señales.

En las señales ópticas multinivel, el deterioro en la calidad de la señal debido a la dispersión cromática o a la atenuación, se presenta [10] en una escala mayor en comparación con la distorsión que se presenta en las señales binarias. Una manera de corroborarlo y analizarlo es, por ejemplo, mediante los diagramas de ojo.

En los diagramas de ojo de una señal multinivel se puede observar que la apertura intrínseca entre sus niveles es menor que en el caso de señales binarias generadas a partir de la misma fuente óptica, esto significa que las afectaciones que puedan llegar a existir en el camino de la propagación de la señal óptica, tendrán un mayor impacto en la calidad de la señal en comparación con las que se presentarían en una señal con solo dos niveles. Por ejemplo, en el caso de una señal PAM-4 se cuenta con 4 niveles distintos de amplitud siendo el nivel de máxima amplitud correspondiente a la amplitud máxima de la señal óptica, esto conlleva a que cada uno de los 4 niveles estén más próximos entre sí en comparación con una señal que cuenta con sólo 2 niveles (NRZ, por ejemplo). Con lo anterior, la afectación debido a distorsiones en la señal multinivel impacta de manera muy significativa [4], esto se puede observar en los ojos de un diagrama de una señal multinivel donde son más pequeños en amplitud que en una señal binaria, con ello, el impacto en las transiciones y especialmente las existentes entre los valores extremos, será más grave [11], esto debido a que el rango de decisión entre niveles se reduce significativamente. Lo anterior da lugar a que las distorsiones ocasionen un daño mayor en la calidad de la señal multinivel. Un ejemplo de lo anterior se ilustra en la Figura 3.2 en donde se compara la diferencia de apertura que existe entre un ojo en un diagrama de una señal óptica binaria (NRZ) y la apertura de un ojo de una señal multinivel, el cual en este caso se trata de una señal polibinaria de 5 niveles, sobre la cual se ahondará más adelante.



*Figura 3.2 Apertura de ojos de señales ópticas de cinco niveles y de dos niveles, respectivamente. Nótese que ambas señales tienen la misma potencia máxima en su nivel con mayor amplitud.*

En comparación con las señales multinivel más comunes, en las señales con codificación de correlación, su energía se logra redistribuir de tal manera que la gran mayoría de ésta se concentra en las frecuencias más cercanas a la frecuencia de la señal portadora [11]. Este efecto ocasiona que la dispersión cromática tenga un impacto mínimo, resultando en una señal mucho más resistente a este tipo de distorsión. Por otro lado, con este tipo de codificación, se logra que sólo se lleven a cabo transiciones entre niveles de amplitud adyacentes [12], lo que resulta en que la ISI se presente en una escala mucho menor que en los sistemas multinivel comunes.

Las señales multinivel más comunes suelen tener la característica de no tener correlación entre sus niveles. La presencia de correlación entre los niveles de una señal multinivel implica un proceso de codificación en la sección de transmisión, donde cada posible combinación de un grupo de  $n$  dígitos binarios está asociado con uno y sólo un nivel de la señal en particular, esto se puede ver de manera más clara en la figura 3.3. Con lo anterior se considera que una señal multinivel que cuenta con codificación de correlación, es menos propensa a la generación y propagación de errores. En las señales con codificación de correlación entre sus niveles, cada dígito binario puede estar asociado con uno o más niveles determinados de la señal multinivel [13] y al mismo tiempo la elección de un nivel en particular depende del comportamiento anterior de la señal misma. No obstante, en el receptor, cada uno de los niveles puede estar asociado con un dígito binario sin la necesidad de saber el pasado de la señal emitida. Esta propiedad es entonces de suma utilidad para poder detectar errores sin la necesidad de introducir información de redundancia en el transmisor.

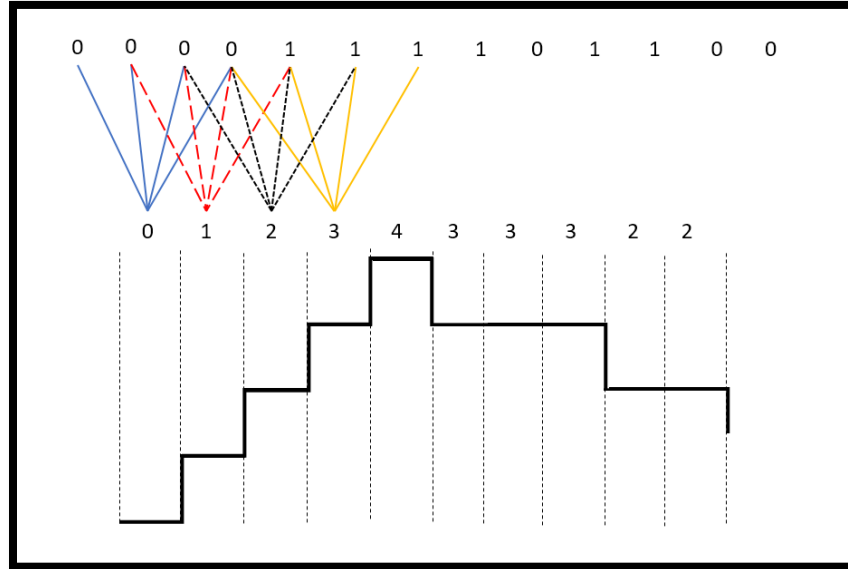


Figura 3.3 Los primeros bits se agrupan en secciones de 4, estos grupos dan lugar a un nuevo valor a través de cierta codificación para tener correspondencia con el valor del nivel de la señal que cuenta con un total de 5 niveles.

La generación de señales con correlación entre sus niveles permite sobre todo un mayor aprovechamiento del espectro [14]; de esta manera, es posible una redistribución de la energía con el fin de concentrar la mayoría de esta en las frecuencias cercanas a la portadora o, alternadamente, eliminar cierta cantidad de energía en algunas otras frecuencias.

Las relaciones expresadas en (18) y (19) representa los dos pasos esenciales para la generación de secuencias con codificación de correlación a partir de una secuencia de información binaria, donde  $a_k$  es la señal binaria original,  $b_k$  es la señal resultante de la primera codificación y  $c_k$  es la señal con correlación multinivel ya codificada, el índice  $k$  indica cada valor binario dentro de la secuencia y  $\oplus$  representa una operación XOR. La codificación para la obtención de señales con codificación de correlación entre niveles es la base para la generación de señales polibinarias, como se describe más adelante.

$$b_k = a_k \oplus b_{k-1} \oplus b_{k-2} \oplus \dots \oplus b_{k-(b-2)} \quad (18)$$

$$c_k = b_k + b_{k-1} + b_{k-2} + \dots + b_{k-(b-2)} \quad (19)$$

Por ejemplo, supongamos que se quiere transmitir una señal A binaria que será codificada en una nueva señal B, la cual cuenta con b niveles, numerados secuencialmente desde 0 hasta b-1 comenzando por el nivel más bajo. De estos niveles, aquellos que se encuentre numerados como pares representarán un 0, en cambio, los niveles impares de la señal representarán un valor de 1. Cabe destacar que, en ambas señales, tanto el mensaje original como la secuencia codificada contarán con bits de duración de T segundos.

Una señal binaria A es transformada en una señal multinivel con codificación de correlación B en dos pasos. En el primer paso, A se convierte en una secuencia binaria de unos y ceros B, de tal manera que en B un grupo de (b-1) dígitos consecutivos representan un dígito original de A, si este grupo de B contiene un número impar de 1, el valor original que representan es entonces 1, de otra manera el grupo representa un 0. Cabe mencionar que ambas señales, tanto A como B, tienen la misma tasa de transmisión.

Por ejemplo, en la Figura 3.4 a) se indica la correlación existente entre los bits de B en un mensaje codificado a partir de una señal A. B se genera a partir del supuesto de la generación de una señal multinivel de 3 niveles, por lo que, de cada grupo de 2 bits de B, representan un bit de A, a partir de la relación de la operación binaria módulo 2.

Otro ejemplo más complejo, es el que se muestra en la *Figura 3.4*, donde se ilustra un mensaje codificado B: 00001001101111; el cual fue generado con el propósito de dar lugar a una señal multinivel de 5 niveles. La secuencia B al agruparse en elementos de 4 bits, cada uno de estos grupos representa a un bit de la señal original A. El primer dígito de A (a1 o primer bit, cuyo valor es 0), está correlacionado con los bits b1, b2, b3, b4 (0,0,0,0), cuyo resultado de aplicar una operación binaria XOR es 0. Para a5 (quinto bit de A), los bits a los cuales se le implementa la operación XOR o módulo 2 y dar lugar a su correlación son: b5, b6, b7 y b8 (1, 0, 0, 1); y así consecutivamente se pueden ir correlacionando los dígitos de A con los grupos de B.

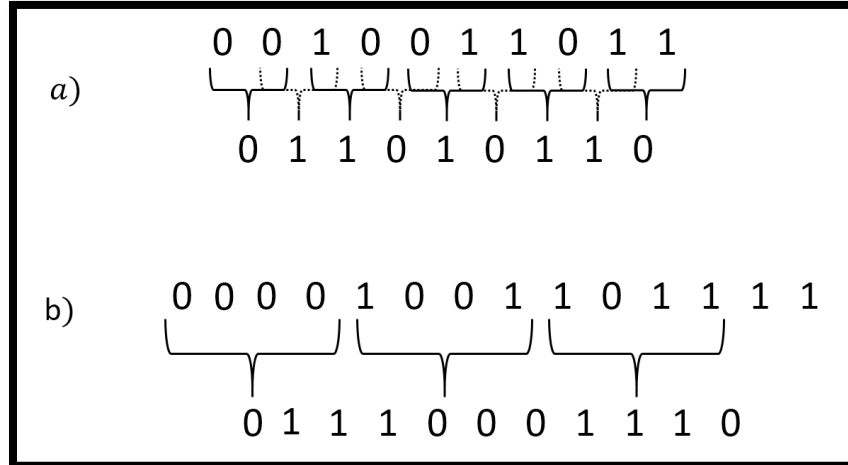


Figura 3.4 En a se muestra cómo los pares de número binarios pueden dar a lugar a otro número mediante la correlación que se genera con la operación módulo 2. En b se observa la correlación de bits con grupos de 4 bits con correlación mediante módulo 2.

En la segunda etapa en la codificación de correlación entre niveles, la secuencia B se transforma en una señal de b niveles que denominaremos como C, tal y como se expresa en la ecuación (19). La generación de dicha señal de b niveles se obtiene a partir de la suma de grupos de b-1 elementos consecutivos de la propia secuencia B. En esta etapa sólo aportan a la suma aquellos dígitos que tengan un valor binario de 1, siendo entonces que el mayor valor posible de la suma será de b-1 y el menor valor será de 0. Lo anterior es la etapa vital en que se obtiene una señal multinivel de b niveles. Cabe hacer mención que en la señal multinivel C, se enumera los niveles desde cero hasta b-1 a partir del nivel más bajo hacia el más alto, de esta manera se relaciona que aquellos niveles que tengan un número o valor par, estarán correspondidos con bits del mensaje original cuyo valor binario es cero, y aquellos que tengan una numeración o valor de nivel impar, estarán asociados con bits del mensaje original cuyo valor es uno. Se interpreta entonces que, para la recuperación de la señal original a partir de una señal multinivel generada a partir de una codificación de correlación de multinivel, no se requiere más que una operación de módulo 2 a cada valor asociado a los niveles de la señal multinivel. Un ejemplo gráfico de la codificación de una señal binaria en duobinaria (o polibinaria de tres niveles) se ilustra en la Fig. 3.5.

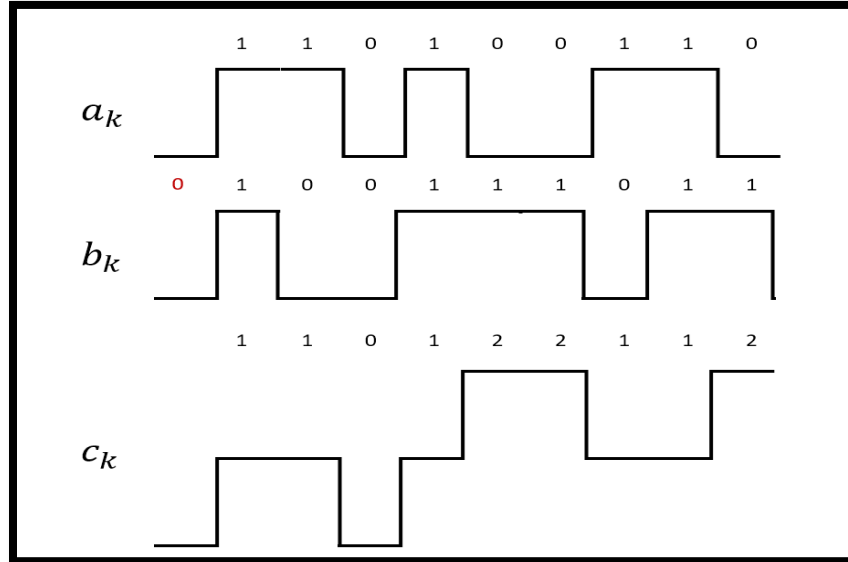


Figura 3.5 Pasos de la codificación de una señal binaria hacia otra señal binaria con codificación  $b$  y posteriormente a una señal multinivel con codificación de nivel: duobinaria (polibinaria  $b=3$ )

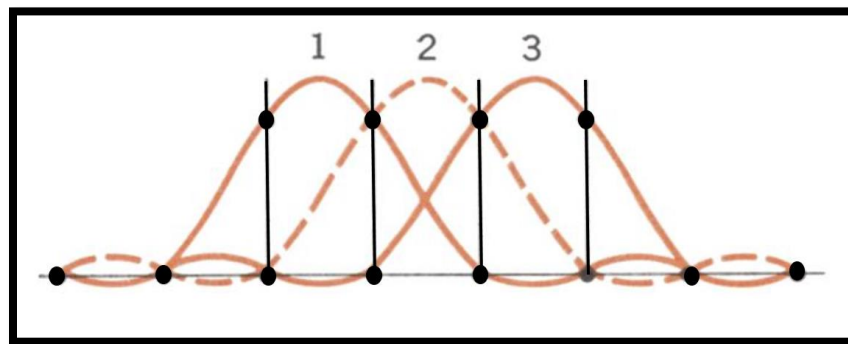
### 3.2 Modulación Duobinaria

La modulación duobinaria es una señal polibinaria de 3 niveles, esta da lugar a una señal multinivel con codificación de correlación entre sus 3 niveles de amplitud. El proceso para la obtención de una señal duobinaria [11] parte de una técnica de codificación de correlación de nivel entre tres niveles ( $b=3$ ). El prefijo dúo, utilizado para denominar a este tipo de formato de modulación de señal indica que la señal le caracteriza una capacidad del doble en comparación de un sistema binario simple. La característica más llamativa de un sistema duobinario está en el ancho de banda que utiliza, este se puede reducir en una relación de dos a uno con relación al ancho de banda que utiliza una señal binaria, o bien, si la señal duobinaria utiliza el mismo ancho de banda que la señal binaria, la señal duobinaria podrá tener una capacidad de transmisión del doble de bits por segundo [10]. Si se compara cada señal duobinaria con una señal multinivel sin codificación de correlación (por ejemplo, una señal PAM-4), resulta que para que la segunda tenga la misma capacidad de una señal duobinaria, la señal multinivel necesitaría utilizar 4 niveles con palabras de dos dígitos binarios en cada uno de ellos, a diferencia de una señal duobinaria en donde cada uno de los niveles tiene una relación con uno y sólo un dígito de la señal original binaria.

Una de las características importantes dentro de la generación de las señales polibinarias, yace sobre el uso de un filtro eléctrico analógico pasa bajas, con el cual, dado sus características de comportamiento lineal [15], es posible la generación de las

señales multinivel en la etapa de suma de los pulsos binarios (19). Este filtro además de realizar la suma de valores, otorga una reducción en el ancho de banda de la señal.

Para entender un poco mejor el funcionamiento de un filtro necesario para la generación de una señal multinivel con correlación, supongamos que, tenemos la transmisión de 3 pulsos binarios a una tasa dada de 2 veces  $t$  Gbps, sin que exista ISI alguno entre los pulsos; no obstante, a estos pulsos se les hace pasar a través de un filtro lineal analógico pasa bajas con un ancho de banda menor a  $t/2$ , de tal forma que a la salida del filtro, los pulsos ya no ocupan un espacio temporal independiente sino que el filtro tiene la característica de sobreponerlos en un espacio temporal menor, de tal manera que se genera una suma de los pulsos en las regiones donde coinciden temporalmente. Este proceso da lugar a una señal multinivel a partir de una señal eléctrica binaria. Es por este hecho que el uso de un filtro eléctrico analógico pasa bajas es de vital importancia para la generación de señales duobinarias (o en general, para señales polibinarias). Como se muestra en la Figura 3.6, a partir de 3 pulsos cuyos niveles de amplitud son 1 y 0, y que son transmitidos a una velocidad de  $t$  gbps, tras pasar por un filtro pasa bajas de comportamiento lineal con un ancho de banda menor a  $t/2$ . Por ejemplo, se puede generar una señal multinivel de 3 niveles de amplitud: 0 (en el tiempo en que ningún pulso este presente), 1 (en el tiempo en que sólo uno de los pulsos tenga presencia) y 2 (en el tiempo en que a consecuencia del filtro se “sobrepongan” 2 pulsos binarios).



*Figura 3.6 Tras el paso de la señal por un filtro pasa bajas con propiedades de comportamiento lineal, se puede dar paso a la generación de señales multinivel a partir de señales binarias (2 niveles)*

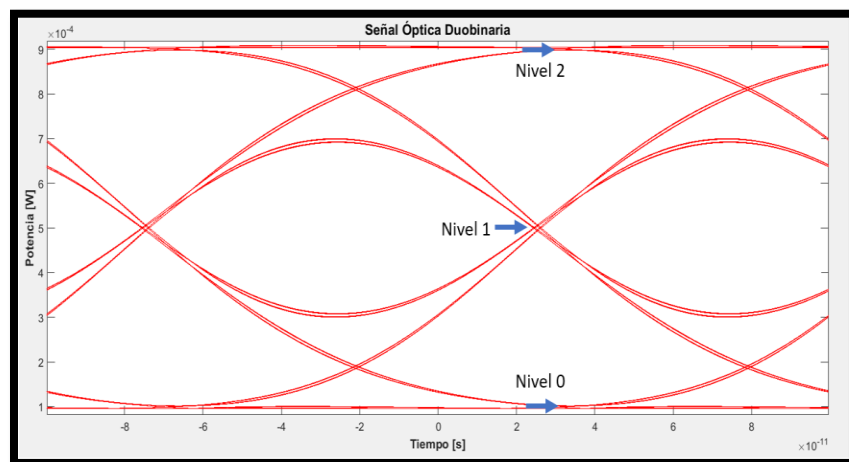
Tomando como referencia la Figura 3.5, la señal C (una vez ya codificada y filtrada) indica que, a partir de las propiedades de correlación, y para considerar una recuperación adecuada de la señal original, los niveles  $b$  deben ser numerados consecutivamente desde 0 hasta el nivel superior  $b-1$ , de esta manera todos los niveles que posean un numerador impar representan un valor de 1 lógico, mientras que los niveles que aquellos que posean un numerador par, representan el valor de un 0 lógico, de esta manera la recuperación de la señal original se dará adecuadamente. No



obstante, la codificación de correlación entre niveles que contiene una señal duobinaria, lleva consigo una serie de propiedades predeterminadas [14], como, por ejemplo:

- La existencia de secuencias de unos consecutivos sólo se dará en alguno de los niveles extremos (nivel 0 o nivel 2) asociados a dicho valor binario.
- Si a esta secuencia le sigue una cantidad par de ceros en el nivel medio, los siguientes unos tendrán la misma polaridad que los anteriormente emitidos.
- En caso contrario, si los ceros (o pulsos en nivel medio) son en una cantidad impar, los siguientes unos se encontrarán en el nivel opuesto al que se presentaban los unos anteriores.

Un diagrama de ojo de una señal duobinaria se genera a partir de la superposición en el tiempo de la señal C. En un diagrama de ojo duobinario, como es el caso de la Figura 3.7, es posible observar donde están colocados los 3 niveles distintos de amplitud.



*Figura 3.7 Diagrama de ojo de una señal duobinaria de 3 niveles operando a 10 Gb/s, donde se observan marcados los 3 niveles que son detectados en el tiempo adecuado de muestreo.*

Uno de los resultados importantes de la transformación de la señal desde el mensaje A hacia la señal multinivel C, es la redistribución de la densidad espectral, la cual al final de la etapa C se encuentra altamente concentrada en las frecuencias cercanas a la de la señal portadora. Cabe señalar que, el proceso desde el punto A hacia el punto C para la generación de las señales duobinarias, se encuentra dentro del dominio eléctrico.

La generación de la señal duobinaria óptica se da a través del uso de un modulador externo electro-óptico MZM [16], éste genera la señal con modulación duobinara en el dominio óptico a partir de la entrada de una señal proveniente de un láser de onda continua (CWL; señal a modular) por un lado, y por el otro una señal con codificación duobinaria en el dominio eléctrico (señal moduladora). La modificación de la señal óptica CWL se realiza a partir de la señal duobinaria eléctrica antes descrita. Esta señal eléctrica duobinaria tendrá la función de modificar el índice de refracción de uno de los cristales electroópticos localizado en uno de los 2 caminos ópticos del MZM, obteniendo como consecuencia de esto, la adecuada modulación de la señal CWL.

En el trabajo que se presenta se logró la generación de dos distintas señales ópticas con modulación duobinaria, la diferencia en la generación de estas señales yace en el modo de operación del MZM.

El MZM se operó tanto en la configuración de cuadratura como en la configuración de punto nulo [16] (también llamado este último como *Maximum Extinction Ratio* [17]), dando lugar a señales duobinarias cuya principal distinción entre ellas es que con la primera configuración se logra la generación de una señal óptica duobinaria de 3 niveles, mientras que con la segunda configuración se logra la generación de una señal óptica duobinaria de únicamente 2 niveles. El análisis a fondo de los parámetros tanto de comportamiento como de desempeño entre este tipo de señales duobinarias se desglosan en el capítulo 4.

Las señales duobinarias ópticas, no importa si se trata de 3 o 2 niveles, tienen como etapa inicial la generación de una señal duobinaria de 3 niveles en el dominio eléctrico, cuyo proceso se describió con anterioridad y se ilustra en la Figura 3.5. En resumen, la señal duobinaria en el dominio eléctrico es aquella que se tomará como la señal de entrada a uno de los caminos ópticos del MZM y donde se controlará el componente electro-óptico del MZM con el fin de generar una modulación en la señal óptica de onda continua. Dicha modulación o modificación de la señal óptica dependerá completamente de la región de operación de la función de transferencia del MZM, como se describirá a continuación.

### **3.2.1 Señales ópticas duobinarias de 3 niveles**

El proceso de generación de una señal óptica duobinaria de 3 niveles de amplitud, es a partir de una señal duobinaria en el dominio eléctrico y dicho proceso está representado en la Figura 3.8.

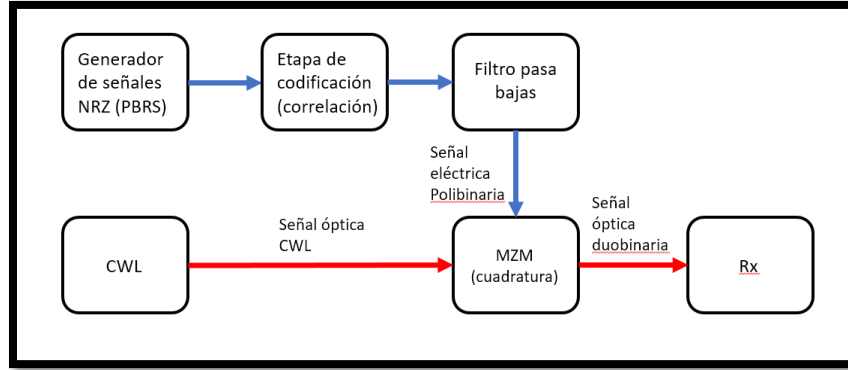


Figura 3.8 Representación esquemática del sistema de generación de señales duobinarias de 3 niveles.

Para la generación de una señal duobinaria de 3 niveles, es necesario que el MZM a utilizar se encuentre operando en la configuración denominada como cuadratura, esto quiere decir que el rango de voltaje de la señal moduladora entrante (señal duobinaria en el dominio eléctrico) se encuentre dentro de la región de comportamiento lineal de la función de transferencia del MZM. La función de transferencia resultante de la configuración del MZM utilizado en este trabajo, se muestra en la Figura 3.9. Se puede observar que la región lineal más conveniente a utilizar está dentro del rango de 2.5[V] hasta 5[V], dado que en estos extremos se encuentra el nivel de amplitud en potencia mínimo y el nivel máximo, teniendo a su vez la relación entre la entrada de un valor mínimo de la señal moduladora eléctrica con un valor de potencia óptica mínimo, así como la entrada de un valor máximo de la señal moduladora eléctrica relacionado con la salida de una señal máxima de potencia óptica. Si se utilizara otro rango lineal de la función de transferencia del MZM en donde un valor mínimo eléctrico se relaciona con un valor máximo de potencia óptica, como sería el rango de 5[V] a 7.5[V], resultaría una señal polibinaria de polarización opuesta. La variación de la amplitud en voltaje de la señal duobinaria eléctrica debe corresponder al *swing* deseado de la región de operación del MZM, ya que dicho *swing* está relacionado con el dominio de la función de transferencia del MZM. Es cierto que en los picos y valles de la función de transferencia ya no se cuenta con un comportamiento completamente lineal, sin embargo, como se observará en el siguiente capítulo dentro del análisis de la calidad de las señales generadas, el tomar en cuenta dentro del rango del *swing*, rangos que no tienen un comportamiento lineal completamente (partes de los picos y valles), no demuestran caída alguna en la calidad de la señal, e incluso el tomar dichas secciones de la función de transferencia, aportan en que la señal de salida cuente con una mayor amplitud, beneficiando así la calidad de la señal, esto se observa en primera instancia en la amplitud de los diagramas de ojo resultantes y tomando en cuenta únicamente los efectos de dispersión cromática.

