



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

**IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL DE FORMATOS DE MODULACIÓN DE RESPUESTA
PARCIAL EN ENLACES ÓPTICOS DE TRANSMISIÓN**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA

PRESENTA:
SALVADOR ARCE BENÍTEZ

TUTOR
DR. RAMÓN GUTIERREZ CASTREJÓN
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.
NOVIEMBRE, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

Dedicada a ...

...a mis padres, Adriana y Salvador

por haber estado atrás de mi, otorgándome todo el apoyo que siempre necesité, nunca dejando de creer en mi, y sobre todo por su amor incondicional,

...a mi hermana Sariruris

por ser mi amiga y por haber aguantado mi humor durante toda la carrera,

... a mi tía Rosita

por todo lo que me dio con el pasar de los años, por su amor incondicional, por los años de preparación y sobre todo por todo el cuidado que me dio,

... a mi Chocoprincesa

por ser la persona más especial en mi vida, por todas las aventuras y recuerdos que hicimos en toda la carrera, y especialmente por todo su apoyo.

... a mis amigos Ricky, Saúl, Uriel y Frida

por ser personas sumamente importantes en mi vida y a quienes agradezco todo su cariño y apoyo.

con amor, Salvador.

Agradecimientos

A mi tutor. . .

...Dr. Ramón Gutierrez Castrejón por todos los conocimientos que me ha brindado, por su tiempo y dedicación los cuales son parte fundamental de mi formación profesional. Por ser una gran persona comprometida con su trabajo y motivarme a concluir este trabajo. Por sus valiosos consejos y apoyo para seguir creciendo profesionalmente. Especialmente por darme la oportunidad de escribir este trabajo.

...A la UNAM...

...por la oportunidad de estudiar en sus aulas, por todas las oportunidades que me brindó y las maravillosas personas que conocí en ella.

A la Facultad de Ingeniería. . .

...Por todos los conocimientos que me brindó y que me permitirán afrontar mi vida profesional, por ser mi segunda casa y por todos los momentos vividos y amistades forjadas dentro de sus paredes.

Al Instituto de Ingeniería...

...Por permitirme aprender durante mi participación en este proyecto y así complementar mi desarrollo profesional.

Al Proyecto PAPIIT IN103720 "Análisis de Formatos de Modulación Polibinarios para X-Hauling en Redes 5G"...

...Por el apoyo recibido para el desarrollo de esta tesis.

Al Proyecto PAPIIT IN103122 "Soluciones para Implementar Redes Ópticas de Acceso de Alta Velocidad"...

...Por el apoyo recibido para el desarrollo de esta tesis.

Al CONACyT...

...Por el apoyo económico brindado durante toda mi etapa de maestría, sin el cual no habría podido llegar tan lejos.

Notación

- AFG - *Arbitrary Function Generator*, Generador de Funciones Arbitrarias.
- EAM - *Electro-Absorption Modulator*, Modulador de Electro-Absorción.
- EOM - *Electro-Optic Modulator*, Modulador Electro-Óptico.
- IM-DD - *Intensity Modulation-Direct Detection*, Modulación de Intensidad - Detección Directa
- MZI - *Mach-Zehnder Interferometer*, Interferómetro Mach-Zehnder.
- MZM - *Mach-Zehnder Modulator*, Modulador Mach-Zehnder.
- NRZ - *No Return to Zero*, No Retorno a Cero
- OSNR - *Optical Signal to Noise Ratio*. Razón Señal a Ruido Óptica.
- SMF - *Single Mode Fiber*, Fibra Monomodal
- TF - *Transfer Function*, Función de Transferencia
- VISA - *Virtual Instrument Software Architecture* - Arquitectura de Software para Instrumentos Virtuales
- WDM - *Wavelength Division Multiplexing*, Multiplexación por División de Longitud de Onda

Índice general

Agradecimientos	II
Notación	IV
Prólogo	XVII
Contenido	XIX
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Aportaciones de esta Tesis	3
2. Conceptos de Comunicaciones Ópticas	5
2.1. Fibra Óptica	5
2.1.1. Dispersión	7
2.2. Fotodetector	8
2.2.1. Fotodiodos	10
2.2.2. Ruido en el Receptor	11
2.3. Modulación Óptica	12
2.3.1. Modulación Directa	13
2.3.2. Modulación Externa	14
2.4. Modulador de Amplitud Basado en el Interferómetro Mach-Zehnder	15
2.5. Función de Transferencia del MZI de Dos Brazos	19
2.5.1. Configuraciones	20