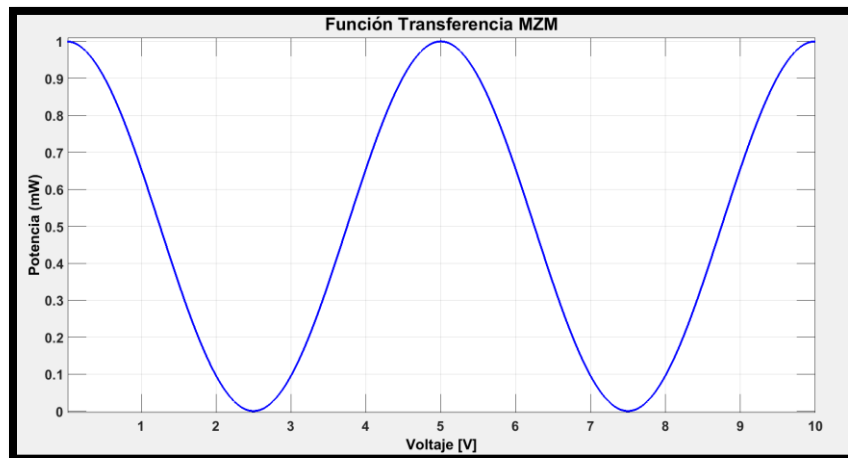


Figura 3.9 Función de transferencia de MZM: potencia óptica como función del voltaje. La operación en punto de cuadratura para generar duobinarias de 3 niveles se logra con un *swing* que va de 2.5[V] a 5[V]

En el caso de la generación de la señal de tres niveles en el presente trabajo, la variación de la señal moduladora va desde los 2.5 [V] hasta los 5 [V]. Este rango de valores corresponde precisamente a la zona de operación en la configuración de cuadratura del MZM; esto repercute en una reproducción fidedigna de la señal moduladora que se encuentra en el dominio eléctrico. Este intervalo de operación puede variar dependiendo de las características del modulador utilizado, de ahí que un conocimiento de las características de operación del interferómetro sea fundamental para una modulación óptima. Asumiendo una razón de extinción muy grande, la relación entre la amplitud de la señal eléctrica moduladora y la amplitud de la señal óptica es tal que, si la señal moduladora se encuentra en el nivel más bajo (2.5 V) la potencia de salida de la señal óptica es de 0 [W] y cuando la señal moduladora se encuentra en el nivel de amplitud máximo que es de 5 [V], la señal óptica entonces tendrá una potencia de salida máxima correspondiente a la potencia total de entrada del láser de onda continua, que en el caso de lo desarrollado es de 1 [mW]. Los valores intermedios entre estos extremos tienen un comportamiento linealmente proporcional. Cuando la señal duobinaria generada en el dominio eléctrico modula la señal óptica entrante en el MZM, y este se encuentra operando en la región de cuadratura, la señal duobinaria en el dominio óptico es una señal duobinaria de 3 niveles con un comportamiento (en principio) idéntico a la señal duobinaria en el dominio eléctrico [18].

Para la recuperación [16] de la señal duobinaria, es necesaria la numeración de cada uno de los 3 niveles distintos en amplitud con valores de 0 a 2, estos se deben numerar de menor a mayor, siendo el valor de 0 asignado al nivel más bajo, el valor de 1 al nivel intermedio y el valor de 2 al nivel con la mayor amplitud. A partir de esta denominación, el valor de la señal original que cada nivel duobinario contiene se puede recuperar mediante una operación de módulo 2 al valor de denominado correspondiente, esto quiere decir que, al aplicar módulo 2 a los valores 0, 1 y 2, los resultados serán 0, 1 y 0

respectivamente. En la Figura 3.10 se puede observar dicha relación entre la denominación de los valores asignados a los niveles junto con los valores de la señal binaria originalmente transmitida.

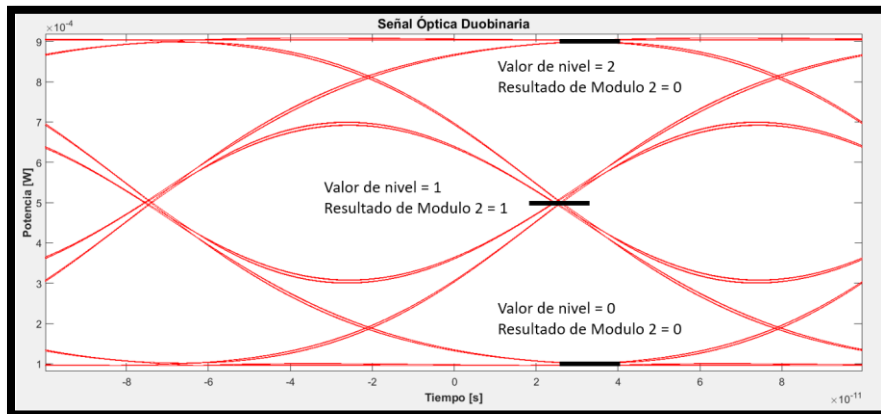


Figura 3.10 Diagrama de ojo de señal polibinaria de 3 niveles. Se marcan los 3 niveles, sus valores asociados y el resultado de la operación de Módulo 2 a dichos valores, con el fin de recuperar el valor binario original.

Si bien es cierto que la señal duobinaria óptica que viaja por la fibra y que es detectada en el receptor no contiene por sí misma los valores 0, 1 y 2, se puede hacer una correspondencia entre el valor real detectado en el fotoreceptor y dichos valores mediante algún tipo de procesamiento digital de señal o bien mediante un filtro de amplitud pasa banda, el cual suprime los valores correspondientes a los niveles de 0 y 2. La variación máxima de los niveles ópticos oscila únicamente entre los valores de la potencia óptica del CWL que, en el caso de las simulaciones realizadas, dicho rango se encuentra entre 0 [mW] y 1 [mW].

Un diagrama de ojo característico de una señal duobinaria de tres niveles se puede observar en la misma Figura 3.10, en este diagrama se puede identificar el punto temporal adecuado de muestreo de la señal donde es posible la detección y distinción de los tres niveles distintos en amplitud. Se puede observar la existencia de dos ojos los cuales, dependiendo su apertura dan una muestra a priori de la calidad de la señal óptica emitida.

### 3.2.2 Señales Duobinarias de 2 niveles

Para la generación de la señal duobinaria de 2 niveles es necesario el uso de un modulador MZM cuya operación se encuentre bajo una configuración de punto nulo [10], esta configuración permite la modulación de una señal láser de onda continua mediante una señal moduladora de 3 niveles y cuya señal óptica modulada resultante tendrá únicamente dos valores distintos en amplitud de potencia óptica.

De acuerdo a la función de transferencia del MZM con la configuración que se desarrolló y las condiciones de operación del trabajo realizado, se puede apreciar en la Figura 3.9, que un *swing* adecuado, y en primera instancia ideal para la operación en punto nulo de dicho dispositivo, se encuentra justo en un rango de 0 a 5 [V]. En este rango de operación se podrá generar una señal duobinaria de dos niveles en el dominio óptico, a partir de una señal multinivel de entrada (duobinaria en dominio eléctrico). Los valores en amplitud de los 3 niveles a la entrada al MZM serían 0[V], 2.5[V] y 5[V] cuyos correspondientes valores ópticos de salida serán 1[mW], 0[mW] y 1[mW]. Sin embargo, la operación dentro de ese rango no generará los valores binarios 1 y 0 esperados para cada uno de los 3 niveles de la señal duobinaria entrante, ya que, si se elige el rango de operación entre 0 y 5 volts, la relación entre los 3 niveles de la señal duobinaria en dominio eléctrico entrantes y los 2 valores binarios de la señal duobinaria en dominio óptico salientes, es opuesta; la relación deseada sería que los niveles 0 y 2 den como resultado un valor de 0[mW] y el nivel 1 de como resultado un valor de 1 [mW]. Para lograr esto, el rango de operación del MZM debería trasladarse +2.5[V], para operar en el rango de 2.5[V] y 7.5[V] dado que justo en este dominio la relación entre niveles de la señal duobinaria en dominio eléctrico y los valores binarios de la señal duobinaria en dominio óptico será la adecuada; en otras palabras, a la señal moduladora entrante (señal duobinaria en dominio eléctrico) se le debería hacer una adición de 2.5[V] para la obtención de la señal duobinaria óptica de 2 niveles, la cual es la señal adecuada y evitar, en una etapa posterior, algún tipo de proceso extra como una compuerta lógica binaria negada. La elección del rango de operación del punto nulo del MZM dependerá del diseño y modo de operación que se deseen tener, teniendo como opción a elegir entre aumentar la energía con la que se alimenta la señal moduladora con el fin de tener una correlación directa entre bits iniciales y bits recuperados, o bien, se opta por alimentar con menos energía a la señal eléctrica moduladora, pero emplear en la recepción un sistema lógico negado, para convertir los unos en ceros y viceversa.

Al implementarse el modulador MZM bajo la operación de punto nulo con una señal moduladora de tres niveles distintos en amplitud, como se mencionó anteriormente, se tendrá una señal modulada óptica de 2 niveles distintos en amplitud de potencia óptica. Sin embargo, desde el punto de vista del dominio del campo eléctrico, se está generando una señal óptica modulada de 3 niveles distintos [10]: +E, 0, -E como se muestra en las

Figuras 3.11 y 3.12, es decir, se están generando un valor de 0 y dos valores máximos en el dominio del campo eléctrico cuyas fases están separadas  $\pi$  radianes. A primera vista esto parecería irrelevante; no obstante, la existencia de estos valores máximos con dicha separación de fases es muy conveniente para poder contrarrestar posibles efectos de ISI, debido a que, al ser de fases opuestas, en el momento que se presente el efecto de ISI, se dará un efecto de cancelación de amplitud en campo eléctrico; esto se ilustra en la Figura 3.13.

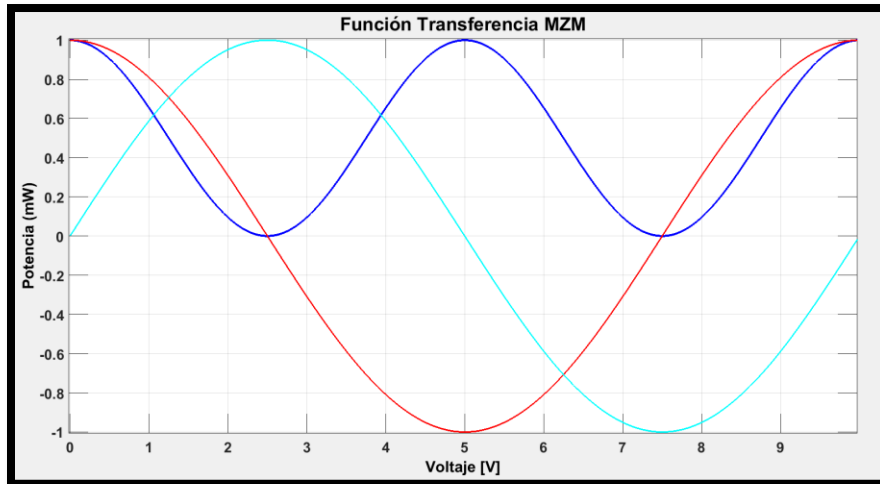


Figura 3.11 Función de transferencia del MZM, la línea azul indica la salida en potencia de la señal, mientras que la línea roja y cian indican la salida de la señal en el dominio eléctrico.

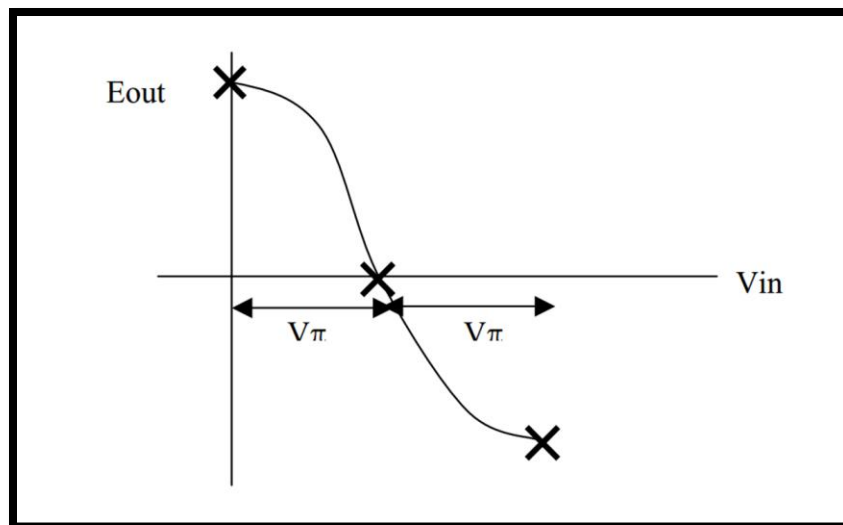
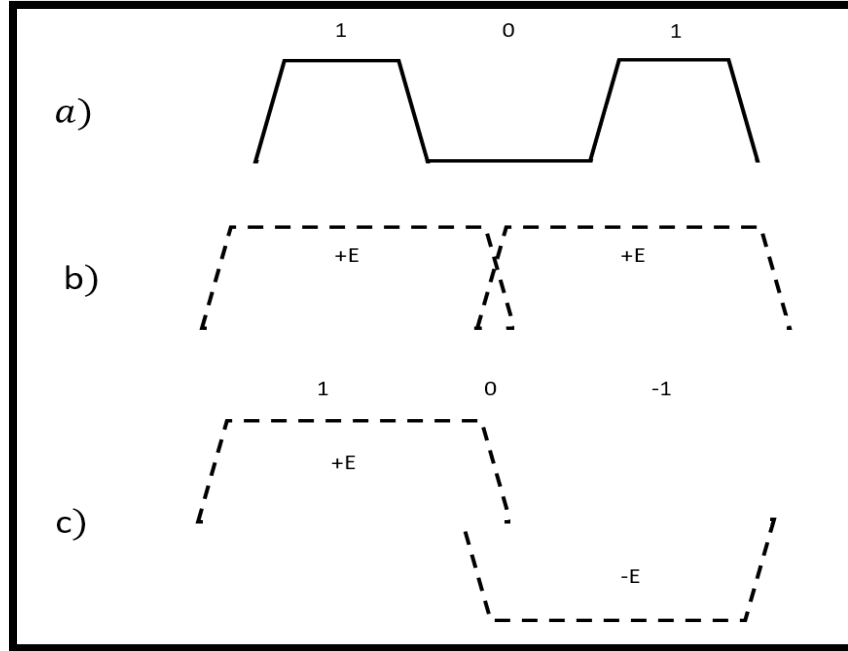


Figura 3.12 Función de transferencia de MZM, el cual se encuentra en operación en punto nulo. Dando lugar a dos valores de 1 con polarización opuesta



*Figura 3.13 a) Señal NRZ b) Señal NRZ después de haber sufrido ensanchamiento de pulsos por dispersión presentan ISI. c) Señal duobinaria que ha sufrido ensanchamiento por dispersión, mas, el contar con campos de polaridad opuesta, se contraponen y facilitan detección en el punto del nivel 0*

Por otro lado, una de las características más destacadas de las señales duobinarias, es que, debido a la codificación de correlación que se emplea desde un inicio, la señal binaria codificada nunca presentará secuencias donde se tengan dos valores extremos consecutivos; es decir que no se puede tener un valor en el nivel 0 y el siguiente valor inmediato sea el valor correspondiente al nivel 2, ni viceversa. A su vez, tampoco se podrá encontrar en una señal codificada la secuencia en donde se tenga dos valores extremos con un valor intermedio entre estos dos, es decir, no existe el caso en donde de un nivel 0, se pase a un nivel 1 y de regreso al nivel 0, ni tampoco el caso donde de un nivel 2, pase a un nivel 1 y después regrese al nivel 2. Esta idea se representa de mejor manera en la Tabla 3.1, donde se menciona las posibles secuencias en una señal duobinaria, así como aquellas que no pueden existir dentro de dicha señal.



Secuencias No Existentes	Secuencias Existentes
010	0110, 01110
02	012, 01112,
20	210, 21110
0112	012, 01112
2110	210, 21110

Tabla 3.1 Tabla con las secuencias de la señal multinivel duobinaria que no son posibles de encontrar (columna izquierda), y las secuencias que sí existen (columna derecha) y que llegan a tener un comportamiento similar.

La combinación de la inexistencia de ciertas secuencias de valores en la señal codificada, así como la característica de las fases opuestas de los valores en el dominio del campo eléctrico a la salida de la señal duobinaria óptica, resultan en una gran robustez de la señal óptica duobinaria ante los efectos de ISI, ocasionados principalmente por el ensanchamiento de los pulsos ópticos, a su vez provocados por la dispersión cromática de la fibra per se. Un diagrama de una señal duobinaria óptica de 2 niveles se muestra en la Figura 3.14, donde se puede observar una cierta similitud a un diagrama de ojo de una señal binaria NRZ.

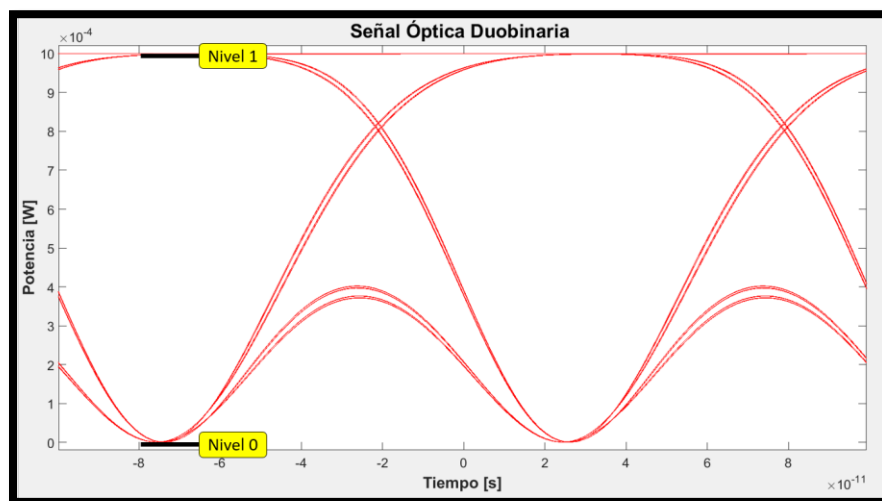


Figura 3.14 Diagrama de ojo de señal duobinaria óptica operando a 10 Gb/s, se muestra que existen 2 niveles distintos en amplitud de la señal.

Hablando de las ventajas que llega a tener una señal duobinaria de dos niveles respecto a la señal duobinaria de tres niveles, destaca principalmente el hecho de tan sólo tener dos valores modulados en amplitud de potencia óptica, otorgando la facilidad de contar con una detección directa de la señal, es decir, que con sólo el uso de un foto-receptor

con un único umbral de decisión colocado adecuadamente, se podrá recibir la señal duobinaria sin mayor complejidad. Esto, al final repercute en que la señal duobinaria de dos niveles o también conocida como señal duobinaria AM-PSK (*Amplitude Modulated Phase Shift Keying*) [10] puede ser implementada con costos más económicos y menos complejos que en el caso de la señal duobinaria de tres niveles.

### 3.3 Señales Polibinarias

Las señales polibinarias, son señales multinivel, las cuales, a partir de una señal binaria y aprovechando codificación de correlación entre sus bits adyacentes [12] se genera una señal multinivel que, en cada uno de sus distintos niveles en amplitud, porta un elemento binario de la señal original, por lo que su tasa de transmisión es exactamente la misma que la tasa de transmisión de la señal binaria original. El proceso de generación de las señales polibinarias es semejante a la generación de las señales duobinarias de 3 niveles, esto se debe a que una señal duobinaria no es más que una señal polibinaria de 3 niveles, es decir una señal polibinaria con  $M=3$ . La generación de las señales polibinarias [20] como se mencionó anteriormente, tiene un proceso semejante al de la generación de la señal duobinaria de 3 niveles, es decir, parte de una señal binaria NRZ a cierta tasa de transmisión, y pasa por las etapas de codificación expresada en las ecuaciones (18) y (19). Sin embargo, en este caso, se trata de un proceso genérico en donde  $b$  es el número de niveles de la señal que se quiere obtener.

Una de las partes destacables de la generación de las señales polibinarias, es el punto de transición de una señal binaria con codificación de correlación (18) hacia la señal polibinaria con sus  $b$  niveles distintos en amplitud (19). Este proceso se puede llevar a cabo implementando un filtro polibinario [22]. Este filtro puede ser bien, un filtro digital (*delay and add*) como puede tratarse de un filtro analógico pasa bajas cuyo ancho de banda se encuentra por debajo o cercano a una cuarta parte de la frecuencia de transmisión de la señal. No obstante, la elección de uno de los dos tipos de filtros a implementarse para la generación de la señal polibinaria conlleva a la generación de señales polibinarias de distinta índole. De igual forma que en el caso de la generación de las señales duobinarias de 3 niveles, el resultado de esta codificación es una señal polibinaria de tantos  $b$  niveles como sea el objetivo a generar, dentro del dominio del campo eléctrico, y esta señal será la encargada de manipular un modulador óptico MZM que, dependiendo del modo de operación (cuadratura o nulo), dará lugar a diferentes tipos de señales polibinarias ópticas. Por ende, resulta pertinente hablar de cada uno de los 4 tipos de señales polibinarias de 5 niveles (que fueron generados durante la presente investigación). Nótese que el análisis podría haberse llevado a cabo con señales de  $M$

niveles: 3,4,5,6,7...N. Sin embargo, este tipo de señales se tornarían imprácticas en el dominio óptico, por lo que nos restringimos a señales polibinarias de 5 niveles.

### 3.3.1 Polibinaria 1: 5 niveles, filtro a 50% de bitrate MZM en cuadratura

Una de las primeras señales polibinarias generadas en este trabajo, partió de la propuesta hecha por Lender para la primera señal polibinaria generada, la cual fue desarrollada con miras en una señal polibinaria dentro del dominio del campo eléctrico exclusivamente, sin embargo, en este trabajo se adapta para una señal en el dominio del campo óptico. Este tipo de señal emplea un filtro duobinario digital *delay and add*, el cual realiza la suma de los elementos binarios para dar lugar a la señal multinivel con la codificación adecuada. Cabe señalar que esta señal polibinaria cuenta con el mismo ancho espectral que la señal binaria, si la señal polibinaria resultante se enviara tal cual al modulador óptico MZM, la señal óptica resultante contaría con un rango de frecuencias muy amplio, con lo que muchas frecuencias estarían alejadas de la portadora óptica. Estas frecuencias son las que serían más vulnerables ante los efectos de dispersión cromática de la fibra, resultando en una mayor degradación al ser transmitida. Por esa razón es que la señal polibinaria resultante del filtro digital debe ser procesada nuevamente por un filtro pasa bajas, pero esta vez, se trata de un filtro analógico, de acuerdo con lo propuesto por Lender. Este filtro analógico pasa bajas tiene un ancho de banda mínimo cercano al 50% de la tasa de transmisión de la señal, para que ésta no se distorsione y sufra pérdida de información aún antes de ser si quiera enviada hacia el MZM como señal moduladora.

Una vez conseguida la señal moduladora polibinaria, que en el caso de lo desarrollado se trata de una señal polibinaria de 5 niveles, es dirigida hacia el MZM. El MZM opera, para este caso, bajo la configuración de cuadratura, como en el caso de la señal duobinaria de 3 niveles. La función de transferencia y la asociación entre la señal moduladora entrante y la señal óptica modulada resultante se observan en la Figura 3.15.

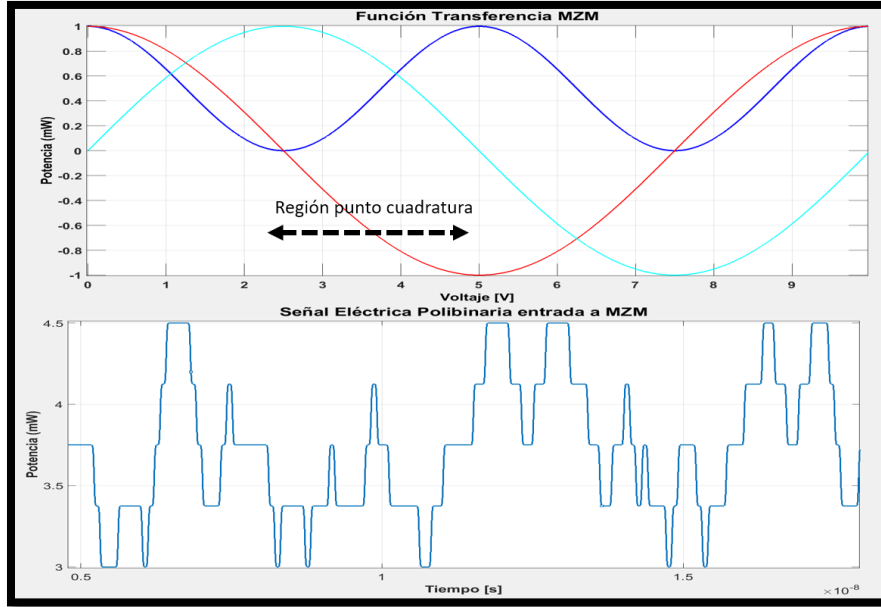


Figura 3.15 a) Función de transferencia de MZM donde se observa la región de operación en cuadratura (región de transferencia cuasi-lineal entre el voltaje de alimentación y la potencia óptica). b) Señal polibinaria de 5 niveles en el dominio eléctrico.

El diagrama de ojo correspondiente a la salida del MZM para el caso de este tipo de señal óptica polibinaria de 5 niveles se observa en la Figura 3.16, donde se puede ver claramente la ubicación y generación de los 5 niveles distintos en amplitud de potencia óptica.

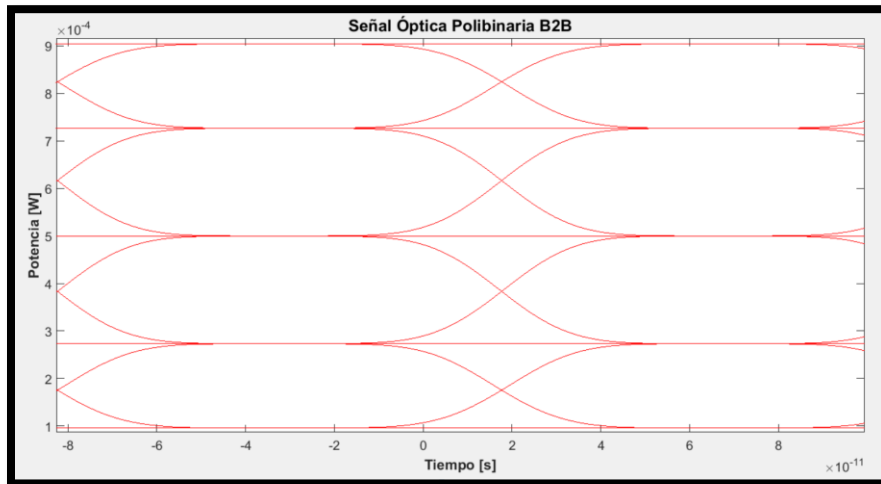
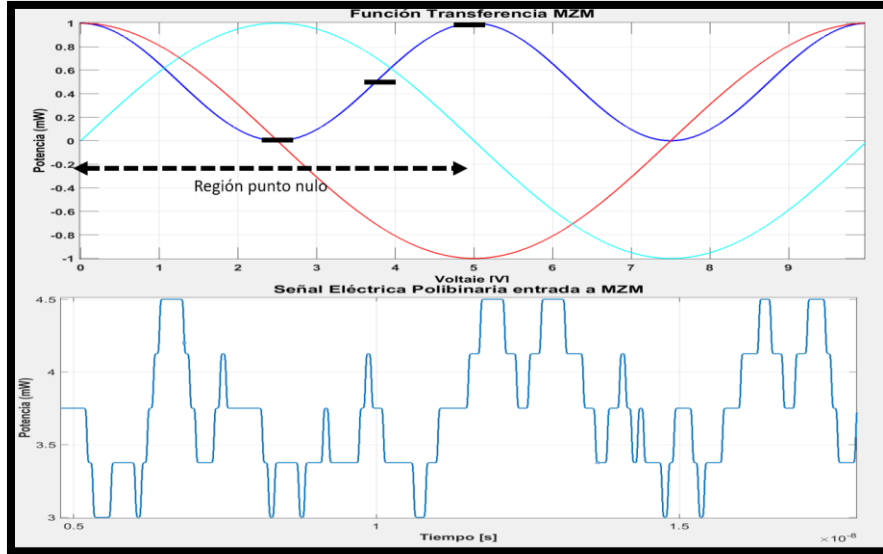


Figura 3.16 Diagrama de ojo de señal óptica polibinaria operando a 10 Gb/s en donde es posible ver la existencia de los 5 niveles de amplitud óptica.

La recuperación de esta señal polibinaria consta de un proceso similar a la recuperación de la señal duobinaria de 3 niveles, con la diferencia de que en este caso se trabaja sobre la señal de 5 niveles. Cada uno de estos 5 niveles debe estar asociado a un valor determinado, comenzando con el nivel de menor amplitud correspondiéndole el valor de 0, y aumentando de 1 en 1 sobre los niveles consecutivos; resultando entonces en los valores de 0,1, 2, 3, 4. De manera semejante, para obtener de nuevo el mensaje original binario, es preciso aplicar una operación de módulo 2 a cada valor asociado a cada nivel, es decir, si en la parte del sistema de recepción se detectan los niveles con valores asociados de 0, 1, 2, 3, 4 los valores binarios originales que representa cada uno de los niveles es 0, 1, 0, 1, 0 respectivamente.

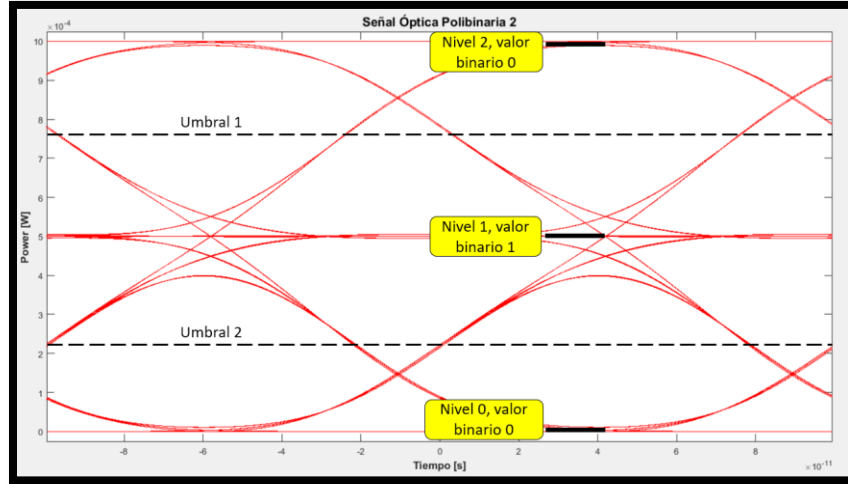
### **3.3.2 Polibinaria 2: 5 niveles, filtro al 50% de bitrate MZM en punto nulo**

En la generación de la tercera señal óptica polibinaria, se optó por tomar como base la generación de la primera señal polibinaria, la cual fue producida a partir de una señal eléctrica polibinaria de 5 niveles como se explica en el capítulo 3.3.1, mediante la implementación de un filtro digital delay and add y un filtro polibinario con una frecuencia de corta al 50% del bitrate de la señal generada. Sin embargo, a diferencia del primer caso de señal polibinaria donde se empleó el MZM con la configuración de cuadratura, para esta señal se movió la región de operación hacia la denominada región de punto nulo, donde el campo óptico (y no su potencia) tiene un comportamiento lineal con respecto al voltaje de alimentación. Con este movimiento, la señal óptica multinivel resultante no se trata de una de 5 niveles, sino que la señal resultante consta de tan sólo 3 niveles en amplitud óptica, sin perder información alguna en el proceso, como se muestra en la Figura 3.17. Se observa que los niveles entrantes 0, 2 y 4, los cuales representan ceros en la señal original, generan en este caso dos nuevos niveles que ahora tendrán los valores de 0 y 2, valores que, al aplicar la operación de módulo 2 retornan el valor binario 0 de la señal original. Por otro lado, los valores de la señal moduladora eléctrica de 5 niveles 1 y 3, dan lugar a un solo nivel en la señal óptica resultante, el cual conlleva a un valor digital de 1 al aplicar una operación de módulo 2.



*Figura 3.17 El rango de operación del MZM en punto nulo es de 0 a 5 Volts en la señal polibinaria eléctrica a la entrada, esto genera una señal óptica con un rango de amplitud de 0 a 1 mW de amplitud. Es posible observar los 5 niveles distintos en la señal eléctrica (diagrama inferior) y los 3 niveles en la señal óptica (arriba).*

Para poder recibir y decodificar correctamente la señal polibinaria, se emplea únicamente 2 umbrales de decisión para poder distinguir y analizar la señal óptica polibinaria de 3 niveles, tal y como se muestra en la Fig. 3.18. De esta manera se comprueba que el operar el MZM en punto nulo en vez de cuadratura nos otorga el beneficio de simplificar el sistema de transmisión y de recepción. Al sólo tener 3 valores distintos de señal: 0, 1 y 2, mediante proceso digital de señales aplicando una simple operación de módulo 2 se recuperarán los valores originales de la señal binaria sin alterar el bitrate ni la información que contiene.



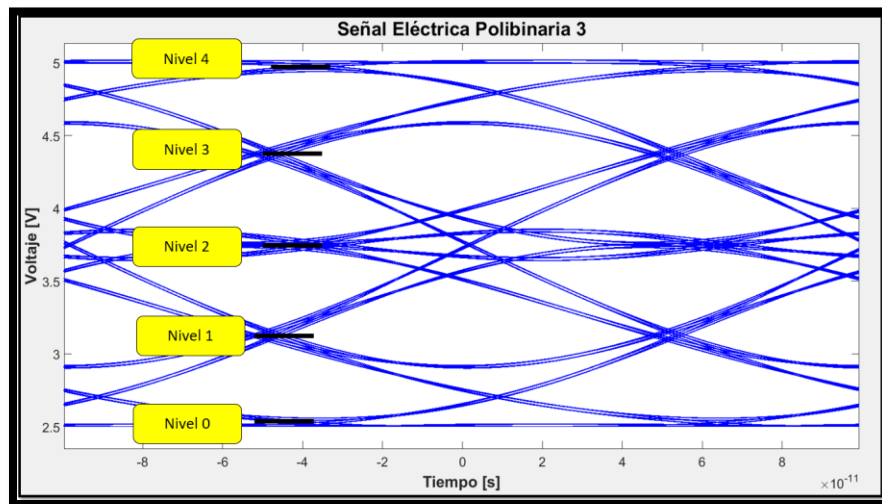
*Figura 3.18 Diagrama de ojo de señal polibinaria de tres niveles a 10 Gb/s en el dominio óptico. Se pueden apreciar los 3 niveles distintos en amplitud óptica, los cuales pueden diferenciarse gracias al uso de 2 umbrales de decisión.*

### 3.3.3 Polibinaria 3: 5 niveles, filtro a 18% de bitrate MZM en cuadratura

El proceso de generación para dar lugar a señales polibinarias, toma como referencia las mismas bases que se propusieron por Lender desde los años 60s, cuyos procesos de correlación entre bits y generación de los distintos niveles se desglosan en (18) y (19). No obstante, como ya se ha mencionado anteriormente, la manera de implementar dichos pasos puede ser a través de la aplicación de distintos filtros sean digitales o analógicos pasa bajas, de distinto ancho de banda, o inclusive mediante etapas de procesamiento digital de señales.

La generación de señales polibinarias mediante un solo filtro analógico representa una ventaja sobre lo propuesto por Lender, primordialmente en el hecho de no usar 2 filtros por separado: uno digital y otro analógico, sino únicamente procesar la señal a través de un solo filtro pasa bajas, cuyo ancho de banda dependerá de la cantidad de niveles que se quiera generar en la señal polibinaria; por ejemplo, hemos observado ya anteriormente, que para la generación de una señal polibinaria de 3 niveles, es necesario un ancho de banda en el filtro de aproximadamente una cuarta parte de la tasa de transmisión de la señal. En cambio, para la segunda señal óptica polibinaria que se generó en este trabajo, el ancho de banda del filtro analógico fue de aproximadamente una quinta parte de la tasa de transmisión, lo anterior dio lugar a una señal polibinaria de 5 niveles, con un comportamiento un tanto distinto a la señal polibinaria de la sección 3.3.1

La señal eléctrica multinivel generada a partir del filtro pasa bajas polibinario con un ancho de banda cercano a una quinta parte del bitrate, se envió al MZM como señal moduladora. El MZM operó bajo la configuración de cuadratura, relacionando la señal polibinaria en dominio eléctrico con la señal óptica de salida, de manera idéntica al caso de la señal duobinaria de 3 niveles. El diagrama de ojo de la señal eléctrica de entrada al MZM se muestra en la Figura 3.19.



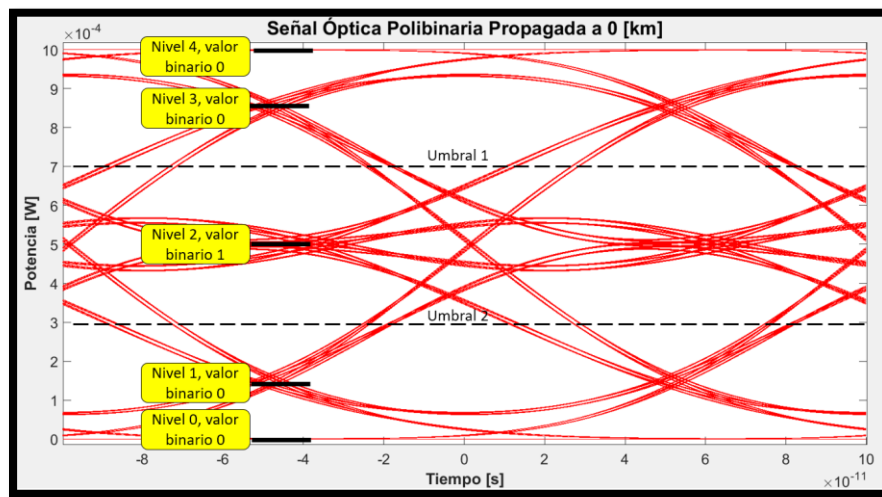
*Figura 3.19 Diagrama de ojo de señal eléctrica polibinaria a la entrada del MZM operando a 10 Gb/s. Es posible ver la existencia de los 5 niveles de amplitud.*

En el caso de la generación de las señales polibinarias mediante un filtro analógico pasa bajas cuyo ancho de banda es cercano a una quinta parte de la tasa de transmisión de la señal original, se tiene un espectro mucho más estrecho que en la señal binaria original, esto conlleva a una mayor concentración de energía en las frecuencias cercanas a la portadora óptica, de tal forma que es una concentración más densa que en el caso de la señal duobinaria. Por consiguiente, las frecuencias de la señal óptica emitida se ven menos afectadas por el efecto de dispersión cromática de la fibra. Por otro lado, el tener una señal óptica con un espectro muy estrecho puede ser de suma utilidad dentro de sistemas DWDM, en donde la eficiencia espectral es vital para poder colocar la mayor cantidad de canales de comunicación sin tener un ensanchamiento y ocasionar efectos de intercomunicación cruzada.

La recuperación de la señal para el caso de la señal polibinaria generada a partir de filtro polibinario analógico (en caso del trabajo presentado se trata de un filtro Bessel de 5to orden con frecuencia de corte a 18% de la tasa de transmisión) es similar al caso de las señales polibinarias generadas a partir de filtro digital + filtro analógico, sin



embargo, hay una diferencia muy característica en este caso, y es que, tanto los niveles denominados como 0 y 1 como los niveles denominados como 3 y 4, representan el valor binario 0 de la señal original y el nivel intermedio, es decir, el nivel 2 representa el valor de 1, esto se observa de manera más clara en la Figura 3.20. Lo anterior es un comportamiento particular a destacar, ya que se puede decir que, aunque la señal cuenta con 5 niveles distintos en amplitud, en realidad la recuperación de la misma se puede llevar a cabo mediante el uso de sólo 2 umbrales de decisión en lugar de los 4 esperados, esto es parecido al caso de recuperación de una señal duobinaria de 3 niveles, pero la señal polibinaria de 5 supuestos niveles cuenta con un ancho espectral más angosto que la señal duobinaria antes mencionada.



*Figura 3.20 Diagrama de ojo de señal óptica polibinaria de 5 niveles obtenida a la salida del MZM para una tasa de 10 Gb/s. En esta figura se señalan los 5 distintos niveles, su denominación y correspondencia con los valores binarios de la señal emitida en un principio, así como, el uso de los 2 umbrales para su recepción.*

El diagrama de ojo resultante de una señal polibinaria de 5 niveles mediante la implementación de un filtro analógico pasa bajas y un MZM con operación bajo la configuración en cuadratura se muestra también en la Figura 3.21 y se compara con la correspondiente señal óptica duobinaria (tres niveles). Es evidente la generación de los 5 niveles y la apertura de los ojos entre los 5 niveles, la cual, en comparación con la apertura del diagrama de ojo duobinario de 3 niveles, es mucho menor y resulta, en una disminución de la calidad estimada de la señal, incluso antes de ser propagada por la fibra óptica. Se deduce entonces que el costo de reducir el tamaño del espectro de la señal corresponde a un decremento en la apertura relativa entre los niveles de la misma, lo que dificulta, en principio, el proceso de detección y decisión.

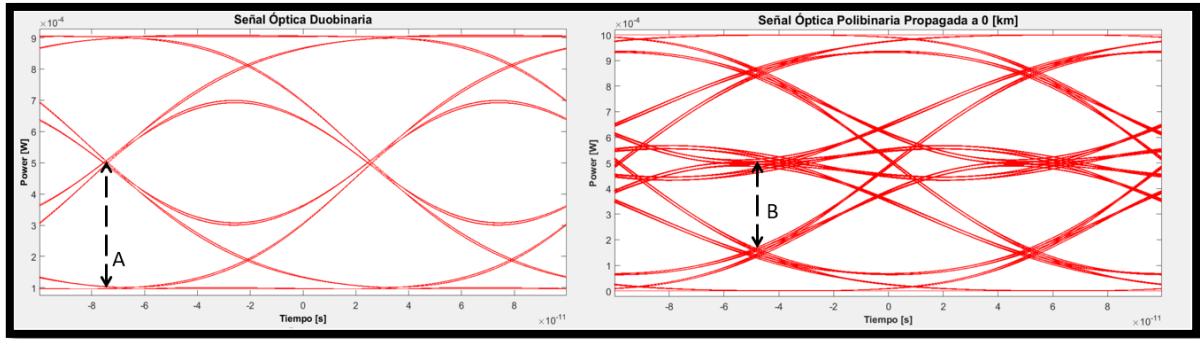


Figura 3.21 La comparación de la apertura del diagrama de ojo de una señal duobinaria de 3 niveles (A) es considerablemente mayor a la apertura del diagrama de ojo de una señal polibinaria de 5 niveles, lo que se traduce en una mejor calidad de señal o menor riesgo de distorsión para la señal duobinaria.

### 3.3.4 Polibinaria 4: 5 niveles, filtro al 18% de bitrate MZM en punto nulo

El cuarto tipo de señal óptica polibinaria se logró a partir de la previa generación de una señal polibinaria eléctrica procesada con base en un filtro polibinario analógico pasa bajas cuya frecuencia de corte se ubica al 18% del bitrate de la señal binaria original emitida (mismo caso de la señal eléctrica emitida para la generación de la señal polibinaria de la sección 3.3.2). Dicha señal polibinaria eléctrica de 5 niveles, es conducida como una señal moduladora hacia un MZM operando esta vez en región de punto nulo, se puede observar en la Figura 3.22. El resultado a partir de este proceso es una señal óptica polibinaria que tendrá únicamente 3 niveles de amplitud óptica, dando lugar a un comportamiento parecido al que describe en la sección 3.3.3, donde los niveles 0, 2 y 4 de la señal eléctrica moduladora, dan pie a los niveles 0 y 2 de la señal óptica resultante del MZM, mientras que los niveles 1 y 3 de la señal eléctrica moduladora se corresponde con el nivel 1 de la señal óptica resultante de únicamente 3 niveles de amplitud de potencia.

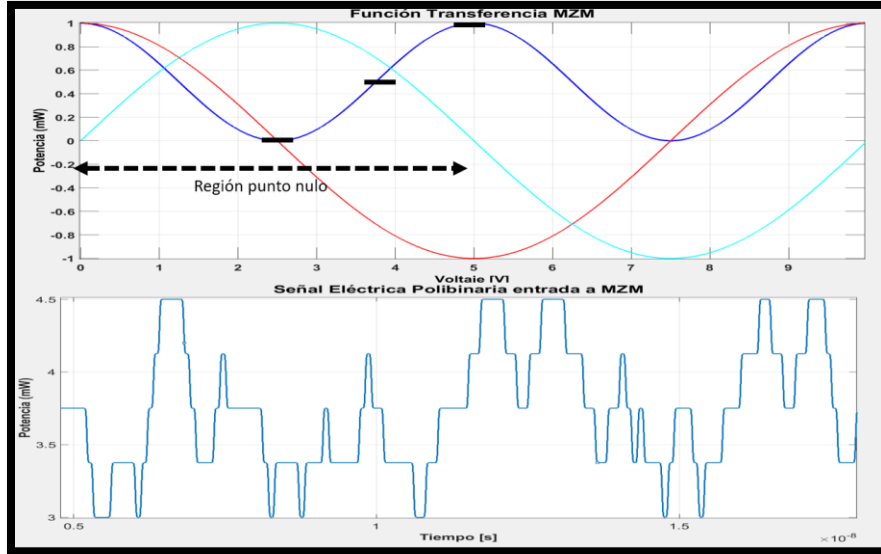


Figura 3.22 El rango de operación del MZM en punto nulo es de 0 a 5 Volts en la señal polibinaria eléctrica a la entrada, esto genera una señal óptica con un rango de amplitud de 0 a 1 mW de amplitud. Es posible observar los 5 niveles distintos en la señal eléctrica (diagrama inferior) y los 3 niveles en la señal óptica (arriba).

No obstante, recordando el proceso de recepción y decodificación de la señal óptica polibinaria de la sección 3.3.3 (señal Polibinaria óptica 5 niveles a partir de un filtro analógico y MZM en cuadratura), donde a pesar de tratarse de una señal de 5 niveles, basta con la adecuada ubicación de 2 umbrales de decisión para una acertada recuperación de información, en este caso se presenta un fenómeno similar; es decir, que con la señal óptica polibinaria resultante de 3 niveles, basta con tan sólo usar un solo umbral de detección para una adecuada recuperación de la señal, tratándose así de un caso particularmente interesante, ya que, a partir de una señal polibinaria de 5 niveles, con las ventajas que una señal polibinaria conlleva ante los efectos de dispersión cromática, se cuenta con el beneficio de un sistema simple de detección directa; en otras palabras, esta señal polibinaria tiene la característica de poder ser detectada como si se tratase de una señal NRZ común y corriente.

Recordando la relación de la función de transferencia entre los valores de la señal polibinaria de 5 niveles dentro del campo eléctrico y la señal óptica resultante a la salida del MZM operando en punto nulo, los niveles 0, 2 y 4 de la señal eléctrica, corresponden a la generación de los niveles 0 y 2 de la señal óptica polibinaria de 3 niveles, mientras que los niveles 1 y 3 de la señal eléctrica corresponden al nivel 1 de la señal óptica resultante. Así mismo, recordando cómo se describe en la sección 3.3.2 que los niveles 0,1,3 y 4 de la señal polibinaria óptica resultante del MZM operando en cuadratura están relacionados con el valor binario 0, y el nivel 2 es el único nivel de la señal

polibinaria óptica relacionado con el valor binario 1 de la señal binaria original, entonces se concluye la relación de esta nueva señal óptica polibinaria de 3 niveles, donde los niveles 1 y 2 están relacionados con el valor binario 0 y el nivel 0 está relacionado con el valor binario 1. Por ende, en el sistema de recepción para este caso de señal polibinaria, es necesaria la implementación de una compuerta lógica inversora en el dominio digital o bien mediante procesamiento digital de señales, esto con el fin de lograr recuperar la señal exactamente como fue transmitida desde un inicio. El diagrama de ojo de este tipo de señal óptica polibinaria se observa en la Figura 3.23.

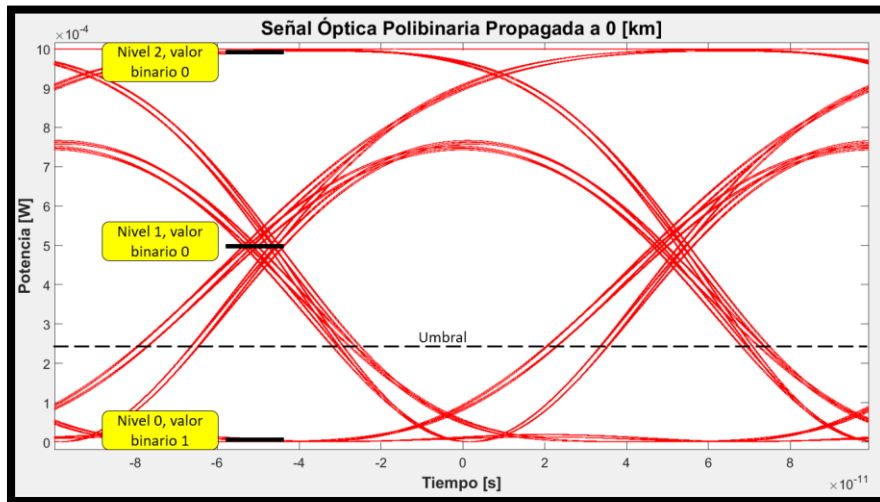


Figura 3.23 Diagrama de ojo de señal polibinaria de tres niveles a 10 Gb/s en el dominio óptico. Se pueden apreciar los supuestos 3 niveles distintos en amplitud óptica; sin embargo, sólo se requiere el uso de un solo umbral de decisión.

### 3.4 Conclusiones de este capítulo

Como conclusión de este capítulo y como preámbulo para dar pie al siguiente capítulo, donde se desglosa el análisis de las simulaciones realizadas y los resultados obtenidos, se desarrolló la Tabla 3.2 para tener una recapitulación resumida de los distintos formatos de modulación polibinaria y a la vez, tener acceso a una breve comparación a priori de sus características.



Formato de Modulación	Filtro utilizado	Modo de operación de MZM	Niveles en diagrama de ojo eléctrico	Niveles en diagrama de ojo óptico	Umbrales para decisión	Diagrama de ojo óptico
Duobinaria 1 Sección 3.3.1	Eléctrico Pasa Bajas a 30% de tasa de transmisión	Cuadratura	3	3	2	
Duobinaria 2 Sección 3.3.2	Eléctrico Pasa Bajas a 30% de tasa de transmisión	Punto Nulo	3	2	1	
Polibinaria 1 Sección 3.3.3	Digital delay and add + Eléctrico Pasa Bajas a 50% de tasa de transmisión	Cuadratura	5	5	4	

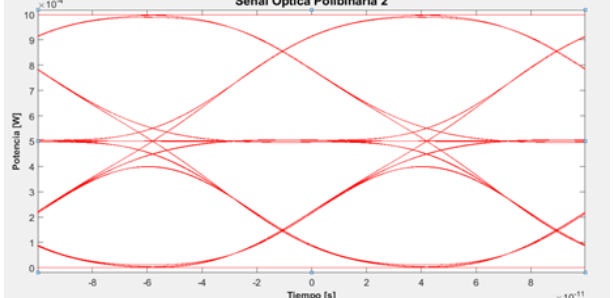
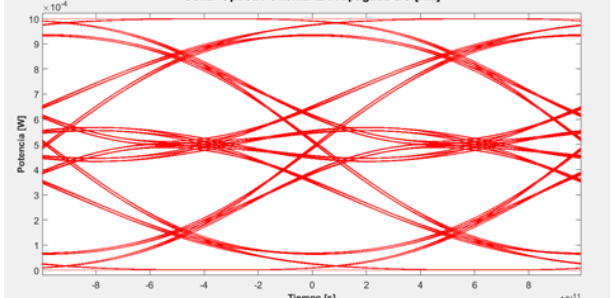
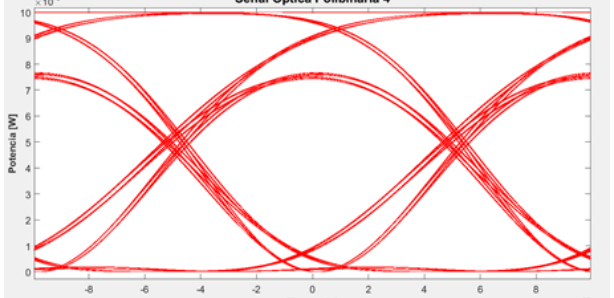
<p><b>Polibinaria 2</b></p> <p><b>Sección 3.3.4</b></p>	<p>Digital delay and add + Eléctrico Pasa Bajas a 50% de tasa de transmisión</p>	<p>Punto Nulo</p>	<p>5</p>	<p>3</p>	<p>2</p>	
<p><b>Polibinaria 3</b></p> <p><b>Sección 3.3.5</b></p>	<p>Eléctrico Pasa Bajas a 18% de tasa de transmisión</p>	<p>Cuadratura</p>	<p>5</p>	<p>5</p>	<p>2</p>	
<p><b>Polibinaria 4</b></p> <p><b>Sección 3.3.6</b></p>	<p>Eléctrico Pasa Bajas a 18% de tasa de transmisión</p>	<p>Punto Nulo</p>	<p>5</p>	<p>3</p>	<p>1</p>	

Tabla 3.2 Tabla con recopilación de los formatos de modulación de señales ópticas abordadas en este capítulo.