2.6. Función de Transferencia del MZI de un Brazo	23
2.7. Función de Transferencia del MZI de un Brazo no Ideal	25
3. Formato Polibinario	27
3.1. Estado del Arte	28
3.2. Del Binario al Polibinario	30
3.2.1. Precodificación	30
3.2.2. Señal Polibinaria	32
3.2.3. Decodificación	33
4. Caracterización del Modulador IM-1550-20-u	35
4.1. Pruebas en el Puerto DC	36
4.2. Pruebas en el Puerto RF	38
4.2.1. <i>Offset</i> Variable y Potencia de Salida	38
4.2.2. Amplitud de Entrada vs. Amplitud de Salida	40
4.3. Conclusiones Preliminares	42
5. Simulaciones y Comportamiento del Formato Polibinario	44
5.1. Funcionamiento del Programa de Simulación	45
5.1.1. Sección de Generación de la Señal Control	45
5.1.2. Simulación de Dominio Eléctrico y Óptico	48
5.1.3. Recepción y Demodulación	49
5.2. Simulación <i>Back-to-Back</i>	51
5.3. Simulación con Fibra	60
5.3.1. 5 Kilómetros	61
5.3.2. 21 Kilómetros	65
6. Resultados	70
6.1. Detalles Experimentales	70
6.1.1. Generador de Funciones Arbitrarias	74
6.2. <i>Back-to-Back</i> Óptico	76
6.3. Polibinario A Través de 5 km de Fibra Óptica y 31.25 Mbps	78

6.4. Polibinario A Través de 5 km de Fibra Óptica y 125 Mbps	81
6.5. Polibinario A Través de 5 km de Fibra Óptica y 250 Mbps	84
6.6. Polibinario a través del <i>Front Haul</i>	87
6.6.1. Polibinario A Través de 10 km de Fibra Óptica y 125 Mbps	88
6.6.2. Polibinario A Través de 10 km de Fibra Óptica y 250 Mbps	91
6.6.3. Polibinario A Través de 18 km de Fibra Óptica y 125 Mbps	94
6.6.4. Polibinario A Través de 18 km de Fibra Óptica y 250 Mbps	97
6.7. Resumen de la Eficiencia del Formato Polibinario y Conclusiones Preliminares	100
6.7.1. Simulaciones vs. Resultados Experimentales	102
7. Conclusiones y Trabajo a Futuro	105
Códigos	108

Índice de figuras

2.1. Corte transversal de una fibra óptica convencional. El núcleo y el revestimiento usualmente están constituidos de óxido de silicio, están fusionados y son inseparables. El recubrimiento usualmente es de plástico y se debe retirar para realizar empalmes. Dependiendo del tipo de fibra, el cable del que forme parte o el fabricante, nuevas capas entran a conformar los hilos de fibra óptica.	6
2.2. Modulación directa.	14
2.3. Modulación externa.	14
2.4. Esquema del modulador de amplitud basado en el Interferómetro Mach-Zehnder [17]. El campo eléctrico del haz luz a la entrada $E_{in}(t)$ atraviesa un acoplador 50/50. Cada haz generado pasa a través de una guía de onda creada de cristal de $LiNbO_3$, los cuales se modulan de acuerdo a los voltajes de control $u_1(t)$ y $u_2(t)$. Estos haces modulados se reencuentran a través de otro acoplador 50/50 para formar el haz de luz de salida $E_{out}(t)$	16
2.5. Variedad de moduladores de fase ópticos comerciales. Todos trabajan bajo la estructura del MZI y utilizan $LiNbO_3$ como cristal susceptible al efecto Pockels [20].	18
2.6. Funciones de transferencia (Campo eléctrico y potencia) de un modulador óptico basado en estructura Mach-Zehnder de dos brazos en configuración <i>push-pull</i> con $V_\pi = 5[v]$	23
2.7. Límites lineales dibujados sobre el costado izquierdo de la función de transferencia. El uso de un costado u otro de la TF es trivial pero se prefiere un control directamente proporcional. Este ejemplo tiene un desfase $\phi = 3.4[V]$ y un $V_\pi = [4]$	26