## Referencias

- [1] Winter, J. Peter (2015). *Scaling Optical Fiber Networks: Challenges and solutions*. Optics and Photonics News. March 2015
- [2] Tao, Li. & Ji, Y. & Liu, J. & Pak Tao, A. & Chi, N. & Lu, (2013). *Advanced Modulation Formats for Short Reach Optical Communication Systems*. IEEE Network. December 2013.
- [3] Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian, and Y. Ma (2013). *Time- and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation PON stage 2 (NG-PON2)*. J. Lightwave Technol. 31(4), 587–593 (2013).
- [4] S. Bhoja (2012). *Study of PAM modulation for 100GE over a single fiber*. IEEE Next Gen 100G Optical Ethernet Study Group (2012).
- Disponible en:  
[http://www.ieee802.org/3/100GNGOPTX/public/jan12/bhoja\\_01\\_0112\\_NG100GOPTX.pdf](http://www.ieee802.org/3/100GNGOPTX/public/jan12/bhoja_01_0112_NG100GOPTX.pdf)
- [5] A. J. Price (1995). et al. *Reduced bandwidth optical digital intensity modulation with improved chromatic dispersion tolerance*. Electron. Lett., vol. 31, pp. 58-59, (1995).
- [6] T. Ono (1998). et al. *Characteristics of optical duobinary signals in terabit/s capacity, high-spectral efficiency WDM systems*. J. Lightwave Technol., vol. 16, pp.788-797, May (1998)
- [7] K. Yonenage & S. Kuwano (1997). *Dispersion tolerant optical transmission system using duobinary transmitter and binary receiver*. J. Lightwave Technol., Vol. 15, pp. 1530-1537, 1997.
- [8] Groff, W. M., & Powers, R.C (1961). *A high-speed synchronous digital data transmission modem*. Proc. 1961 Nat'l Conv. On Military Electronics, pp. 208-213.
- [9] Nyquist, H. (1924) *Certain factors affecting telegraph speed*. Bell System Tech. J., vol.3, pp. 324-346, Apr. 1924.
- [10] Walklin, Sheldon (1999). *Multilevel Signaling for Increasing the Reach of 10 Gb/s Lightwave Systems*. Journal of Lightwave Technology, Vol., 17, No. 11, November 1999.
- [11] A. Lender (1966). *Correlative level coding for binary data transmission*. IEEE Spectrum. February 1966



- [12] A. Lender (1964). *Correlative digital communication techniques*. IEEE Trans. Commun., Vol. COM-12, pp. 128-135, 1964.
- [13] Kabal, P. & Pasupathy, Subbarayan. *Partial-Response Signaling*. IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-23. No. 9. September 1975.
- [14] Howson, Robert (1965). *An Analysis of the Capabilities of Polybinary Data Transmission*. IEEE Transactions on Communications Technology. Vol 13. No. 3. 1965
- [15] T. Ito (1997) et al. *Feasibility study on over 1 bit/s/Hz high spectral efficiency WDM with optical duobinary coding and polarization interleave multiplexing*. Proc. OFC'97, 1997, vol. TuJ1, pp. 43–45.
- [16] Vegas Olmos, J. J. & Suhr & L. F. & Li, B. & Tafur Monroy, I. (2013). *Five-level polybinary signaling for 10 Gbps data transmission systems*. Optics Express, 21(17). 20417-20422- 10-1364/OE.21.020417
- [17] Shankar, Hari (2014). *Duobinary Modulation for Optical Systems*. Inphi Corporation
- Disponibile en:  
<https://www.inphi.com/products/whitepapers/DuobinaryModulationForOpticalSystems.pdf>
- [18] Winzer, P. & Essiambre, René-Jean (2006.) *Advanced Optical Modulation Formats*. Proceedings of the IEEE. Vo. 94, No. 5, May. 2006
- [19] Lyubomirsky & C. C. Chien (2006). *Ideal duobinary generating filter for optically amplified systems*. IEEE Photon. Technol. Lett. 18(4), 598–600 (2006).
- [20] A. Lender (1966). *Correlative level coding for binary data transmission*. IEEE Spectrum. February 1966
- [21] Lyubomirsky & C. C. Chien (2006). *Ideal duobinary generating filter for optically amplified systems*. IEEE Photon. Technol. Lett. 18(4), 598–600 (2006).

---

## *Capítulo 4: Simulación de Transmisión de Señales Ópticas Polibinarias*

---

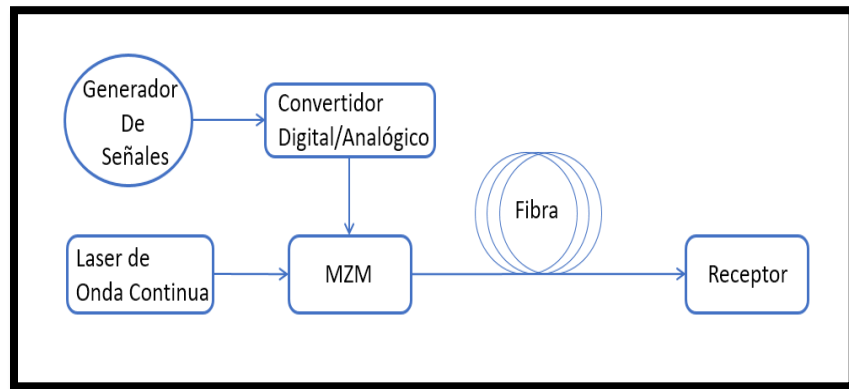
En el presente trabajo de investigación se desarrolló una herramienta computacional mediante el software MatLab para llevar a cabo simulaciones tanto de generación de múltiples señales ópticas polibinarias, como de la propagación de estas mismas a través de fibra óptica. Este proceso se desarrolló de tal manera que, partiendo de los modelos matemáticos del comportamiento de los dispositivos que se implementan en una transmisión de señales ópticas, se elaboró la programación adecuada para simular tanto su funcionamiento, como la recuperación de los resultados de manera gráfica, con lo cual se logró observar el comportamiento de las señales en el dominio del tiempo, la frecuencia, o bien, se logró obtener el comportamiento de las señales a través de diagramas de ojo.

En el presente capítulo se describen los elementos que se tomaron en cuenta para la simulación, así como sus propios parámetros de funcionamiento; a su vez se detallan las consideraciones y diversas configuraciones que se adaptaron para cada una de las distintas señales polibinarias generadas y transmitidas en la simulación. También, se describen los resultados obtenidos para cada señal, enfocándose principalmente en resultados referentes a la calidad de las señales y su deterioro debido a la dispersión cromática a lo largo de la transmisión de las mismas por medio de la fibra óptica.

### **4.1 Elementos de simulación**

Aunque para cada una de las señales ópticas polibinarias simuladas los parámetros de los dispositivos cambian de una a otra, se puede mencionar que todas las simulaciones se llevaron a cabo siguiendo un esquema semejante. En la Figura 4.1 se puede apreciar el esquema general de simulación implementado, en donde la señal original se genera mediante un proceso digital que crea una señal PRBS tomando en cuenta una cantidad de  $2^{15}$  bits, los cuales se generan en todos los casos a una tasa de 10 Gbps. A la salida de esta etapa se lleva a cabo la pre codificación propia de las señales polibinarias (excepto para el caso de la señal óptica NRZ) en donde se lleva a cabo una operación XOR como ya fue explicado en el capítulo anterior. Posteriormente, esta información es dirigida a un generador de señales eléctricas la cual adapta la amplitud de las señales de acuerdo al rango de operación del MZM que se utilizará (cuadratura o punto nulo); posterior a esta etapa viene la etapa de filtrado con un filtro analógico pasabajas. La siguiente etapa consta del direccionamiento de la señal filtrada (ya polibinaria en

dominio eléctrico) hacia un MZM para que lo controle. El MZM es a su vez alimentado con una señal portadora continua (CWL). La salida óptica del MZM está dirigida a su vez hacia la fibra óptica SMF que será el medio de propagación de la señal óptica modulada. La etapa de recepción se simuló con un fotodetector sin tomar en cuenta ruido del dispositivo de algún tipo, pero sí con una responsividad del 80%. Por último, la etapa en el sistema receptor correspondiente al cálculo y estimación de calidad de la señal se elaboró de tal manera que se considere como un proceso realizado mediante equipo de procesamiento digital de señales.



*Figura 4.1 Esquema general del sistema de comunicaciones ópticas simulado en este trabajo de investigación.*

Para la realización de la simulación se programaron en Matlab modelos computacionales estándar. De particular interés es el modulador óptico que sigue una configuración tipo Mach-Zehnder y que ya fue discutido en el capítulo anterior. La señal eléctrica con que este modulador fue alimentado se deriva de un codificador NRZ que permite convertir los bits pre-codificados en una señal de valores bajos y altos adecuada para alimentar correctamente al modulador. Con el fin de crear la señal polibinaria, se utilizó un filtro eléctrico pasobajas tipo Bessel de quinto orden. La función de transferencia de un filtro Bessel tiene la forma:

$$H(s) = \frac{\theta_n(0)}{\theta_n(s/\omega_0)}$$

Donde  $\theta_n(s)$  es un polinomio Bessel, de donde este tipo de filtro toma su nombre, y  $\omega_0$  es la frecuencia de corte deseada. Este polinomio de Bessel se obtiene a partir de la expresión,

$$\theta_n(s) = \sum_{k=0}^n a_k s^k$$

Donde

$$a_k = \frac{(2n - k)!}{2^{n-k} k! (n - k)!}, \quad K = 0, 1, 2, \dots, n.$$

La función de transferencia del filtro pasabajas Bessel de quinto orden es la siguiente:

$$H(s) = \frac{945}{s^5 + 15s^4 + 105s^3 + 420s^2 + 945s + 945}$$

La particularidad de la elección de un filtro Bessel de quinto orden yace en la característica de su comportamiento lineal, es decir que todos los componentes en la banda de paso de la señal (en este caso los componentes de frecuencias más bajas) sufrirán un retraso en el tiempo de igual magnitud y al mismo tiempo, no sufrirán distorsión alguna.

El modulador es alimentado en su entrada óptica con una señal continua derivada de un láser que se asume con un ancho de línea de 10 MHz y que está centrada a una longitud de onda de 1550 nm. Se le añade ruido Gaussiano blanco que permite controlar el nivel de SNR. Como se demostrará más adelante, la incorporación de este tipo de ruido no tuvo un impacto sustancial en los resultados obtenidos.

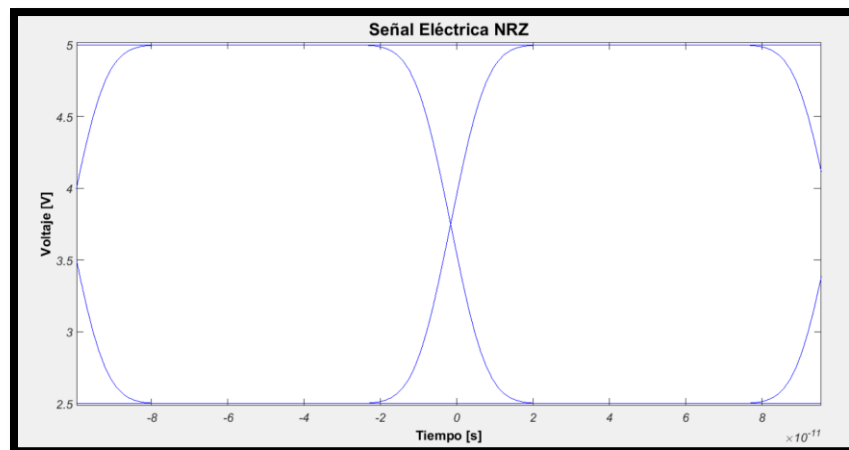
La señal óptica modulada se propaga por una fibra mono-modo modelada a partir de la conocida ecuación de onda, en la cual se omite el término no lineal, ya que, por el nivel de las potencias utilizadas, es bien conocido que no contribuye significativamente. Bajo esta aproximación la propagación de la señal en la fibra óptica pasa a ser una simple convolución de la señal con el sistema lineal que representa la dispersión de la fibra óptica. Dicha convolución se realiza en el dominio recíproco con la asistencia de módulos que efectúan la transformada rápida de Fourier. Para la simulación se consideró una fibra óptica que sigue las recomendaciones establecidas en la norma ITU-T G.652. Es decir, considerando que la señal se encuentra centrada en los 1550 nm, el coeficiente de dispersión utilizado fue de  $17 \left[ \frac{ps}{nm*km} \right]$ . Para el caso de esta simulación no se tomó en cuenta las pérdidas por atenuación dado que el enfoque del trabajo presente se centró únicamente en la respuesta de las señales ópticas polibinarias ante los efectos de dispersión cromática. A la salida de la fibra, la señal óptica se transforma en una señal

eléctrica con ayuda de un fotodetector de ley cuadrada. La señal eléctrica es procesada para determinar el desempeño del sistema, dependiendo del tipo particular de modulación de que se trate.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los tipos de modulación analizados.

## 4.2 Señal en formato NRZ

La generación de la señal óptica con modulación NRZ, tiene como punto de partida la generación de una señal digital PRBS que contiene  $10^{15}$  bits, la cual es transmitida a una tasa de 10 Gbps. Sus pulsos tienen como tiempos de subida y bajada el 20% de la duración total del bit, esto con el fin de obtener una respuesta más apegada a un escenario real. Para fines de simulación, la señal es muestreada a 64 muestras por cada bit generado, simulando con ello un tiempo de muestreo de  $6.4 \times 10^{11}$  muestras/s y teniendo un tiempo de duración de bit de 100 [ps]. La señal eléctrica que controla al modulador se muestra en la Fig. 4.2. Para obtener la señal óptica con modulación NRZ, el modulador MZM debe operar bajo la configuración de cuadratura, esto para poder replicar la señal moduladora eléctrica en la señal óptica de salida. Lo anterior se logra ya que se aprovecha la parte lineal de la función de transferencia del MZM. El diagrama de ojo de la señal óptica resultante del proceso de modulación con el MZM se muestra en la Figura 4.3, la cual es la señal óptica que será enviada posteriormente a la fibra óptica SMF.



*Figura 4.2 Señal moduladora para generación de señal NRZ, esta señal es la señal entrante al MZM para dar lugar a la modulación pertinente de la señal óptica. También se muestra el diagrama de ojo correspondiente.*

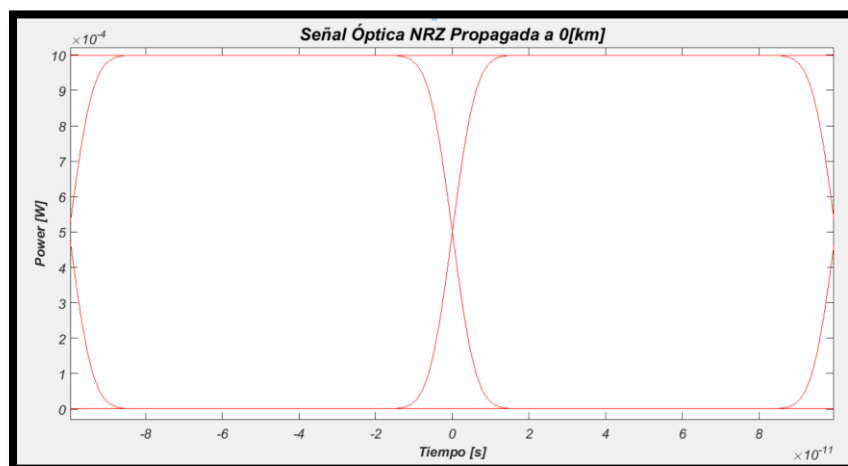


Figura 4.3 Diagrama de ojo de la señal óptica que se produce a la salida del modulador óptico.

En la figura 4.4 se puede observar el espectro de la señal NRZ en el dominio de la frecuencia, la cual se muestra centrada en 0 GHz, este punto representa la referencia del posicionamiento de la señal óptica portadora.

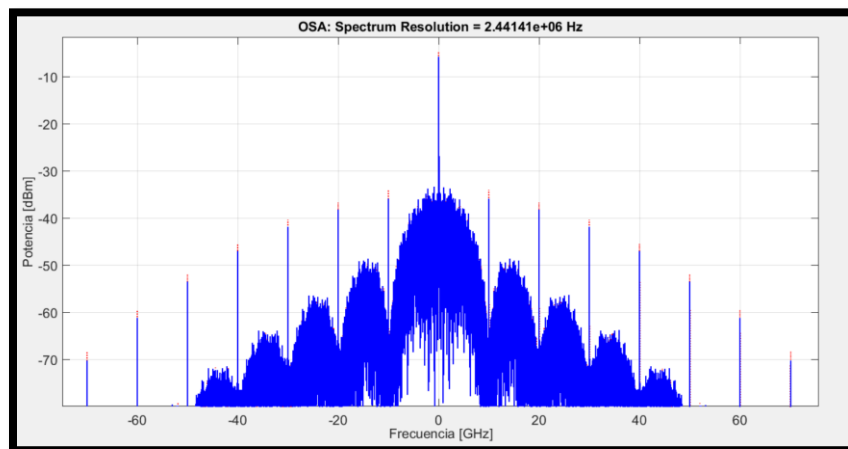


Figura 4.4 Espectro de la señal óptica a la salida del modulador.

A lo largo de la propagación de la señal NRZ óptica a través de la fibra óptica, se puede observar un fenómeno de deterioro debido a los efectos de dispersión cromática que produce la fibra sobre la señal, lo que repercute en una mayor dificultad para poder recuperar la información conforme mayor sea la distancia de propagación. Esto es fácil de observar debido a los diagramas de ojo resultantes y los cambios que va sufriendo la

señal a lo largo del trayecto, dependiendo de la distancia recorrida y en comparación con el caso back to back (B2B). Es evidente cómo la apertura de los ojos va siendo menor conforme la distancia de propagación aumenta, a tal grado que, pasando los 50 km, la recuperación de la señal sería complicada debido a la dificultad de diferenciar los dos niveles con un umbral decisión. Esto se puede observar en la Figura 4.5. Cabe recordar que el simular un umbral de decisión corresponde a realizar un proceso de recuperación de señal con detección directa implementando un simple fotodetector. Sin embargo, el utilizar diagramas de ojo sólo nos ofrece una manera cualitativa de determinar qué tanto la señal se va deteriorando.

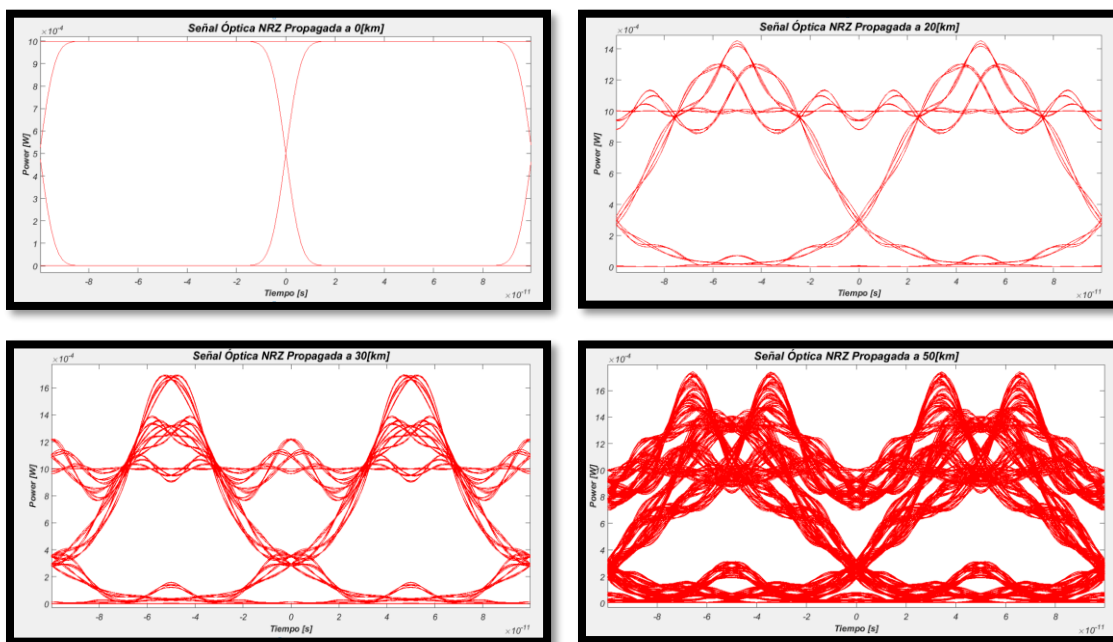


Figura 4.5 Diagramas de ojo de la señal óptica NRZ capturados a lo largo de la transmisión a través de la fibra óptica. Las distancias a las cuales fueron obtenidos son: 0, 20, 30 y 50 [km].

Para poder cuantificar la degradación de la señal a través de la propagación, se requiere otro tipo de análisis. El proceso habitual es mediante un conteo de bits, lo cual llevaría a comparar qué cantidad de bits que se han enviado coinciden con los bits recibidos del otro lado de la transmisión a través de la fibra, sin embargo, este método no es efectivo para el trabajo realizado, ya que, para poder tener valores aceptables o que puedan ser comparables con resultados obtenidos en otros trabajos de investigación, sería necesario la simulación de envíos muy grandes de información, lo cual es imposible en una simulación computacional. Por tanto, se optó por el camino de estimar un BER (Bit Error Ratio) mediante la aproximación de cálculo de probabilidad de error de bits. El proceso

de estimar un BER por medio de aproximaciones de probabilidad de error de la señal, se realiza de la siguiente manera:

1. En la señal propagada o transmitida se determinan umbrales de decisión, los cuales ayudan a decidir qué valor binario corresponde a la señal recibida, dependiendo si el valor de lo recibido se encuentra por encima o por debajo del umbral determinado.
2. La señal recibida se reacomoda en distintos arreglos dependiendo del número de niveles con los que cuenta la señal, de tal forma que se pueda determinar en cada uno de los arreglos una función de densidad de probabilidad con una distribución supuestamente normal (ver figura 4.6), con el fin de obtener parámetros estadísticos referentes a cada caso como lo serían la media, la varianza, la desviación estándar, etc.
3. De acuerdo a las funciones de densidad de probabilidad y los umbrales de decisión establecidos, se determina una probabilidad total de error al recibir los bits enviados originalmente. En otras palabras, se hace una estimación de la probabilidad de error de bit recibido respecto al bit enviado, contemplando al mismo tiempo probabilidades de error a priori y recurriendo al teorema de probabilidad total.

Los tres puntos antes descritos son seguidos en la estimación de la probabilidad de error de todos los casos de las señales ópticas analizadas en este trabajo, variando únicamente entre ellas en factores como el número de umbrales de decisión, la colocación de éstos dentro de los niveles de amplitud de la señal o bien en las probabilidades a priori para cada caso de señal óptica. Para el caso de la señal NRZ óptica sólo se requiere la colocación de un umbral de decisión debido a que la señal cuenta con dos niveles de amplitud de potencia óptica. Por lo que el acomodo de las funciones de densidad de probabilidad, así como el umbral quedaría como se ilustra en la Figura 4.6



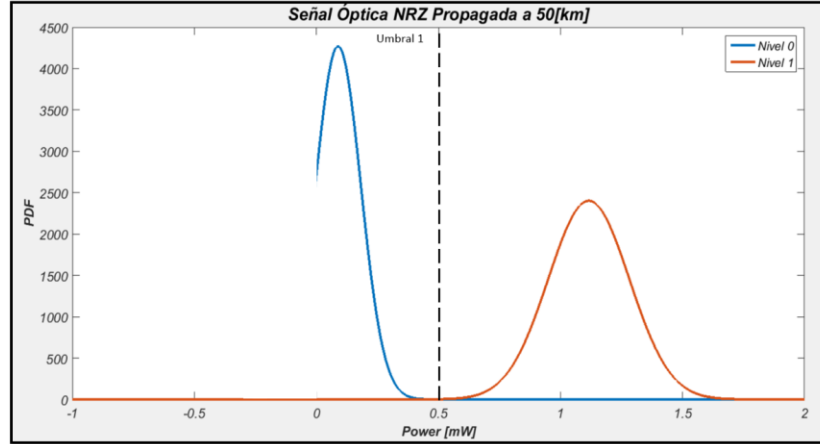


Figura 4.6 Funciones de distribución de probabilidad para la señal NRZ tras haber sido propagada 50 km.

Para desarrollar la expresión que determina la probabilidad de error se determina que las probabilidades a priori para el caso de la señal NRZ serán de  $\frac{1}{2}$  para cada uno de los dos niveles de la señal, posteriormente se determina la probabilidad de error total a partir de la siguiente fórmula:

$$P_{\text{error}} = P(b_0)P(e|b_0) + P(b_1)P(e|b_1)$$

donde las probabilidades a priori de cada uno de los dos posibles bits son  $P(b_0)$  y  $P(b_1)$  y  $P(e|b_0)$  y  $P(e|b_1)$  son las probabilidades condicionales que definen un error habiendo enviado ya sea un uno o un cero. Asumiendo que  $b_0$  y  $b_1$  son equiprobables, tenemos entonces que,

$$P_{\text{error}} = P(b_0)[P(e|b_0) + P(e|b_1)]$$

La expresión que describe la función de densidad de probabilidad con distribución normal está dada por:

$$P(b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

donde  $\sigma^2$  es la varianza de la función de distribución normal y  $\mu$  su media. El cálculo de la probabilidad de error de cada bit, estaría dado por el área que se encuentra del lado opuesto al límite que demarca cada umbral para cada uno de los bits, y cuya expresión está dada por la integral:

Bit 0

$$P(e|b_0) = \int_{x_{th}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} e^{-\frac{(x-\mu_0)^2}{2\sigma_0^2}} dx$$

Bit 1

$$P(e|b_1) = \int_{-\infty}^{x_{th}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} dx$$

Para poder simplificar el cálculo del error en la recepción de los bits, se puede hacer uso de la función de error complementaria, la cual parte de la función error o también conocida como función error de Gauss.

$$\text{erf}(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

La función de error complementaria es entonces:

$$\text{erfc}(t) = 1 - \text{erf}(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{x_{th}}^{\infty} e^{-t^2} dt$$

Para el caso que estamos analizando  $t = \frac{(x-\mu)}{\sqrt{2}\sigma}$  y por ende

$$dt = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma} dx$$

Sustituyendo en la integral queda:

$$\text{erfc}(t) = \text{erfc}\left(\frac{x_{th} - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)$$

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{xth}^{\infty} e^{-t^2} dt = \frac{2}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{xth}^{\infty} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

De esta expresión se puede observar que:

$$\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{xth}^{\infty} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = P(e|b)$$

El cálculo de la probabilidad de error total para una señal NRZ (dos bits) queda entonces de la siguiente forma:

$$P_{\text{error}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth - \mu_0}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_1 - xth}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) \right)$$

Una vez que se desarrolló la expresión adecuada y la programación para el cálculo de probabilidad de error en la simulación de transmisión de la señal óptica, se llevó a cabo un seguimiento del comportamiento de la probabilidad de error de la señal óptica a lo largo de la fibra. El monitoreo se hizo para conocer una probabilidad de error de la señal para cada 100 m y se puede observar en la Figura 4.7.

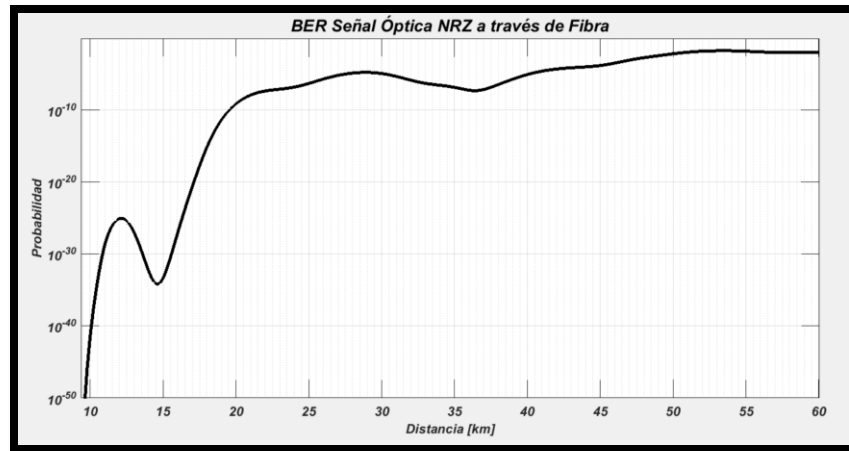


Figura 4.7 Seguimiento del comportamiento de la señal óptica NRZ a lo largo de la fibra óptica (BER vs distancia).

Cabe destacar que en la figura 4.7 la gráfica que muestra el comportamiento del BER de la señal NRZ a partir de los 8 km, esto se debe a que, a una distancia menor a ésta,

la probabilidad de error de la recepción de la señal son valores tan bajos que su interpretación no cobra mucho sentido, por lo que se puede asumir que antes de los 8 km, el BER es prácticamente cero. De manera semejante, los valores de BER por debajo de aproximadamente  $10^{-15}$  son más bien indicativos del comportamiento del sistema y no deben tomarse de manera literal, ya que son resultado de cómo se está evaluando estadísticamente el resultado de la simulación. De acuerdo a la Fig. 4.7, el comportamiento general del BER es que aumenta conforme se incrementa la distancia de propagación, presentando un valor cercano a  $10^{-10}$  a alrededor de 20 km. A mayores distancias el desempeño del sistema no es muy bueno.

### **4.3 Simulación de señales duobinarias de 2 niveles**

La simulación de la generación de la señal duobinaria de dos niveles parte de la señal NRZ digital con características semejantes a las descritas en el capítulo anterior. Posteriormente, los pasos a seguir para la generación de dicha señal son los descritos en el capítulo 3, destacando el uso de un filtro pasa bajas Bessel de quinto orden con frecuencia de corte de 3 GHz; es decir, de 0.3 veces la tasa de transmisión de la señal original, que cabe recordar, es de 10 Gbps. Aunque algunas investigaciones recomiendan una frecuencia de corte en el filtro polibinario para 3 niveles cercano a 0.25 veces de la tasa de transmisión, se ha corroborado que una frecuencia de corte del filtro polibinario para 3 niveles a 0.3 veces la tasa de transmisión aporta un mejor resultado para la estimación de la calidad de la señal, aun cuando esto represente un ancho espectral mayor en comparación con una señal filtrada a 0.25 veces la tasa de bits. La señal resultante del proceso de generación de señal polibinaria moduladora en el dominio eléctrico se muestra en la Figura 4.8.

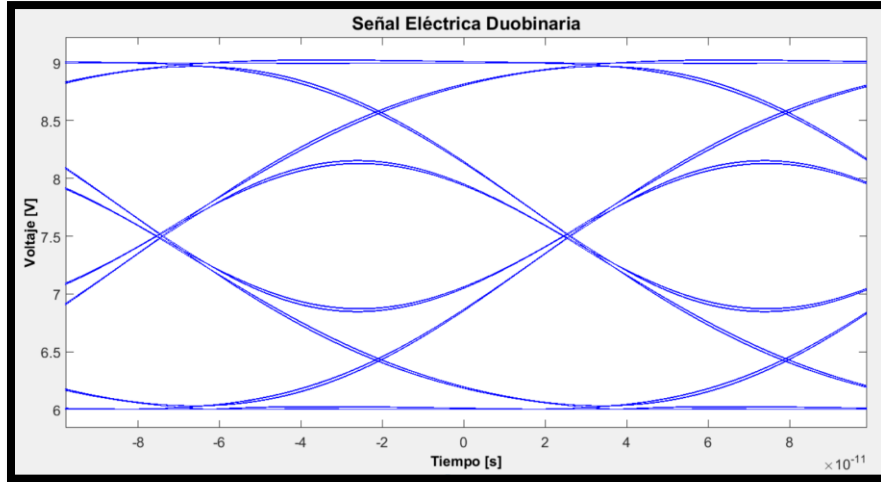


Figura 4.8 Diagrama de ojo de la señal eléctrica que alimenta al modulador para generar una señal duobinaria,

La señal moduladora duobinaria de 2 niveles hace uso de un MZM operando bajo configuración de push-pull y dentro de un rango de operabilidad referente al punto nulo. Por ende, es que la señal moduladora oscila entre niveles de 0 y 5 [V]. La señal óptica resultante del proceso de modulación se muestra en la Fig. 4.9 como diagrama de ojo. Debido al proceso de detección directa el ojo se asemeja al producido por la modulación NRZ.

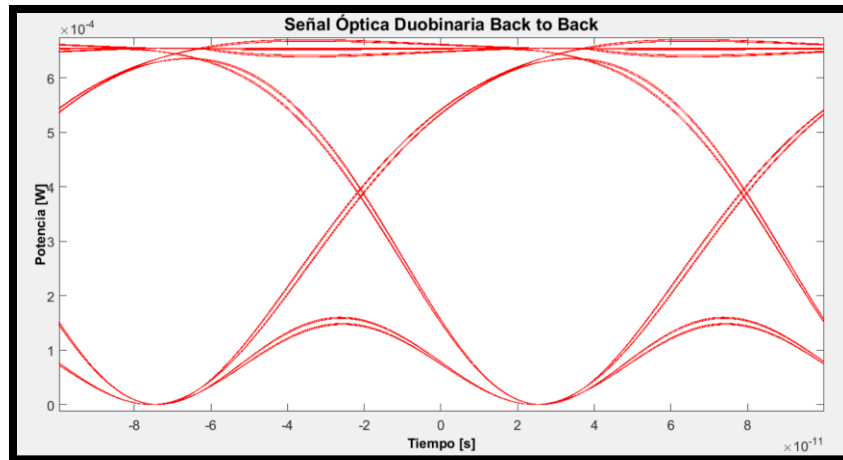


Figura 4.9 Diagrama de ojo de la señal óptica duobinaria de dos niveles antes de ser propagada por la fibra óptica.

El espectro óptico de la señal duobinaria de 2 niveles (ver figura 4.10) es mucho más angosto que el espectro de una señal óptica NRZ (figura 4.4). Esto se puede observar

muy claramente a una potencia de -80 dBm en donde en el caso de la señal duobinaria se tiene un ancho espectral por debajo de los 20 GHz, en comparación con los casi 100 GHz de ancho espectral para la misma potencia en la señal NRZ.

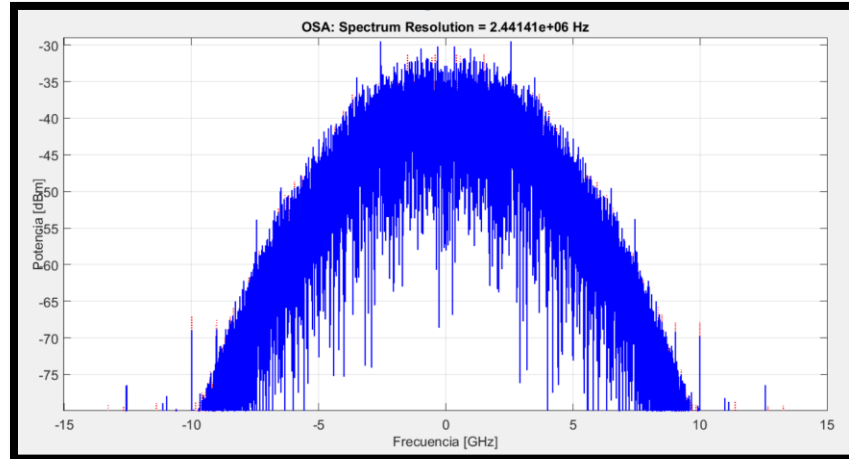


Figura 4.10 Espectro de la señal óptica duobinaria de 2 niveles

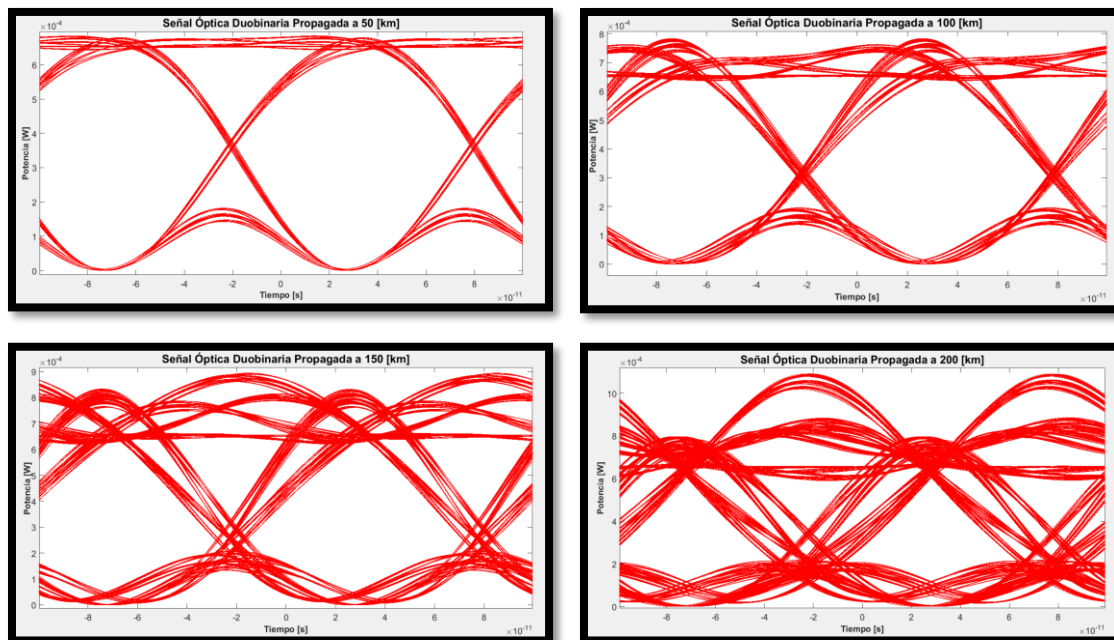
Dado que el caso para la señal duobinaria de 2 niveles en amplitud de potencia óptica tiene un método de recepción similar al caso de la señal NRZ, la simulación de la recuperación de la señal se puede simular mediante detección directa, es decir, haciendo uso de un solo umbral de decisión. Para hacer la estimación de probabilidad de error en la recepción de la señal, se estimó el cálculo de este mediante un proceso idéntico al caso de las señales NRZ, debido a que esta señal duobinaria, como el caso NRZ, cuenta con sólo dos niveles de amplitud, simplificando de esta manera el cálculo de probabilidad de error total. Por esta misma razón, la probabilidad a priori para cada uno de los niveles de amplitud de la señal es de  $\frac{1}{2}$ , quedando la expresión que representa el BER de la señal prácticamente idéntica al caso de NRZ, es decir:

$$P_{error} = P(b_0)P(e|b_0) + P(b_1)P(e|b_1)$$

$$P_{error} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{x_{th} - \mu_0}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_1 - x_{th}}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) \right)$$

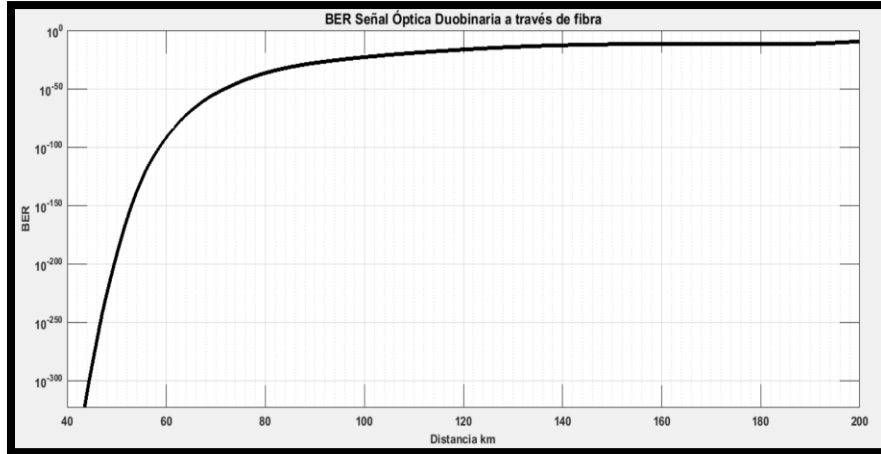
La señal óptica a la salida del MZM, es propagada a través de una fibra SMF-28 con las características. A continuación, se muestra el comportamiento de la señal para el caso de formato de modulación polibinaria para dos niveles a distintas distancias (Figura 4.11). Se puede observar cómo es que la señal se va deteriorando mediante su

propagación a lo largo de la fibra. La señal óptica es afectada por la dispersión cromática y la apertura de los diagramas de ojo capturados a cada instante es menor conforme aumenta la distancia de propagación.



*Figura 4.11 Diagramas de ojo de la señal óptica duobinaria de 2 niveles propagada a través de la fibra óptica, los diagramas de ojo son recuperados a las distancias de: 50, 100, 150 y 200 [km]*

Posteriormente se hizo un análisis y recopilación de información para el cálculo de BER a distintas distancias para este formato de modulación polibinaria a lo largo de 200 km, obteniendo el comportamiento de BER que se observa en la Figura 4.12



*Figura 4.12 Comportamiento del BER de la señal óptica duobinaria de 2 niveles a lo largo de su propagación a través de la fibra óptica a distintas distancias.*

Se puede observar en la figura del comportamiento de BER, que para el caso de la propagación de la señal duobinaria de 2 niveles la distorsión por efecto de la dispersión cromática propia de la fibra óptica tiene un efecto mucho menor a lo largo de la fibra óptica comparado con el caso NRZ; es decir, se puede observar y medir la robustez que presenta este formato de modulación óptica ante efectos de dispersión, llegando a tener incluso a la distancia de 198 km un BER estimado de  $1 \times 10^{-11}$ , valor que contrasta totalmente con el obtenido en el caso de NRZ cuyo mismo valor de BER se obtuvo a la corta distancia de 19 km.

#### 4.4 Simulación de señales duobinarias de 3 niveles

En el caso de la señal duobinaria generada a partir del modo de operación en cuadratura del MZM, se tienen tres niveles distintos en amplitud de potencia óptica, así como eléctrica, una vez que la señal ha sido detectada; esto lleva a que el análisis del comportamiento de este tipo de señal óptica se efectúe de manera diferente a lo que se había analizado con los casos de NRZ y el duobinario con operación de MZM en punto nulo. Dentro de las principales diferencias que se deben considerar para este caso se encuentra el tener dos distintos umbrales de decisión para poder estimar adecuadamente una probabilidad de error, a la vez que se debe considerar la probabilidad a priori de cada nivel en amplitud que conlleva este tipo de señal. A continuación se explica el desarrollo de la expresión que permite el cálculo de la probabilidad de error en la recepción de la señal óptica, esta expresión que se desarrolla de manera similar a la desarrollada para dos niveles de amplitud, también se considera como un punto de partida para el caso donde se presentan más de dos niveles en amplitud óptica, los cuales serán los casos, por ejemplo, de las señales ópticas



polibinarias con más de 3 niveles que se simularon y serán explicadas en los capítulos consecuentes.

La Fig. 4.13 muestra las funciones de distribución de probabilidad, así como la colocación de los dos umbrales necesarios para hacer el cálculo de la probabilidad para los tres niveles de potencia que se detectan para este caso particular de modulación. El desarrollo de la expresión para el cálculo de la probabilidad de error de la señal en la recepción, tienen como base la distribución de función de probabilidades obtenidas de los 3 niveles de la señal y los dos umbrales de decisión correspondientes para discriminar adecuadamente dichos niveles.

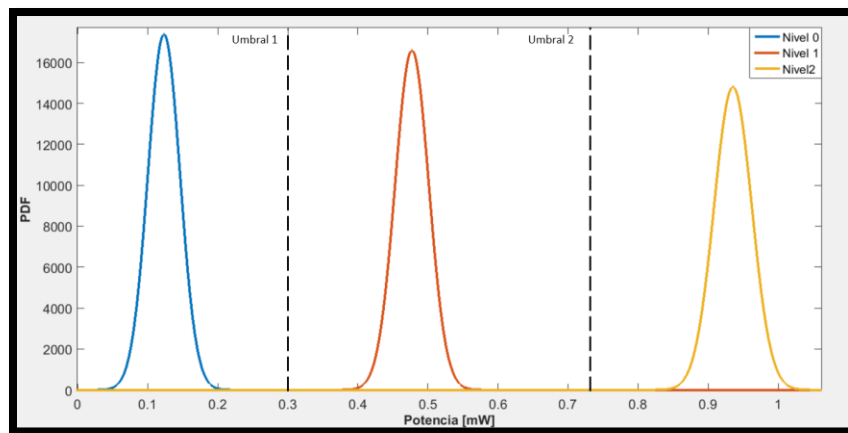


Figura 4.13 Funciones de distribución de probabilidad junto con los 2 umbrales de decisión, para el caso de señal duobinaria de 3 niveles.

La expresión matemática en sí, está dada de la siguiente manera:

$$P_{\text{error}} = P(b_0)P(e|b_0) + P(b_1)P(e|b_1) + P(b_2)P(e|b_2)$$

De donde,

Bit 0

$$P(e|b_0) = \int_{x_{th1}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} e^{-\frac{(x-\mu_0)^2}{2\sigma_0^2}} dx$$

Bit 1

$$P(e|b_1) = \int_{-\infty}^{xth_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} dx + \int_{xth_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} dx$$

Bit 2

$$P(e|b_2) = \int_{-\infty}^{xth_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}} e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} dx$$

Tomando como referencia lo desarrollado en el caso de NRZ, y otorgando una probabilidad a priori de los 3 niveles de  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{1}{4}$  respectivamente, tendremos entonces que:

$$P_{error} = \frac{1}{4} \left( \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_1 - \mu_0}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) \right) + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_1 - xth_1}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_2 - \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) \right] + \frac{1}{4} \left( \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_2 - xth_2}{\sqrt{2}\sigma_2} \right) \right)$$

Simplificando entonces llegamos a la expresión:

$$P_{error} = \frac{1}{8} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_1 - \mu_0}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) + \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_1 - xth_1}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_2 - \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) \right] + \frac{1}{8} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_2 - xth_2}{\sqrt{2}\sigma_2} \right)$$

En la Fig. 4.14 se muestra la señal moduladora y su correspondiente diagrama de ojo en el dominio eléctrico, que se utiliza para controlar al MZM, logrando con eso la modulación del haz CWL. Esta señal moduladora debe tener una oscilación máxima de 2.5 [V] para poder operar dentro de la zona lineal y correspondiente a la operación en cuadratura del MZM, sin embargo, se observó que acortando este dominio en 1 [V] para poder operar en una zona con mayor efecto lineal, se obtuvieron mejores resultados en la calidad de las señales ópticas generadas, es por ello que el barrido de la señal eléctrica moduladora para este caso y en todos los posteriores en donde se requirió una operación en cuadratura, se hizo en el rango eléctrico de 3[V] a 4.5[V].

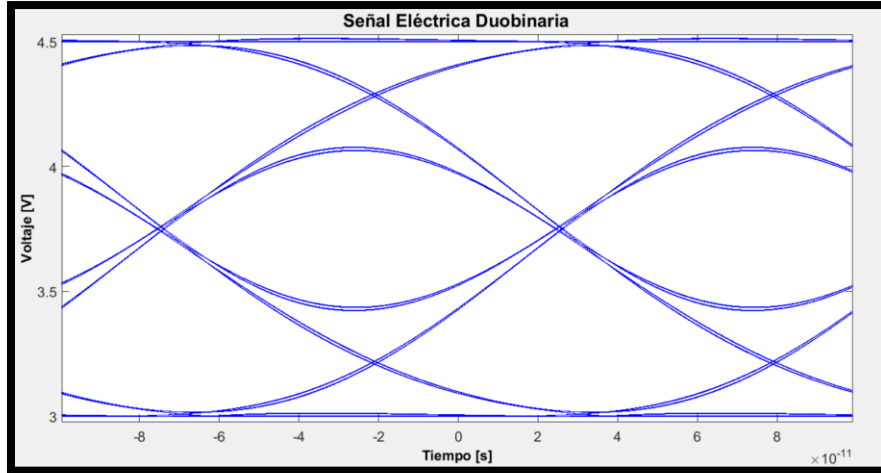


Figura 4.14 Señal moduladora con codificación duobinaria de 3 niveles, con diagrama de ojo representativo en una etapa previa a la entrada del MZM.

La señal óptica resultante a la salida del modulador se muestra como diagrama de ojo en la figura 4.15. Se puede observar un comportamiento muy similar al de la señal moduladora, sin embargo, en este caso la señal ya se encuentra en el dominio óptico y es la señal que será enviada a través de la fibra óptica SMF 28 para el análisis ante las distorsiones por efectos de dispersión cromática. La Fig. 4.16 muestra el espectro de la señal.

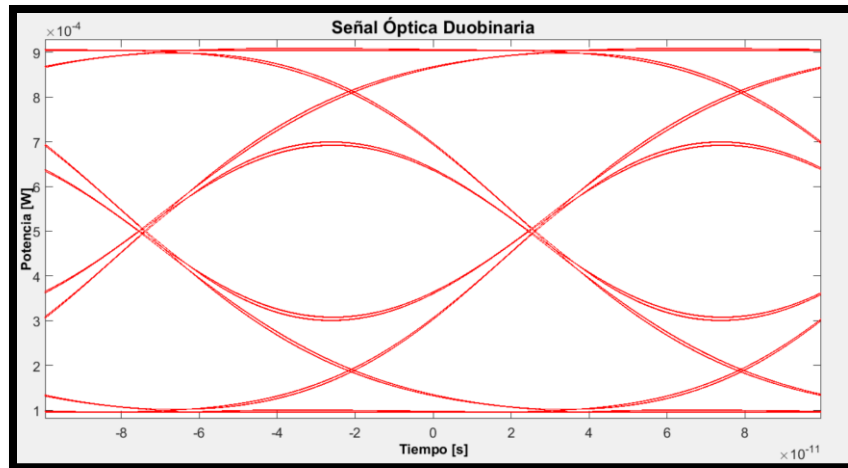
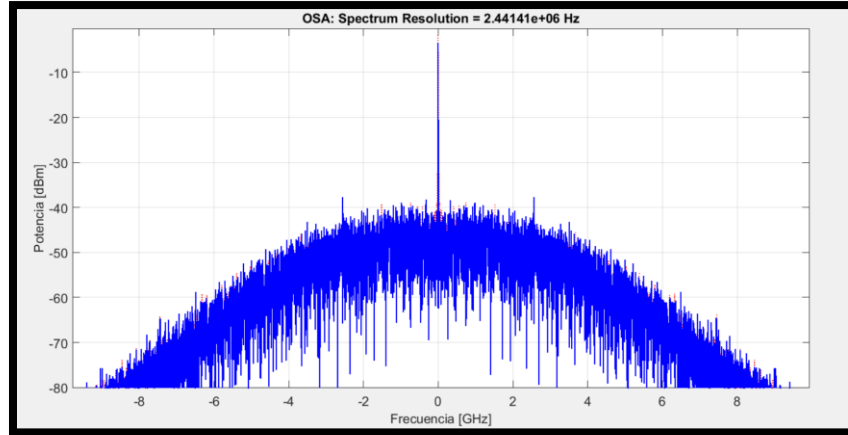
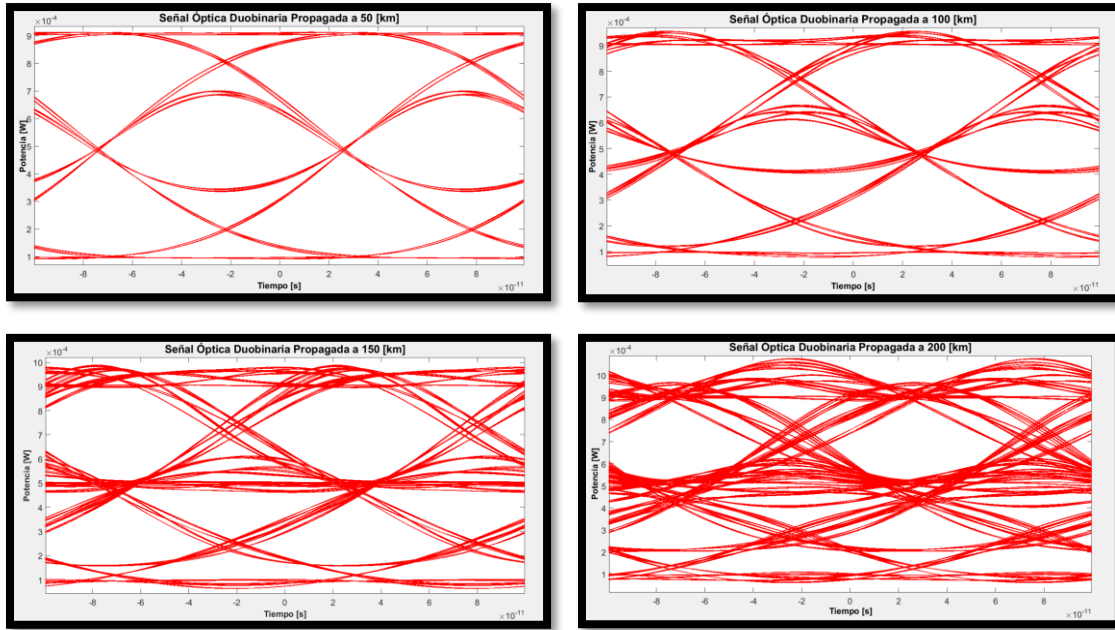


Figura 4.15 Diagrama de ojo de señal óptica duobinaria de 3 niveles a la salida del MZM, etapa previa al envío por la fibra óptica.