3.1. Ejemplo del proceso de precodificación de una cadena binaria (rosa). Número de niveles M es igual a 2 (duobinario).	32
3.2. Proceso de codificación de una cadena precodificada. Número de niveles M es igual a 2.	33
3.3. Proceso de decodificación de una cadena polibinaria a la cadena binaria que la originó. Número de niveles M es igual a 2.	34
4.1. MZM marca Optilab. Se aprecian los dos puertos de entrada eléctricos: DC y RF, así como los puertos ópticos de entrada y salida. Opera a 1550[nm] y posee un ancho de banda de 20[GHz].	36
4.2. Función de transferencia del MZM.	37
4.3. Offset Variable vs. Potencia de Salida Óptica.	40
4.4. Amplitud de la señal de entrada vs. amplitud de la señal de salida. Pruebas en el puerto de RF.	42
5.1. Cadena de bits originales. Por simpleza se usa esta cadena aleatoria todas las demostraciones e ilustraciones.	46
5.2. Cadena de bits transformados a duobinario y en el dominio eléctrico. . . .	47
5.3. Diagrama de ojo generado a partir de la señal duobinaria eléctrica.	47
5.4. Simulación de la señal en el dominio óptico. (a) Parte real de la señal óptica compleja que atraviesa la fibra óptica. (b) Parte imaginaria de la señal óptica compleja que atraviesa la fibra óptica.	49
5.5. Señal óptica recibida. Los detectores de ley cuadrada solo observan potencia, no campo eléctrico. En la simulación la potencia se aprecia gracias al obtener el módulo del campo eléctrico. En la simulación se obviaron los efectos de la atenuación y la dispersión.	50
5.6. Comparación entre la cadena de bits originales y la cadena de bits decodificados.	51

5.7. Diagramas de ojo e histogramas del formato polibinario generados a partir de la simulación *back-to-back* a 31.25[Mbps]. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 64 muestras. **(a)** Duobinario, **(b)** histograma del duobinario, **(c)** polibinario de 4 niveles, **(d)** histograma de 4 niveles, **(e)** Polibinario de 5 niveles, **(f)** histograma del polibinario de 5 niveles. 53

5.8. Diagramas de ojo e histogramas del formato polibinario generados a partir de la simulación *back-to-back* a 31.25[Mbps]. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben 64 muestras. **(g)** Polibinario de 7 niveles, **(h)** histograma del polibinario de 7 niveles, **(i)** polibinario de 9 niveles, e **(j)** histograma del polibinario de 9 niveles. 54

5.9. Zoom de los primeros y últimos niveles del histograma de polibinario-9 *back-to-back* a 31.25[Mbps]. **(a)** Nivel 1 y 2, y **(b)** nivel 7 y 9. 54

5.10. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación *back-to-back* a 125[MBps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma de polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+1.6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 16 muestras. **(a)** Polibinario-7, **(b)** histograma del polibinario-7, **(c)** polibinario-9, **(d)** histograma del polibinario-9, **(e)** nivel 1 y 2, y **(f)** nivel 7 y 9. 57

5.11. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación *back-to-back* a 250[Mbps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma del polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+8 \times 10^{-9}$ [s], donde caben ventanas de 4 muestras. **(a)** Polibinario-7, **(b)** histograma del polibinario-7, **(c)** polibinario-9, **(d)** histograma del polibinario-9, **(e)** nivel 1 y 2, y **(f)** nivel 7 y 9. 59

5.12. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación con 5[km] de fibra óptica a 31.25[Mbps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma del polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 32 muestras. **(a)** Polibinario-7, **(b)** histograma del polibinario-7, **(c)** polibinario-9, **(d)** histograma del polibinario-9, **(e)** nivel 1 y 2, y **(f)** nivel 7 y 9. 62

5.13. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación con 5[km] de fibra óptica a 125[Mbps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma del polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+1.6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 8 muestras. **(a)** Polibinario-7, **(b)** histograma del polibinario-7, **(c)** polibinario-9, **(d)** histograma del polibinario-9, **(e)** nivel 1 y 2, y **(f)** nivel 7 y 9. 63

5.14. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación con 5[km] de fibra óptica a 250[Mbps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma del polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+8 \times 10^{-9}$ [s], donde caben ventanas de 4 muestras. **(a)** Polibinario-7, **(b)** histograma del polibinario-7, **(c)** polibinario-9, **(d)** histograma del polibinario-9, **(e)** nivel 1 y 2, y **(f)** nivel 7 y 9. 64

5.15. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación con 21[km] de fibra óptica a 31.25[Mbps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma del polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 32 muestras. **(a)** Polibinario-7, **(b)** histograma del polibinario-7, **(c)** polibinario-9, **(d)** histograma del polibinario-9, **(e)** nivel 1 y 2, y **(f)** nivel 7 y 9. 66

5.16. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación con 21[km] de fibra óptica a 125[Mbps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma del polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+1.6 \times 10^{-9}$ [s], donde caben ventanas de 8 muestras. **(a)** Polibinario-7, **(b)** histograma del polibinario-7, **(c)** polibinario-9, **(d)** histograma del polibinario-9, **(e)** nivel 1 y 2, y **(f)** nivel 7 y 9. 67