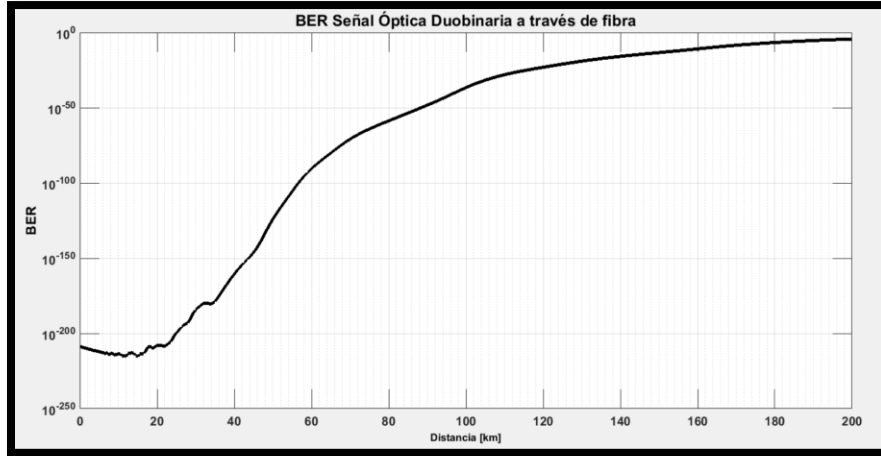
*Figura 4.16 Espectro de la señal óptica duobinaria de 3 niveles previa a ser transmitida a la fibra óptica (B2B).*

El comportamiento de la señal óptica a través de su propagación por la fibra óptica se puede observar y analizar de manera cualitativa gracias a los diagramas de ojos obtenidos a lo largo del trayecto como se muestra en la Fig. 4.17. Es evidente, nuevamente la resistencia que tiene este formato de modulación antes los efectos de dispersión cromática, al igual que los observados para el caso de modulación duobinaria de dos niveles, contrastando con la poca distancia alcanzada con buena calidad que se obtiene con una modulación NRZ.



*Figura 4.17 Diagramas de ojo de la señal duobinaria de 3 niveles a lo largo de distintas distancias: 50, 100, 150 y 200 km. En ellos se logra observar cómo se van cerrando los ojos conforme la distancia de propagación va creciendo.*

El comportamiento general reportado a lo largo de la transmisión de la señal duobinaria de 3 niveles se observa en las Fig. 4.18 que muestra el valor de BER a lo largo de la fibra a través de 200 km. Es de peculiar interés observar que el caso de la señal duobinaria de 3 niveles presenta un comportamiento de mayor calidad hasta antes de los 160 km, y en los últimos 40 km decae considerablemente la calidad de la señal en comparación con la señal duobinaria de 2 niveles.



*Figura 4.18 Comportamiento de la señal óptica duobinaria de 3 niveles con base en su BER estimado para cada distancia recorrida, propagada a través de la fibra óptica*

#### **4.5 Simulación de señales polibinarias 1**

La primera señal óptica con formato de modulación polibinaria que se analizó en este trabajo, fue la generada a partir de la operación del MZM en cuadratura e implementación de un filtro pasa bajas Bessel de 5to orden, cuyo ancho de banda se estableció a un 50% del bitrate de la señal.

Para el análisis adecuado del comportamiento a lo largo de la fibra óptica de esta señal polibinaria de 5 niveles ópticos en amplitud, se requirió establecer 4 umbrales de decisión en la parte de simulación de recepción de la señal, esto con el fin de poder diferenciar los 5 niveles y llevar a cabo un proceso semejante al que se llevó en el caso de la señal duobinaria de 3 niveles. Los umbrales se colocaron de acuerdo a como se puede observar en la Figura 4.19 que muestra un diagrama de ojo característico de este formato de modulación.

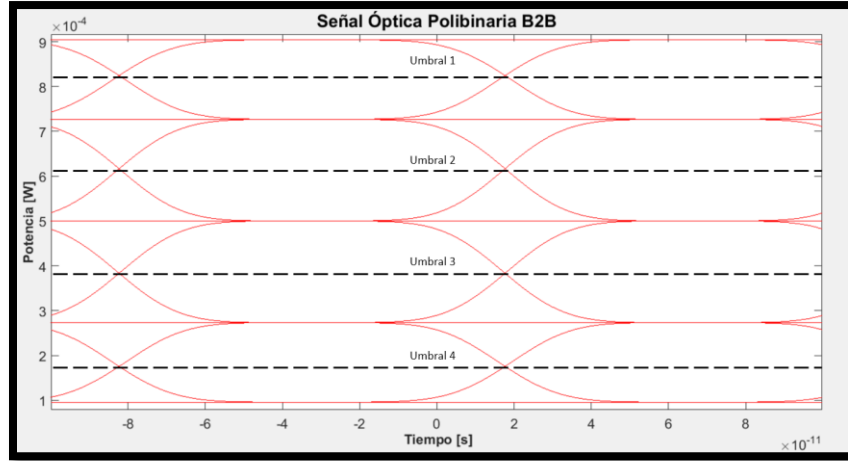


Figura 4.19 Diagrama de ojo de la señal óptica con formato polibinario denominado como Polibinario 1, con la colocación de umbrales de decisión a partir de los cuales se formaron las funciones de densidad de probabilidad.

Para el desarrollo de la expresión matemática que nos facilitará la obtención de una probabilidad de error en la recepción de la señal se desarrolla de manera similar a las que se obtuvieron para casos anteriores de señales ópticas multinivel. Así mismo, se asignan los valores de probabilidad a priori para cada uno de los 5 niveles ópticos de potencia. El desarrollo entonces de la expresión es el siguiente:

$$Error = P(b_0)P(e|b_0) + P(b_1)P(e|b_1) + P(b_3)P(e|b_3) + P(b_4)P(e|b_4) + P(b_5)P(e|b_5)$$

De donde,

Bit 0

$$P(e|b_0) = \int_{x_{th1}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} e^{-\frac{(x-\mu_0)^2}{2\sigma_0^2}} dx$$

Bit 1

$$P(e|b_1) = \int_{-\infty}^{x_{th1}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} dx + \int_{x_{th2}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} dx$$

Bit 2

$$P(e|b_2) = \int_{-\infty}^{xth_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}} e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} dx + \int_{xth_3}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}} e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} dx$$

Bit 3

$$P(e|b_3) = \int_{-\infty}^{xth_3} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_3^2}} e^{-\frac{(x-\mu_3)^2}{2\sigma_3^2}} dx + \int_{xth_4}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_3^2}} e^{-\frac{(x-\mu_3)^2}{2\sigma_3^2}} dx$$

Bit 4

$$P(e|4) = \int_{-\infty}^{xth_4} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_4^2}} e^{-\frac{(x-\mu_4)^2}{2\sigma_4^2}} dx$$

Asignando las probabilidades a priori referentes a los 5 niveles de amplitud respectivamente:  $\frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$  y  $\frac{1}{8}$ , dichas probabilidades se asignan de esta manera debido a que la probabilidad total de 1 se divide en  $\frac{1}{2}$  para los valores originales a recuperar 0 y  $\frac{1}{2}$  para los valores 1, dado que los niveles 1 y 3 llevan los valores 1, la probabilidad de  $\frac{1}{2}$  se divide equitativamente en  $\frac{1}{4}$  para cada uno de estos dos niveles. Por otro lado los niveles 0, 2 y 4, llevan los bits 0 originales, la probabilidad en este caso se divide en 3, sin embargo, el nivel medio posee una probabilidad del doble respecto a los niveles de los extremos (LENDER 1964), por lo que las probabilidades para dichos niveles quedan como:  $\frac{1}{8}, \frac{1}{4}$  y  $\frac{1}{8}$ , de esta manera la suma de todas las probabilidades a priori nos da el 1 total. De acuerdo a lo anterior la expresión que describe la probabilidad total de error queda entonces como:



$$\begin{aligned}
Perror = & \frac{1}{8} \left( \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_1 - \mu_0}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) \right) + \frac{1}{4} \left[ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_1 - xth_1}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_2 - \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) \right] + \\
& \frac{1}{4} \left[ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_2 - xth_2}{\sqrt{2}\sigma_2} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_3 - \mu_2}{\sqrt{2}\sigma_2} \right) \right] + \frac{1}{4} \left[ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_3 - xth_3}{\sqrt{2}\sigma_3} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_4 - \mu_3}{\sqrt{2}\sigma_3} \right) \right] + \\
& \frac{1}{8} \left( \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_4 - xth_4}{\sqrt{2}\sigma_4} \right) \right)
\end{aligned}$$

Simplificando entonces llegamos a la expresión:

$$\begin{aligned}
Perror = & \frac{1}{16} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_1 - \mu_0}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) + \frac{1}{8} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_1 - xth_1}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_2 - \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) \right] + \\
& \frac{1}{8} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_2 - xth_2}{\sqrt{2}\sigma_2} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_3 - \mu_2}{\sqrt{2}\sigma_2} \right) \right] + \frac{1}{8} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_3 - xth_3}{\sqrt{2}\sigma_3} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_4 - \mu_3}{\sqrt{2}\sigma_3} \right) \right] + \frac{1}{16} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_4 - \mu_4}{\sqrt{2}\sigma_4} \right)
\end{aligned}$$

La señal eléctrica moduladora para obtener la señal polibinaria óptica de 5 niveles descrita en este capítulo se observa en la Figura 4.20, es clara la existencia de los 5 niveles en la señal eléctrica, los cuáles dan lugar a los 5 niveles en la señal óptica a la salida del MZM.

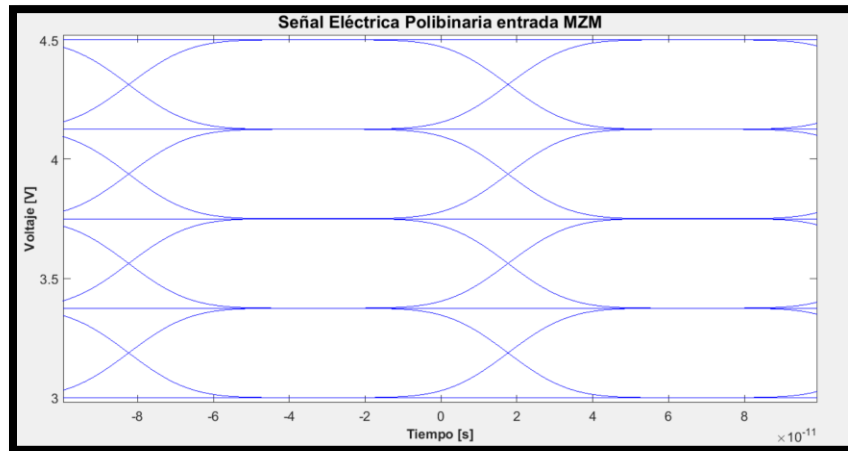


Figura 4.20 Diagrama de ojo de señal moduladora Polibinaria 1 a la entrada del MZM.

La señal óptica a la salida del MZM y previo al envío a la fibra óptica es la que se observa en la figura 4.21. Se puede observar que la señal óptica es una reproducción de la señal moduladora que se encuentra en el campo eléctrico debido a la operación del MZM en cuadratura. El espectro de esa misma señal se puede observar en la Fig. 4.22, en la que

se observa que a la potencia de -40dBm alcanza un ancho espectral menor a 5 GHz y a los -80 dBm tiene un ancho espectral menor a los 50 GHz.

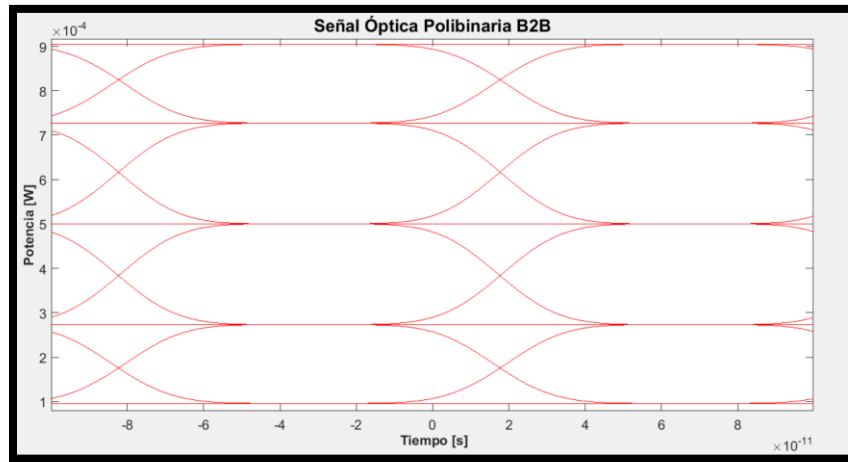


Figura 4.21 Diagrama de ojo de la señal óptica con formato polibinario denominado como Polibinario 1, a la salida del MZM, etapa previa a la propagación a través de la fibra óptica.

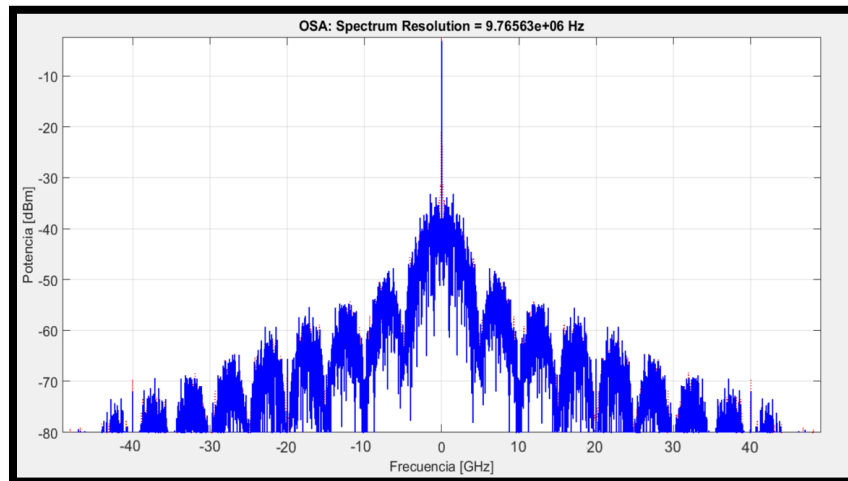


Figura 4.22 Espectro de la señal Polibinaria 1.

A continuación, se muestra el comportamiento de la señal óptica a través de la propagación en la fibra por medio de los diagramas de ojo obtenidos a distintas distancias. Ver Fig. 4.23. Se puede observar cómo es que a partir de los 75 km el efecto de dispersión cromática ejerce un efecto de deterioro considerable sobre la señal, a tal punto que para la distancia de los 100 km ya la apertura de los ojos entre niveles es muy reducida, resultando en una estimación de BER muy alto.

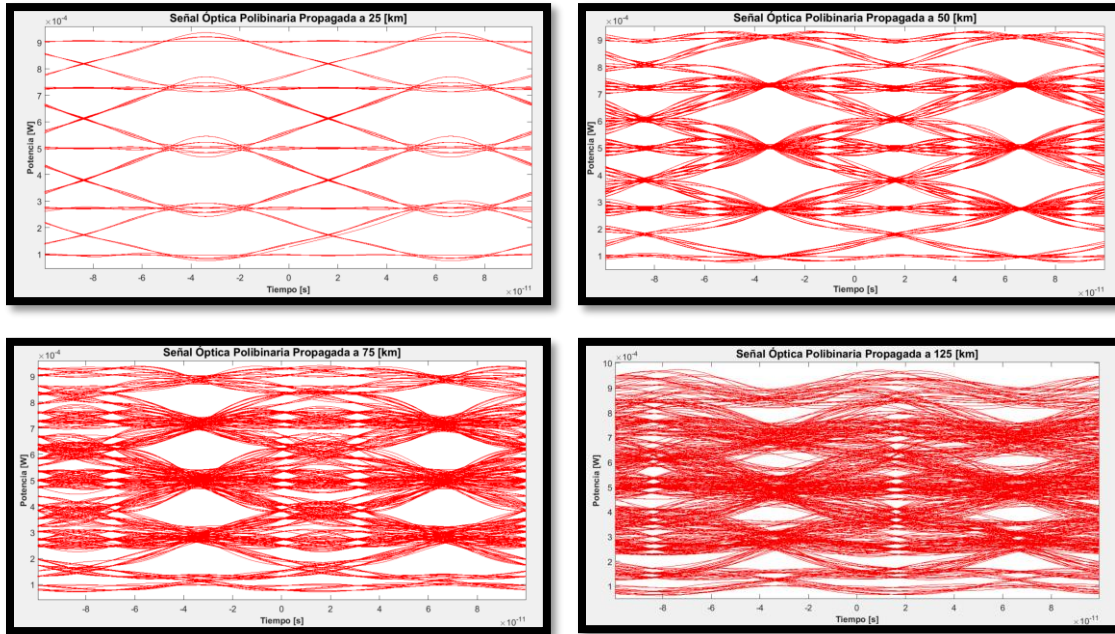
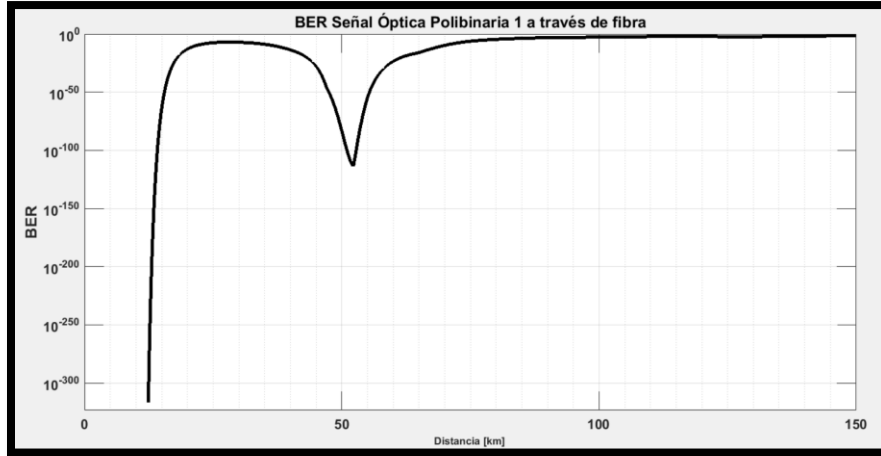


Figura 4.23 Diagramas de ojo de la señal óptica con formato de modulación Polibinario 1 a través de distintas distancias de propagación en la fibra óptica: 25, 50, 75 y 125 [km]

En las Figuras 4.24 se puede observar el comportamiento de la calidad de la señal óptica polibinaria a través de la fibra óptica, es evidente el rápido deterioro que tiene antes de los 20 km, presentando un comportamiento semejante al de la señal NRZ, esto es debido a que esta señal sólo cuenta con un 50% de filtrado a través del filtro Bessel pasa bajas, permitiendo que exista una mayor cantidad de componentes ópticas de altas frecuencias sobre las cuales la dispersión cromática tiene mayor efecto de deterioro de la señal. Es evidente el fenómeno anómalo que se presenta en la distancia de propagación comprendida entre los 40 y 60 km de distancia de la fibra óptica. Las simulaciones se reprodujeron en distintas ocasiones y cambiando distintos parámetros como el punto de muestreo de la señal, la variación del ancho de banda del filtro polibinario, así como, la amplitud del rango de trabajo del modulador MZM, sin embargo, el resultado presentado en la Figura 4.24, fue el mejor de todas estas variaciones de configuraciones de operabilidad del sistema. Aunque los resultados arrojan que a los 55 km se presenta un BER muy similar a la distancia de 3 km de propagación, no podemos asegurar que en una transmisión no simulada, dichos resultados se den de esta manera, ya que este comportamiento no concuerda con alguna de las hipótesis esperadas a partir de la teoría de propagación en fibras ópticas sin no linealidades.



*Figura 4.24 Comportamiento de la señal Polibinaria 1 a través de la propagación dentro de la fibra óptica a lo largo de 150 km, con base en el BER para cada punto recorrido.*

#### 4.6 Simulación de señales polibinarias 2

La segunda señal polibinaria que se analiza en este trabajo se trata de una señal con características semejantes a la primera: codificación adecuada para generar una señal moduladora de 5 niveles de amplitud y un uso de un filtro pasabajas Bessel de 5to orden cuyo ancho de banda es del 50% de la tasa de transmisión de la señal. Sin embargo, la diferencia recae sobre el modo de operación del MZM, ya que para el caso de esta señal polibinaria, se utiliza el MZM en operación sobre la región de punto nulo. Dando lugar como se explicó en el capítulo tres, a tener a la salida del MZM tan sólo 3 niveles distintos en amplitud de potencia a diferencia de los 5 entrantes desde la señal moduladora en el campo eléctrico. Por lo anterior, nos lleva a poder realizar un análisis de la calidad de la señal semejante al caso de la señal duobinaria de 3 niveles y por tanto utilizar la fórmula correspondiente para el cálculo de la probabilidad de error.

En la figura 4.25 se puede observar la señal eléctrica moduladora del MZM, nótese que es similar a la señal para el caso de la señal polibinaria de 5 niveles que denominamos como “polibinaria 1”, sin embargo, el dominio de la señal es distinto, precisamente con el fin de que el MZM pueda operar únicamente en la región de punto nulo.

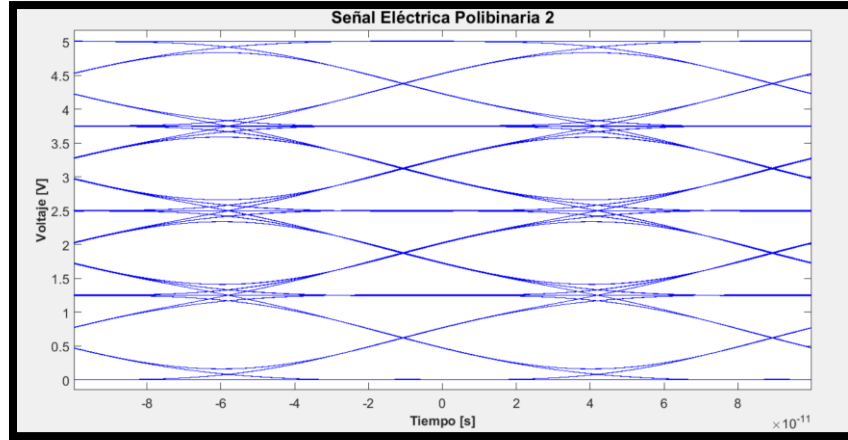


Figura 4.25 Diagrama de ojo de la señal moduladora Polibinaria 2 en el dominio eléctrico, lista para entrar al MZM.

En la figura 4.26 se puede observar la señal óptica a la salida del MZM justo antes de ser dirigida hacia la fibra óptica. El diagrama de ojo de la señal nos muestra que incluso antes de ser enviada por la fibra y sin la existencia de efectos de dispersión cromática, la señal ya cuenta con un deterioro significativo en el nivel medio de la señal, ya que la codificación y el filtrado para dar lugar a este formato, generan un *jitter* significativo en el nivel de amplitud media, dando un resultado de una calidad de señal baja incluso antes de ser expuesta ante las distorsiones por dispersión cromática.

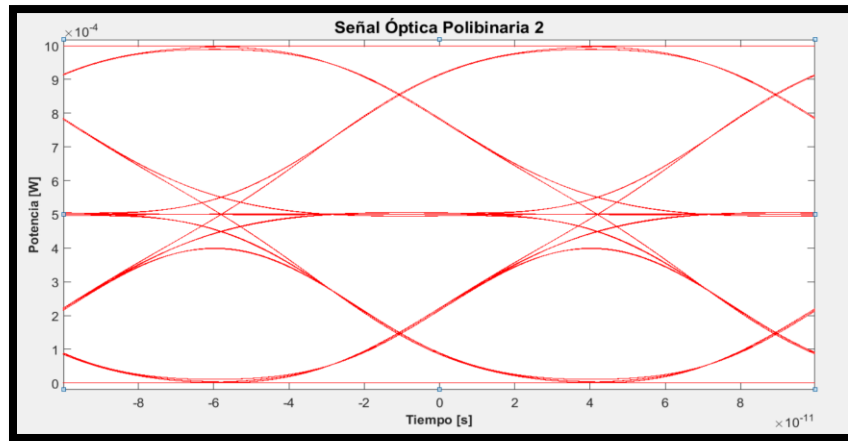
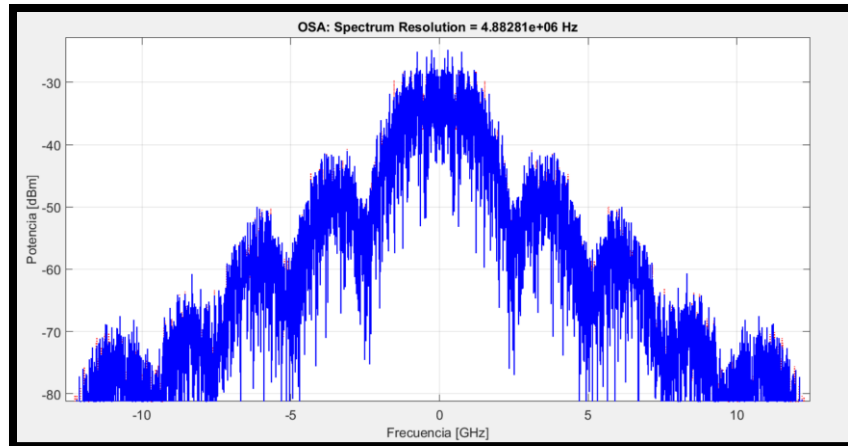


Figura 4.26 Diagrama de ojo de la señal Polibinaria 2 a la salida del MZM. Se puede observar que la señal óptica ya sólo cuenta con 3 niveles de amplitud a diferencia de la señal moduladora que tiene 5 niveles.

En el espectro de la señal Polibinaria 2, Figura 4.27, se puede observar que el ancho espectral obtenido a una potencia de -40 dBm está por debajo de los 5GHz, así como a una potencia de -80dBm este espectro se amplía a sólo 25 GHz quedando por debajo de los espectros obtenidos para las señales duobinarias y NRZ.



*Figura 4.27 El espectro de la señal Polibinaria 2*

El comportamiento de la señal polibinaria 2 a través de la propagación por la fibra óptica se puede analizar de manera cualitativa a través de los diagramas de ojo obtenidos y mostrados en la Fig. 4.28. En estos se ve que la apertura de los ojos entre nivel se cierra de manera paulatina conforme la luz recorre la fibra, es decir, aunque desde un inicio se llega a estimar una mala calidad de la señal debido al jitter significativo existente en el nivel de amplitud medio, la señal en general tiene un deterioro menor por cada kilómetro que recorre en comparación con la señal NRZ, o bien con la señal polibinaria 1.

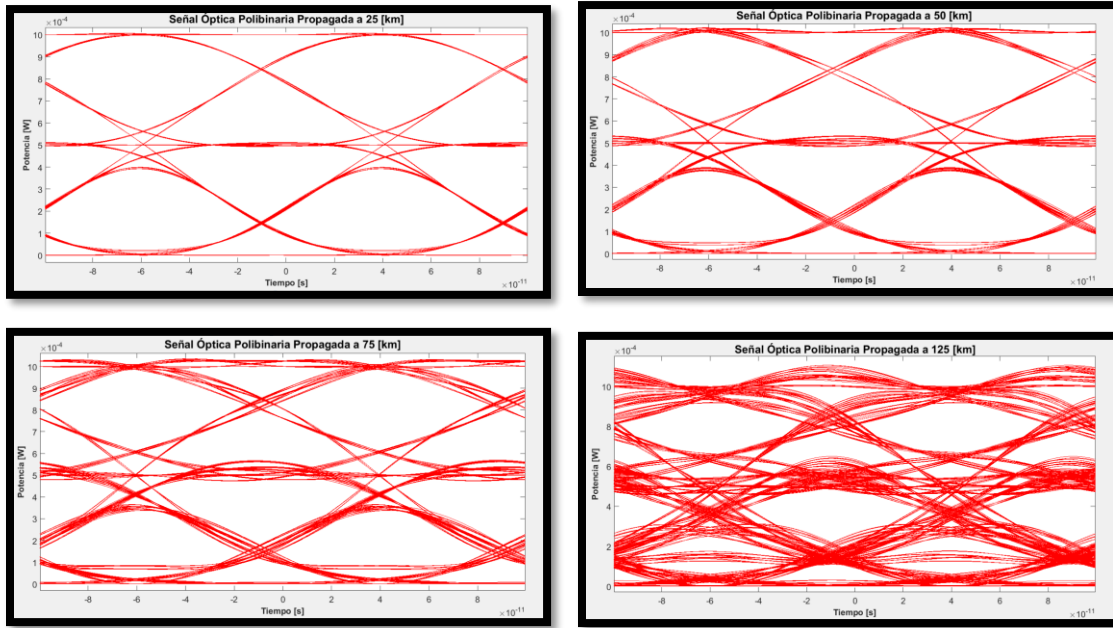


Figura 4.28 Diagramas de ojo de la señal Polibinaria 2 obtenidos a 25, 50, 75 y 125 km de propagación a través de la fibra óptica.

El comportamiento del deterioro de la calidad de la señal a lo largo de la propagación, también se puede observar en las funciones de densidad de probabilidad obtenidas y que se muestran en la Figura 4.29. En estas se observa que conforme la propagación de la señal óptica avanza, las campanas obtenidas se ensanchan más a tal grado que se acercan a los umbrales de decisión, lo que se interpreta como una disminución en la calidad de la señal.

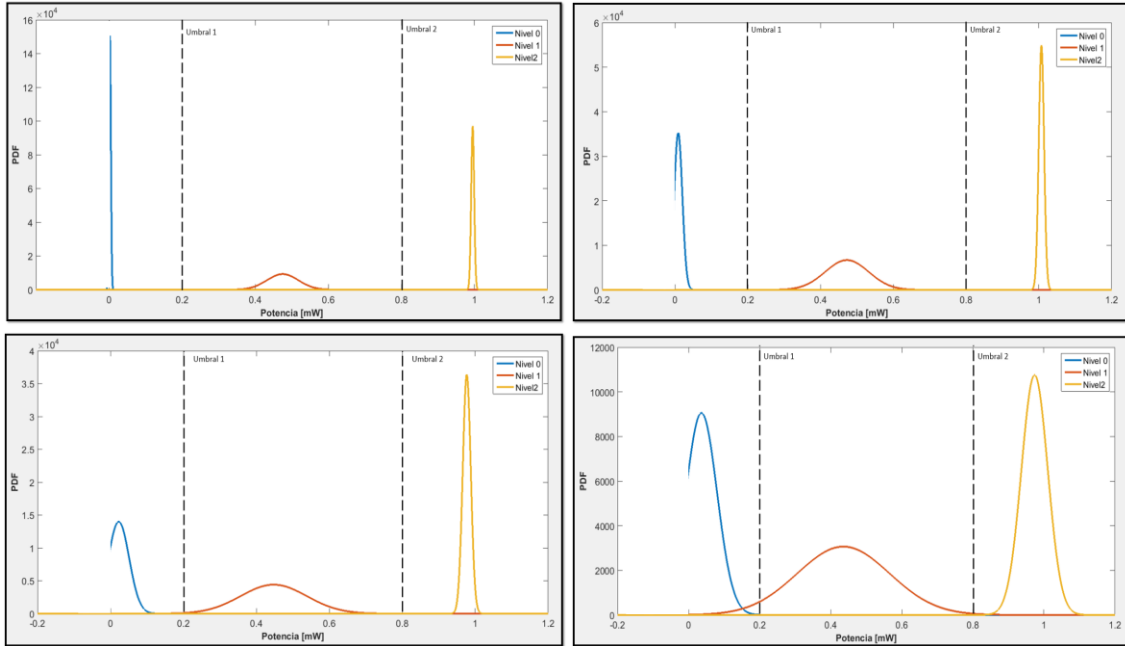


Figura 4.29 Funciones de densidad de probabilidad para la señal óptica con modulación polibinaria 2, obtenidas a las distancias de 0, 50, 100 y 150 km de propagación dentro de la fibra SMF

En la figura 4.30 se puede observar cómo es que a lo largo de 150 km la calidad de la señal desde el punto de vista del BER calculado, disminuye únicamente en una magnitud de 6 órdenes, mientras que en el caso de la señal polibinaria 1 o de la señal NRZ, a lo largo de 150 km llega a disminuir en una magnitud de por lo menos 300 órdenes a través de la misma distancia. Se debe resaltar el comportamiento distinto que ofrece en una señal polibinaria al operar un MZM en punto nulo o en cuadratura.

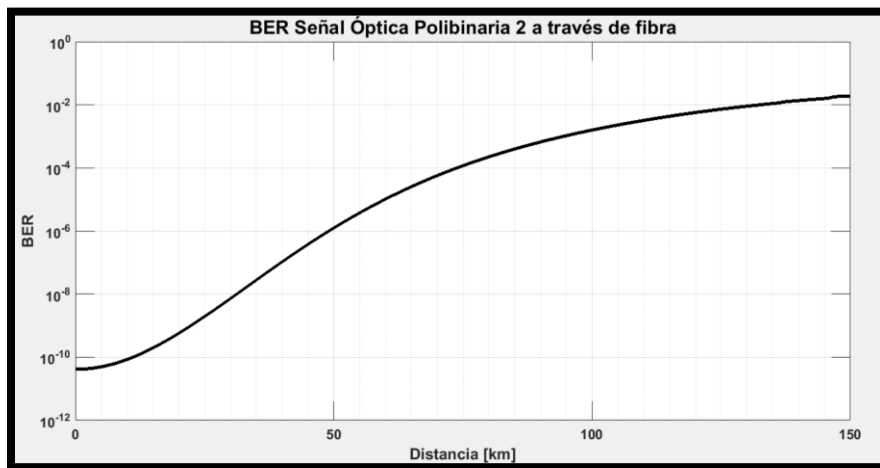


Figura 4.30 Comportamiento del BER estimado para la señal polibinaria 2 a lo largo de la fibra óptica



## 4.7 Simulación de señales polibinarias 3

La señal polibinaria 3, cuenta con una codificación tal que se generan 5 niveles distintos de amplitud y la implementación de un filtro pasa bajas Bessel de 5to orden cuyo ancho de banda es de 0.18 veces la tasa de transmisión de la señal. Esta señal polibinaria, al igual que la denominada en este trabajo como polibinaria 1, cuenta con 5 distintos niveles de amplitud, por lo que su análisis se llevó a cabo mediante el establecimiento de 4 umbrales de decisión. De la misma manera, se llega en este caso a una expresión para la probabilidad de error en la recepción. Junto con las probabilidades adecuadas a priori referentes a los niveles de esta señal polibinaria y su relación con los bits originales. En este caso las probabilidades a priori referentes a los 5 niveles de amplitud respectivamente son:  $\frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{2}, \frac{1}{8}$  y  $\frac{1}{8}$ . Cabe mencionar que, aunque para el análisis de la probabilidad de error de esta señal polibinaria mediante las distribuciones de probabilidad se hace empleo de 4 umbrales, para la recepción adecuada de cada uno de los bits originales se necesita únicamente de 2 umbrales de decisión. La expresión queda de la siguiente manera para la aproximación de probabilidad de error (BER):

$$\begin{aligned} P_{error} = & \frac{1}{8} \left( \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_1 - \mu_0}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) \right) + \frac{1}{8} \left[ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_1 - xth_1}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_2 - \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) \right] + \\ & \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_2 - xth_2}{\sqrt{2}\sigma_2} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_3 - \mu_2}{\sqrt{2}\sigma_2} \right) \right] + \frac{1}{8} \left[ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_3 - xth_3}{\sqrt{2}\sigma_3} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_4 - \mu_3}{\sqrt{2}\sigma_3} \right) \right] + \\ & \frac{1}{8} \left( \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_4 - xth_4}{\sqrt{2}\sigma_4} \right) \right) \end{aligned}$$

Simplificando, llegamos a la expresión:

$$\begin{aligned} P_{error} = & \frac{1}{16} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_1 - \mu_0}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) + \frac{1}{16} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_1 - xth_1}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_2 - \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) \right] + \\ & \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_2 - xth_2}{\sqrt{2}\sigma_2} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_3 - \mu_2}{\sqrt{2}\sigma_2} \right) \right] + \frac{1}{16} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_3 - xth_3}{\sqrt{2}\sigma_3} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_4 - \mu_3}{\sqrt{2}\sigma_3} \right) \right] + \frac{1}{16} \operatorname{erfc} \left( \frac{xth_4 - \mu_4}{\sqrt{2}\sigma_4} \right) \end{aligned}$$

Tras la codificación para la generación de la señal polibinaria 3, el diagrama de ojo de la señal moduladora en el dominio eléctrico es la que se presenta en la Figura 4.31. Esta señal da lugar a la señal óptica representada en la figura 4.32, la cual es la señal óptica antes de entrar a la fibra óptica. No es difícil observar que en el diagrama de ojo de la señal óptica existe un jitter que, aunque no es tan significativo como el caso de la señal polibinaria 2, sí representa una estimación baja en la probabilidad de error desde un inicio.

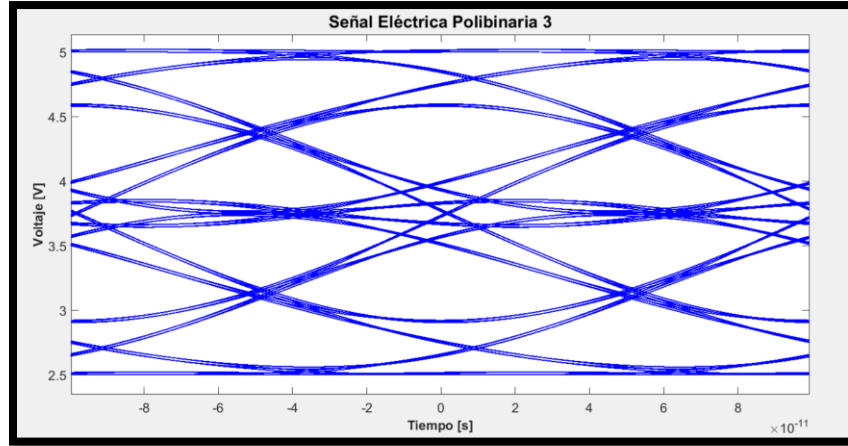


Figura 4.31 Diagrama de ojo en el campo eléctrico de la señal moduladora para generación de señal óptica Polibinaria 3.

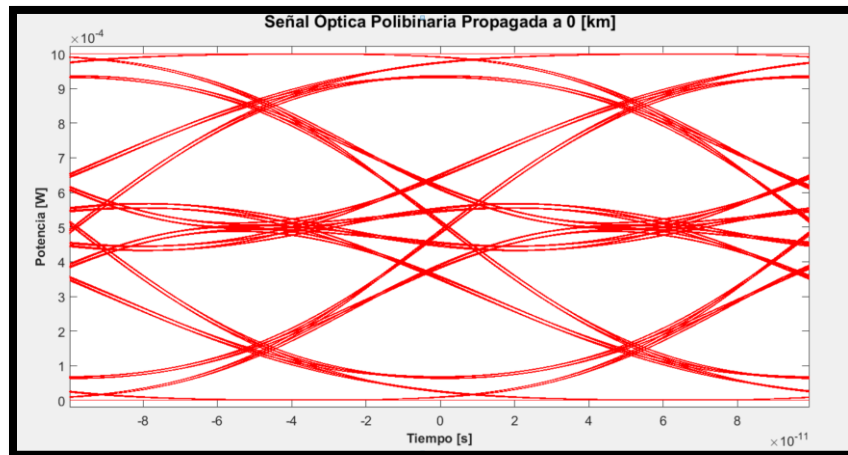


Figura 4.32 Diagrama de ojo de señal óptica polibinaria 3, capturado previo a la transmisión hacia la fibra óptica. Se pueden observar los 5 niveles distintos en amplitud de potencia óptica.

Respecto al espectro obtenido de la señal óptica polibinaria 3, se observa en la Figura 4.39 que incluso a potencias bajas de -80 dBm se cuenta con un ancho espectral muy estrecho, el cual está por debajo de los 16 GHz. Este resultado muestra que hasta este punto, esta señal óptica es la que cuenta con el menor ancho espectral entre las señales ópticas polibinarias y NRZ antes generadas.

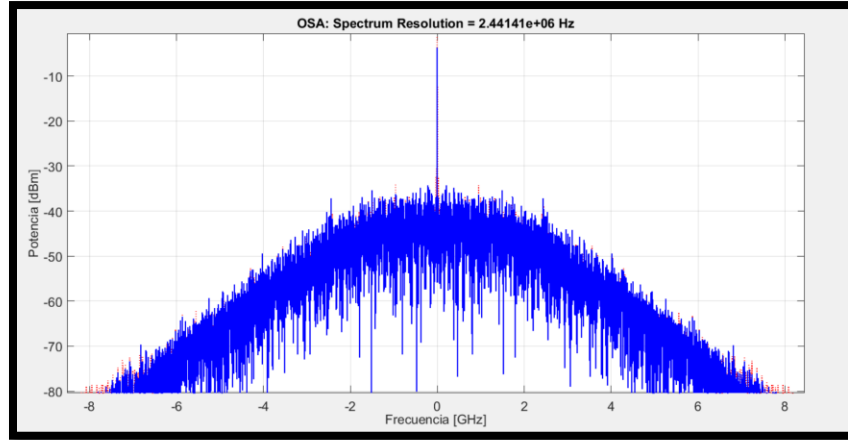


Figura 4.33 Espectro de la señal óptica Polibinaria 3, capturado a la salida del MZM

El comportamiento de los diagramas de ojo obtenidos de la señal óptica con formato de modulación polibinaria (Figura 4.34), denominada como polibinaria 3, nos muestra que dentro de los primeros 100 km la señal prácticamente no sufre distorsiones importantes por causa de la dispersión cromática.

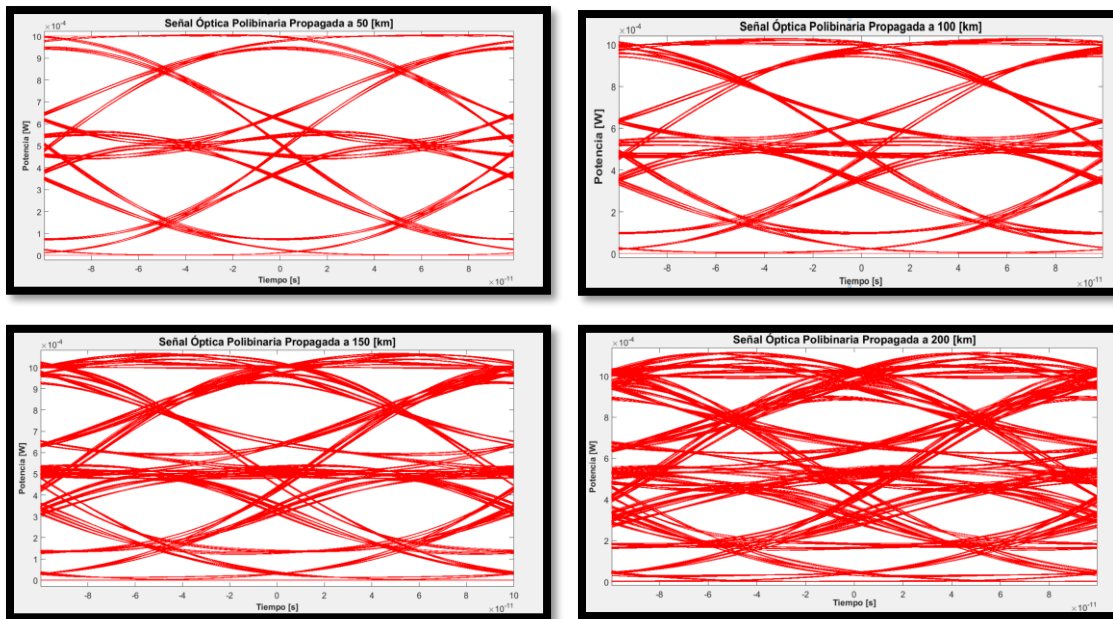


Figura 4.34 Diagramas de ojo de la señal Polibinaria 3 obtenidos a distancias de: 50, 100, 150 y 200 km.

Otra manera de observar el comportamiento de la señal Polibinaria, al igual que en los casos anteriores, es a través del comportamiento de las funciones de densidad de probabilidad obtenidas para distintos puntos en la distancia de propagación de la señal a través de la fibra óptica. En la Figura 4.35, se observa que partir de los 75 km, el ensanchamiento y la aproximación de las funciones hacia los umbrales de decisión es más pronunciada, lo que significa un deterioro en la calidad de la señal.

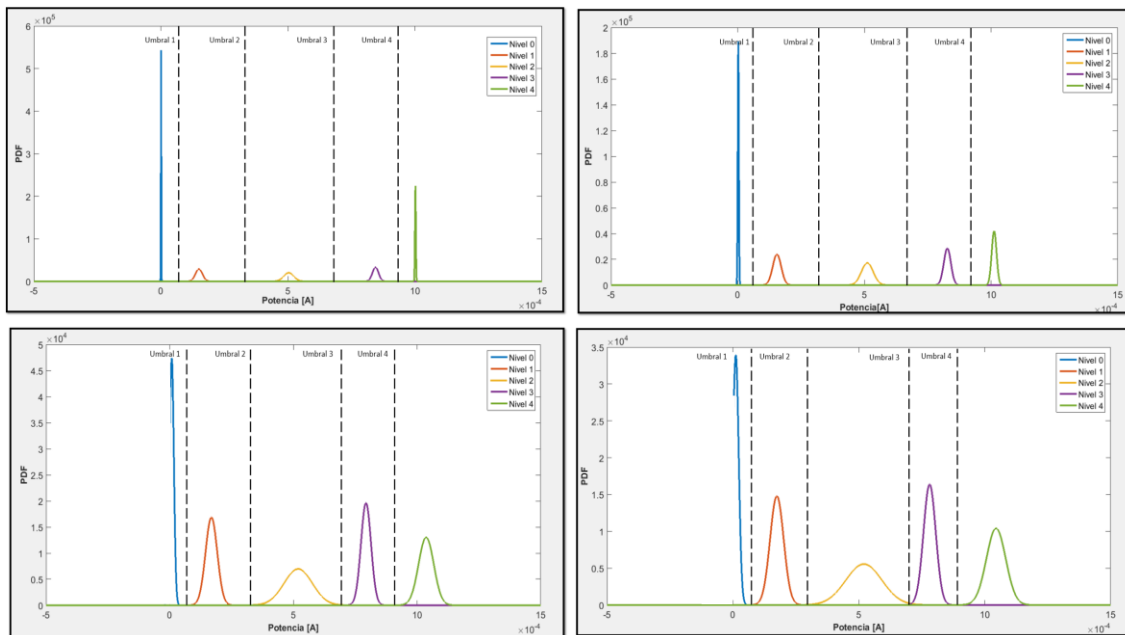
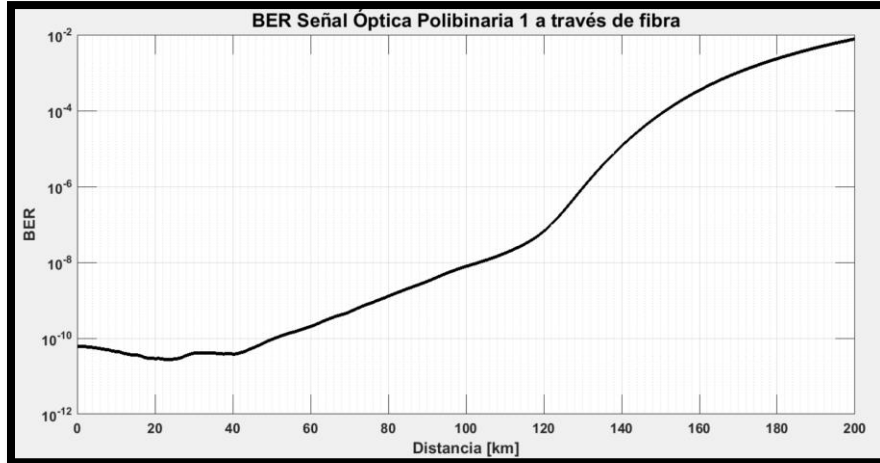


Figura 4.35 Funciones de densidad de probabilidad con la colocación pertinente de los 4 umbrales de decisión. Estas funciones fueron obtenidas a las distancias de 50, 100, 150 y 200 km

En la figura 4.36 se reporta el BER de la señal como función de la distancia de propagación. En esta figura se observa que, a pesar de que la curva tiene una tendencia ascendente prácticamente en todo momento, dentro de los primeros 100 km, el BER aumenta en tan solo 2 órdenes de magnitud dentro de los primeros 100 km de fibra óptica, lo que da muestra irrefutable de la robustez que tiene este tipo de señal polibinaria ante los efectos de dispersión cromática, consecuencia en buena medida, de la estrechez de su espectro.



*Figura 4.36 Comportamiento del BER de la señal óptica Polibinaria 3 a lo largo de su transmisión a través de la fibra óptica.*

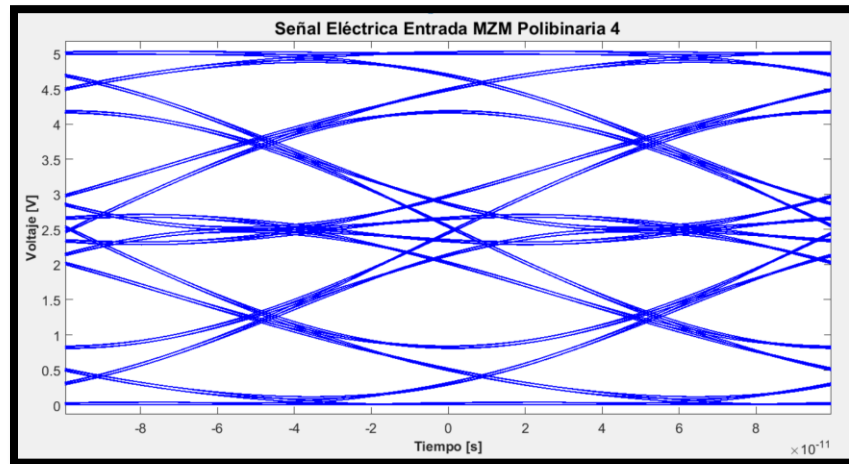
#### 4.8 Simulación de señales polibinarias 4

En la cuarta y última señal polibinaria que se generó y analizó, se utilizó una señal binaria con codificación similar al caso de la señal polibinaria 3, sin embargo, la señal moduladora que se implementó difiere en el rango de voltaje para poder operar el MZM dentro de la configuración del punto nulo.

Para este caso, se obtienen 3 niveles distintos en amplitud óptica de potencia, lo cual, nos lleva a tener en un principio dos umbrales de decisión para lograr el análisis y estimación adecuado de la distorsión de la señal por efectos dispersivos; no obstante, como se explicó anteriormente, esta señal realmente no necesita de los dos umbrales para poder llevar a cabo la recepción, esto se debe a que tanto el nivel intermedio como el nivel superior de la señal representan ambos el mismo bit original, es decir la decodificación de ambos niveles superiores llevan a tener el valor de bit original 1. Por esto es que esta señal en particular representa un peculiar interés ya que, aunque se trata de una señal multinivel y su ancho espectral es mucho menor al de una señal NRZ, esta se puede recuperar con la colocación adecuada de un solo umbral de decisión y llevar a cabo una detección directa. Por otro lado, y regresando al análisis de la señal, debido a que viajan tres niveles de amplitud distintos y nuestro interés en sí se enfoca en qué tanto se distorsiona una señal polibinaria óptica bajo la dispersión cromática de la fibra SMF, se debe hacer un análisis similar al caso de la señal duobinaria de 3 niveles. Cabe hacer mención en este punto, que de manera semejante a lo explicado respecto a la señal polibinaria 3, la señal polibinaria 4 requiere de 2 umbrales para el análisis de la probabilidad de error en la recepción de acuerdo a métodos estadísticos y probabilísticos a partir de funciones de distinción de probabilidad gaussiana; mas no así para la recuperación de la información en sí, para la recuperación de la información solo se

requiere de un solo umbral para realizar una detección directa de la señal, ya que tanto los niveles 1 y 2, representan a los bits binarios originales con valor de 0 y el nivel 0 conlleva los bits originales de información con valor de 1. De acuerdo a lo anterior, para el análisis de la probabilidad de error es entonces que se designaron dos umbrales de decisión para el análisis, y las probabilidades a priori que fueron designadas son de  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$  y  $\frac{1}{4}$  a los niveles 0, 1 y 2 respectivamente.

Se puede observar en la Figura 4.37 que la señal moduladora en el dominio eléctrico es una señal similar al caso de la polibinaria 3, pero con el rango adecuado para operar el MZM dentro de la zona de punto nulo. La señal óptica resultante se observa en la figura 4.38, donde se aprecia que únicamente existen en este punto 3 niveles de amplitud de potencia óptica. Asimismo, la Fig. 4.39 muestra el espectro de la señal óptica, que nuevamente muestra que su ancho de banda es muy estrecho.



*Figura 4.37 Diagrama de ojo de señal moduladora polibinaria 4, la cual existe dentro del dominio eléctrico y es fácil observar los 5 niveles de amplitud que contiene para la operación del MZM.*

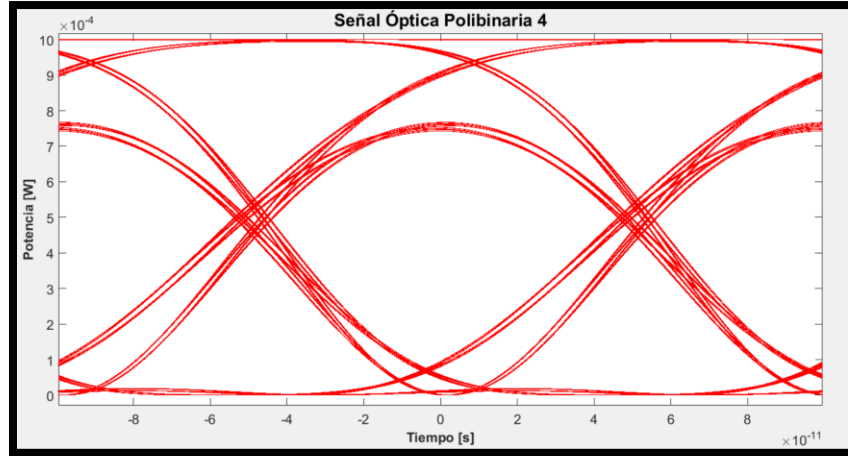


Figura 4.38 Diagrama de ojo de la señal óptica con modulación polibinaria 4, obtenido justo a la salida del MZM. Se observa que contiene únicamente 3 niveles distintos de amplitud en potencia óptica.

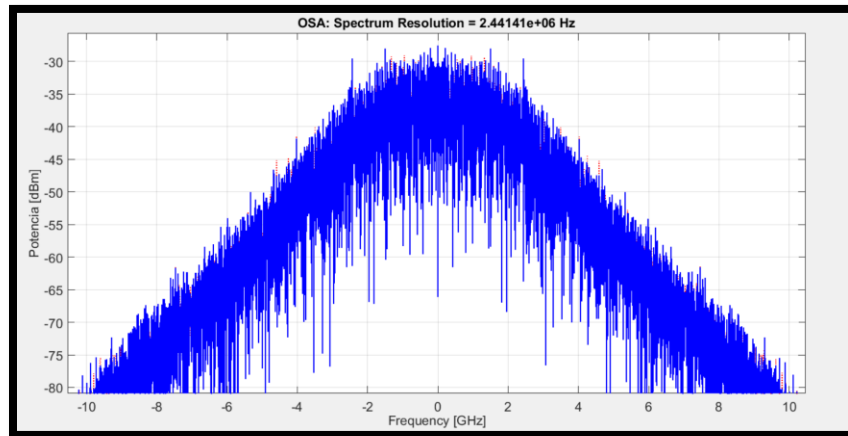


Figura 4.39 Espectro de la señal polibinaria 4

En el comportamiento de la señal óptica a través de observar los diagramas de ojo ópticos reportados en la Figura 4.40 y las funciones de distribución para determinadas distancias en la Figura 4.41, se observa que dentro de los primeros 100 km la señal óptica polibinaria prácticamente no sufre deterioro alguno de importancia. Esto se corrobora en la Fig. 4.42, en donde se observa que la calidad de la señal antes de ser propagada es alta: BER de  $4.3 \times 10^{-16}$ , pero dado que la curva muestra una pendiente pronunciada, aunque prácticamente lineal (en escala logarítmica), el deterioro que presenta la señal como función de la distancia es relativamente alto. Aún así, para una distancia de 100 km, el valor de la VER no supera  $1 \times 10^{-9}$ .

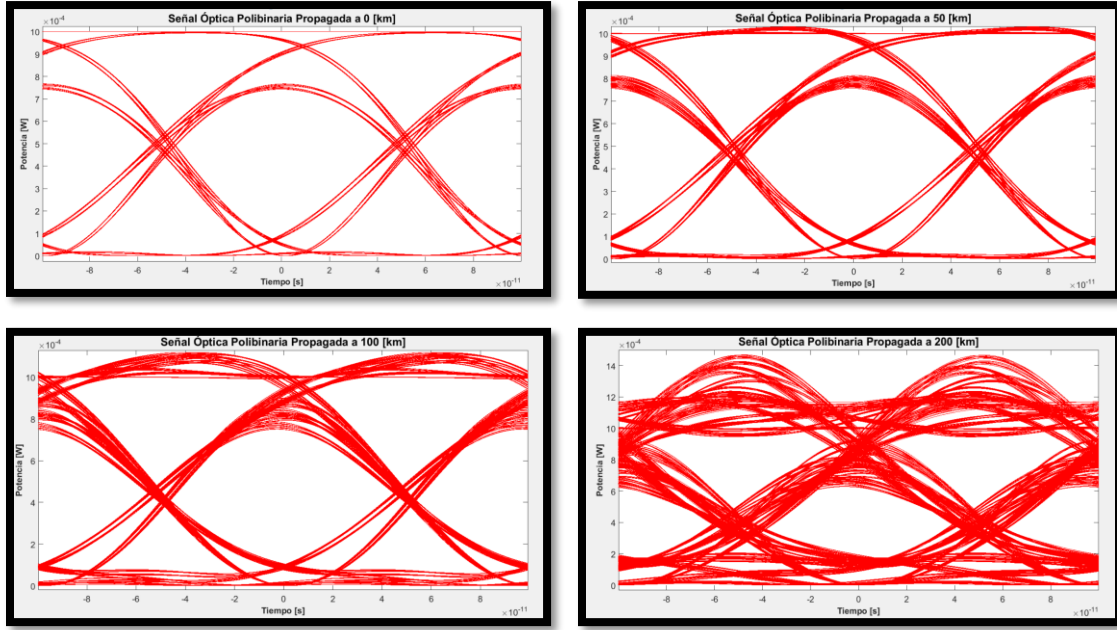


Figura 4.40 Diagramas de ojo de la señal Polibinaria 4, obtenidos a las distancias de: 0,50, 100 y 200 km

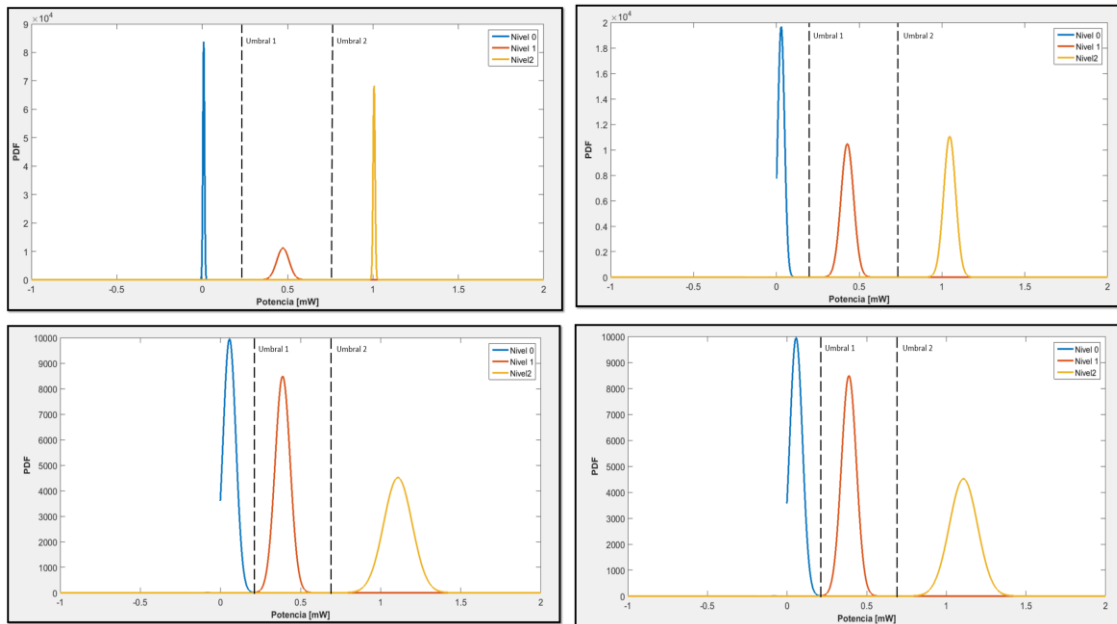
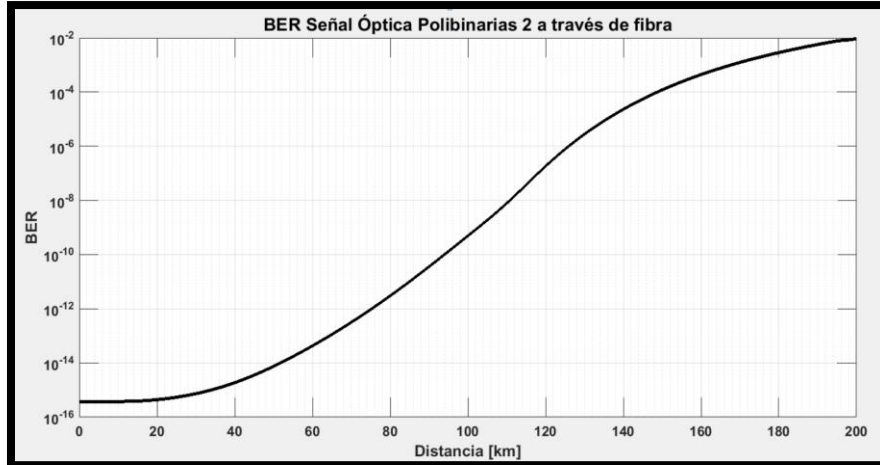


Figura 4.41 Funciones de densidad de probabilidad obtenidos a lo largo de la transmisión de la fibra óptica para el caso de la señal con modulación Polibinaria 4. Estas fueron obtenidas a las distancias de: 50, 100, 150 y 200 km





*Figura 4.42 Comportamiento del BER para la señal óptica con formato de modulación polibinaria 4 a lo largo de la transmisión dentro de la fibra óptica.*

#### 4.9 Conclusiones del capítulo

En la Figura 4.43 se muestra el comportamiento de todas las señales ópticas generadas en este trabajo respecto al BER a lo largo de la distancia en la que las señales viajan dentro de la fibra óptica. De esta manera es más sencillo hacer una comparación de cuáles señales tienen una mejor respuesta ante efectos de dispersión cromática; es evidente que ambas señales duobinarias generadas presentan un comportamiento muy destacable, llegando a prácticamente una distancia de 200 km con un BER estimado cercano a  $1 \times 10^{-10}$  (sobre todo la señal duobinaria 1); sin embargo, también se puede observar que la señal Polibinaria 4, presenta un comportamiento mucho más estable dentro de las mismas señales polibinarias, presentando un BER cercano a  $1 \times 10^{-10}$  a una distancia de aproximadamente 90 km. A primera instancia, bajo la consideración del parámetro de la resistencia ante efectos de dispersión, las señales duobinarias presentan un comportamiento por encima de las señales polibinarias notoriamente, sin embargo, la señal polibinaria 4 posee dos características muy importantes. Por un lado, el ancho espectral de una señal polibinaria es más estrecho que el ancho espectral de una señal duobinaria, lo que le presentaría ventajas al utilizar este tipo de modulación sobre sistemas de comunicaciones WDM; por otro lado, esta señal polibinaria aunque viaje a través de la fibra óptica con 3 niveles distintos de amplitud en potencia, es posible su recuperación con un sistema de detección directa, idéntico al utilizado por el formato NRZ, y es en este aspecto de recuperación sencilla y su bajo ancho espectral, donde la señal, polibinaria llega a ser junto con la señal duobinaria de dos niveles, las opciones más prometedoras y con mejores resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

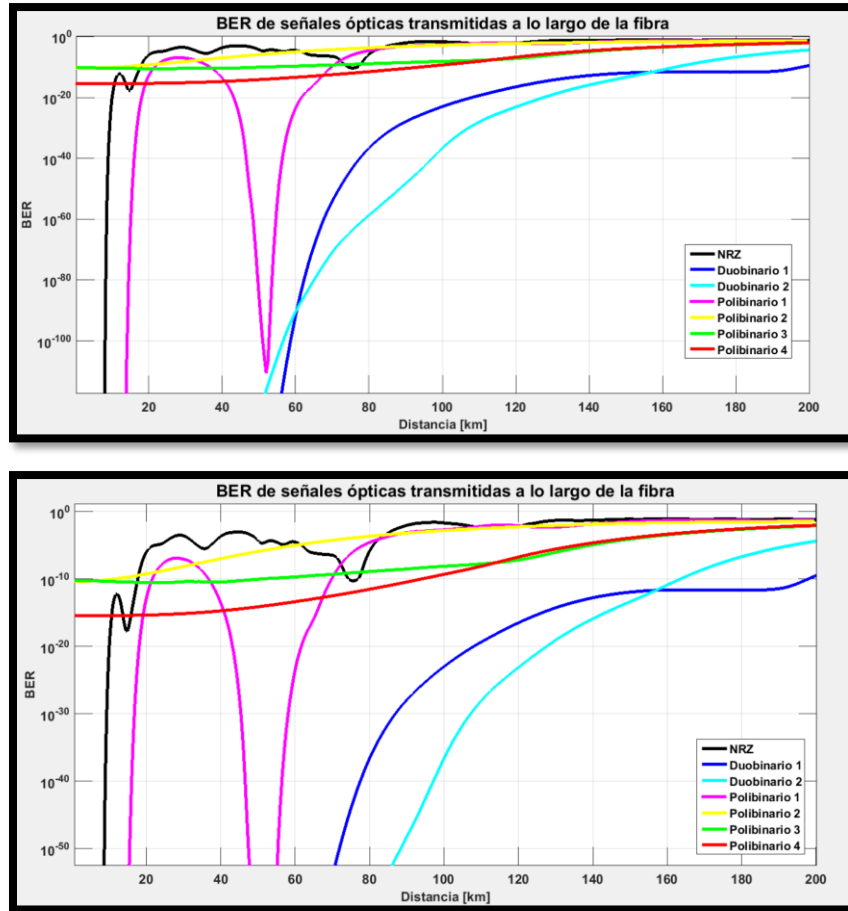


Figura 4.43 Comportamiento del BER para las señales ópticas a través de la fibra. La imagen inferior es un acercamiento de la imagen original que se encuentra en la parte superior.

La Figura 4.44 muestra un resumen donde se puede comparar de manera más práctica lo discutido entre las señales ópticas simuladas y propagadas en este trabajo de investigación.

Formato	Distancia [km] @BER $1 \times 10^{-11}$	Ancho Espectral [GHz] a -40 dBm	Número de umbrales en Rx	Ancho de banda filtro polibinario
<b>NRZ</b>	17	40	1	----- --
<b>Duobinaria 2 niveles</b>	193	10	1	30 % de tasa de bits
<b>Duobinaria 3 niveles</b>	160	10	2	30% tasa de bits
<b>Polibinaria 1</b>	20	5	4	50% tasa de bits
<b>Polibinaria 2</b>	10	5	2	50% tasa de bits
<b>Polibinaria 3</b>	60	5	2	18% tasa de bits
<b>Polibinaria 4</b>	93	5	1	18% tasa de bits

*Figura 4.44 Cuadro comparativo de las distintas señales ópticas generadas en este trabajo.*

Se puede observar que dependiendo sobre qué parámetro se enfoque para poder hacer una comparativa particular, las distintas señales ópticas polibinarias tendrán ventajas y desventajas por sobre las demás, por ejemplo, si nos enfocamos en el caso de la resistencia ante la distorsión por dispersión cromática, las señales duobinarias y la señal polibinaria 4 presentan ventajas por sobre las demás, por otro lado, si nos enfocamos en la simplicidad de los sistemas de detección a partir del número de umbrales implementados en el sistema de recepción, observamos que los formatos NRZ, duobinaria de dos niveles y polibinaria 4 presentan ventajas, y; si nos enfocamos en el parámetro del ancho espectral, todas las señales con formato polibinario tienen una clara ventaja por su estrecho espectro. Al unir todos los aspectos, y tratar de hacer un balance en cuál de los formatos de modulación es más conveniente por su posibilidad de obtener mayores beneficios al usarse en sistemas WDM, o presentar una mejor conveniencia en la parte de la complejidad de sistemas de recepción y sus costos económicos, hay 2 señales que destacan por sobre todas, y estas son la señal duobinaria de dos niveles, la cual ya ha sido abordada en varios artículos como se narró en el capítulo 3 anteriores y la señal polibinaria 4, la cual hasta el día de hoy no había sido estudiada ni analizada a tal alcance como el que se obtuvo en el presente trabajo, por lo que se puede concluir que los resultados y logros a través de este trabajo han sido únicos y de un balance muy positivo para poder tener trabajos a futuro más especializados sobre este formato de modulación de comunicación óptica y seguir en la búsqueda de explotar al máximo las tecnologías ópticas para cubrir la demanda de intercambio de comunicación del mundo contemporáneo y del mañana.

---

## *Capítulo 5: Conclusiones Generales*

---

El objetivo respecto a lo esperado en este trabajo de investigación se considera con alcances positivos y satisfactorios. Las simulaciones de las señales ópticas bajo el formato de modulación polibinaria, así como el análisis de los resultados recabados, son la muestra de que el estudio en este trabajo de investigación, acerca de este tipo de modulación avanzada muestra que el entendimiento de cómo generar, manipular y analizar este tipo de señales de comunicación se logró de manera satisfactoria, a pesar de no tener un precedente de un trabajo similar dado la novedad y pocos estudios alrededor del mundo de las comunicaciones en el mundo actual, inclusive, se considera que este trabajo puede ser un punto de partida importante para el estudio e implementación de este tipo de modulación avanzada en las señales ópticas en enlaces de comunicación en México, que es el país donde se realizó este trabajo de investigación y considerarse un aporte importante para proyectos masivos a nivel nacional donde la infraestructura de fibra óptica comenzará a tener inversiones considerables como lo es el caso de la red compartida.

Los formatos avanzados de modulación en las comunicaciones ópticas han otorgado una gran influencia en el crecimiento y expansión de las capacidades de este tipo de comunicación, de tal manera que hoy en día se considera la primera opción de establecer redes de comunicación en grandes distancias y altas tasas de información alrededor del mundo, con mucha mayor eficiencia y confiabilidad por sobre otras tecnologías. Sin los formatos avanzados de comunicaciones ópticas sería prácticamente imposible explotar todos los beneficios que ofrecen las comunicaciones a través de fibras ópticas, ya que estas tienen ciertas limitantes como pérdidas, rangos de frecuencias, efectos no lineales, etc. Dichas limitantes tienen un efecto negativo mucho menor cuando se emplean formatos de modulación adecuados para el beneficio de la implementación de canales de alta capacidad a través de las fibras, uno de estos formatos avanzados de modulación como se observó en este trabajo, es el formato polibinario en las comunicaciones ópticas.

Los distintos formatos de modulación polibinaria demostraron tener ventajas por sobre el formato NRZ, el cual, es el formato más empleado en las comunicaciones ópticas en el mundo. Los formatos de modulación polibinaria demostraron principalmente una gran robustez ante efectos de dispersión cromática dentro de la fibra óptica SMF, llevando en algunos casos a alcanzar hasta 5 veces más distancia de alcance sin sufrir tantas distorsión en el recorrido, a su vez, se presentó que no es necesario un equipo sofisticado para recuperar la información enviada a través de dichos formatos, e incluso uno de estos formatos polibinarios, demostró el mismo requerimiento sencillo que necesitan las señales NRZ para la recuperación de información, ya que ambos casos

únicamente requieren de una detección directa del lado del sistema receptor de la señal óptica.

Este trabajo de investigación se considera importante, ya que el estudio sobre este tipo de formato de modulación no ha sido tan abordado a la fecha, y en este trabajo se logró la simulación y comparación de no sólo una sola señal bajo un formato polibinario, sino que se abordó el estudio, simulación y comparación de 6 distintos formatos de modulación polibinaria, esto con el fin de saber su comportamiento a través de largas distancias, con efectos de dispersión cromática y comportamientos ante distintas configuraciones de los equipos empleados como filtros eléctricos; a su vez, el enfoque sobre la manera de recepción de dichas señales fue fundamental, ya que uno de los objetivos principales era el de tener señales bajo modulaciones avanzadas que propiciaran enlaces de comunicación no sólo de largo alcance y alta capacidad, sino de bajo costo y sin ser complejos tanto en la transmisión como en la recepción, a lo que respecta, se considera que dichos alcances fueron positivos.

La importancia de los elementos considerados para la generación de las señales ópticas polibinarias son fundamentales, principalmente los filtros polibinarios y el modulador Mach-Zehnder, mismos que al operar bajo distintas configuraciones son la raíz de la posibilidad de la generación de las múltiples señales polibinarias con distintas características cada una de estas.

La estrechez del espectro de las señales polibinarias son un factor muy importante para ser consideradas una excelente y muy prometedora opción para su implementación sobre sistemas de enlace de fibra WDM, ya que en teoría, el tener canales con un menor ancho espectral y mucha mayor robustez ante efectos dispersivos, aunado a su facilidad de recuperación de información (caso de duobinaria 2 niveles y polibinaria 4), sería el caso ejemplar para sustituir señales NRZ y explotar aún más los enlaces WDM.

El análisis de la calidad de las señales a lo largo del recorrido dentro de fibra óptica SMF, bajo el criterio de efecto de distorsión de dispersión, se considera una manera muy interesante e innovadora para el estudio y simulación de señales de alta capacidad, ya que, en casos como en el presente donde la tecnología al alcance no permite hacer un análisis de BER completo por medio de conteo de bits, debido a que la tecnología necesaria para hacerlo de esta manera es muy costosa y poco accesible, es por eso que, al hacer el análisis como se ha llevado a cabo da un muy buen acercamiento a lo respuestas reales sin tener que invertir en costosos equipos.

En general los alcances y logros más destacables, recabados en este trabajo de investigación, se pueden considerar como los siguientes:

- ✓ Se logró la simulación de generación de señales ópticas a una tasa de transmisión de 10 Gbps bajo distintos formatos avanzados de modulación denominados como polibinarias, así mismo la simulación conllevó la transmisión de dichas señales a lo largo de una fibra mono modo cuyos efectos no lineales fueron ignorados, mas no así el efecto de dispersión cromática.
- ✓ Se logró la simulación de la recuperación de las señales ópticas así como el análisis pertinente de la calidad con la que dichas señales llegaban al punto de recepción, esto mediante el análisis de la probabilidad de error a partir de métodos estadísticos.
- ✓ Se llevó a cabo un análisis profundo del comportamiento de dichas señales ópticas a partir de la posibilidad de generar herramientas para observar sus espectros, diagramas de ojo y curvas de comportamiento BER vs distancia.
- ✓ Se llevo una comparación adecuada entre todas las señales ópticas generadas para una toma de decisión de los beneficios que conlleva cada una de estas o bien, las desventajas que podría presentar al ser implementada en enlaces de comunicación a través de fibra.
- ✓ Se logró la simulación de la generación de una señal polibinaria innovadora, cuya resistencia ante los efectos de dispersión cromática, su baja complejidad para la recuperación de la información, así como su bajo ancho espectral, la considera como una de las opciones más prometedoras para ser implementada en enlaces de alta capacidad, así como la importancia que conlleva el ser considerada única y muy poco estudiada.

## Trabajo a futuro

Dada la consideración que se tiene con este trabajo de investigación y su posible importancia ante el estudio más a fondo de este tipo de señales ópticas, se considera que los siguientes pasos en el camino de la investigación sobre estas señales, recae en la necesidad de abordar su análisis con software más especializado como lo puede ser VPI, así como las consideraciones de los efectos no lineales ya sea sobre enlaces sencillos con fibra mono modo, como en enlaces WDM para hacer posible el estudio de la posible aparición de efectos como *Four Wave Mixing*, por ejemplo. Por otro lado, el generar simulaciones de transmisión de las señales sobre distintos tipos de fibra óptica, no solo las que siguen las recomendaciones G.652 de la ITU, o bien sobre fibras multi modo. Por otro lado, la posibilidad de realizar transmisiones con equipos reales con el fin de obtener datos de BER a partir de conteos de bit, sería punto fundamental para hacer una comparación completa respecto a lo que este trabajo de investigación puso sobre la mesa de análisis y resultados.