5.17. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación con 21[km] de fibra óptica a 250[Mbps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma del polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+8 \times 10^{-9}$ [s], donde caben ventanas de 4 muestras. **(a)** Polibinario-7, **(b)** histograma del polibinario-7, **(c)** polibinario-9, **(d)** histograma del polibinario-9, **(e)** nivel 1 y 2, y **(f)** nivel 7 y 9. 68

6.1. Diagrama de bloques del proceso para transformar la señal de información del régimen lógico al dominio óptico. 71

6.2. Implementación del sistema físico. Se aprecian el láser, el AFG, el MZM, el receptor óptico y el osciloscopio. En la pantalla del osciloscopio se aprecia la recepción de una señal duobinaria. 72

6.3. En estos diagramas de ojo se puede apreciar que el cambio del dominio eléctrico al óptico no está exento de cambios. Las muestras experimentales se tomaron a una tasa de 31.25[Mbps]. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 32 muestras. **(a)** Duobinario, **(b)** Duobinario recibido *btb*, **(c)** Polibinario de 4 niveles, **(d)** Polibinario de 4 niveles recibido *btb*, **(e)** Polibinario de 5 niveles, **(f)** Polibinario de 5 niveles recibido *btb*, **(g)** Polibinario de 7 niveles, **(h)** Polibinario de 7 niveles recibido *btb*. 77

6.4. Continuación. **(i)** Polibinario de 9 niveles, **(j)** Polibinario de 9 niveles recibido *btb*. 78

6.5. Arreglo experimental. Los carretes de SMF desnuda suman una distancia de recorrido de 5[km]. 78

6.6. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 3, 4 y 5 del formato polibinario generados a partir de las muestras experimentales a 31.25[Mbps] cuando estas viajaron por 5[km] de fibra óptica. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 32 muestras. **(a)** Duobinario, **(b)** histograma del duobinario, **(c)** polibinario-4, **(d)** histograma del polibinario-4. 79

6.7. Continuación. **(e)** polibinario-5, **(f)** histograma del polibinario-5, **(g)** polibinario-7, **(h)** histograma del polibinario-7, **(i)** polibinario-9, **(j)** histograma del polibinario-9. 80

6.8. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 3 y 4 del formato polibinario generados a partir de las muestras experimentales a 125[Mbps] cuando estas viajaron por 5[km] de fibra óptica. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+1.6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 8 muestras. **(a)** Duobinario, **(b)** histograma del duobinario, **(c)** polibinario-4, **(d)** histograma del polibinario-4. 82

6.9. Continuación. Niveles 5, 7 y 9. **(e)** polibinario-5, **(f)** histograma del polibinario-5, **(g)** polibinario-7, **(h)** histograma del polibinario-7, **(i)** polibinario-9, **(j)** histograma del polibinario-9. 83

6.10. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 3, 4 y 5 del formato polibinario generados a partir de las muestras experimentales a 250[Mbps] cuando estas viajaron por 5[km] de fibra óptica. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+8 \times 10^{-9}$ [s], donde caben ventanas de 4 muestras. **(a)** Duobinario, **(b)** histograma del duobinario, **(c)** polibinario-4, **(d)** histograma del polibinario-4, **(e)** polibinario-5, **(f)** histograma del polibinario-5. 85

6.11. Continuación. Niveles 7 y 9. **(g)** polibinario-7, **(h)** histograma del polibinario-7, **(i)** polibinario-9, **(j)** histograma del polibinario-9. 86

6.12. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 3, 4 y 5 del formato polibinario generados a partir de las muestras experimentales a 125[Mbps] cuando estas viajaron por 10[km] de fibra óptica. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+1.6 \times 10^{-8}[s]$, donde caben ventanas de 8 muestras. **(a)** Duobinario, **(b)** histograma del duobinario, **(c)** polibinario-4, **(d)** histograma del polibinario-4, **(e)** polibinario-5, **(f)** histograma del polibinario-5. 89

6.13. Continuación. **(g)** polibinario-7, **(h)** histograma del polibinario-7, **(i)** polibinario-9, **(j)** histograma del polibinario-9. 90

6.14. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 3 y 4 del formato polibinario generados a partir de las muestras experimentales a 250[Mbps] cuando estas viajaron por 10[km] de fibra óptica. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+8 \times 10^{-9}[s]$, donde caben ventanas de 4 muestras. **(a)** Duobinario, **(b)** histograma del duobinario, **(c)** polibinario-4, **(d)** histograma del polibinario-4, **(e)** polibinario-5, **(f)** histograma del polibinario-5. 92

6.15. Continuación. **(c)** polibinario-7, **(d)** histograma del polibinario-7, **(e)** polibinario-9, **(f)** histograma del polibinario-9. 93

6.16. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 3, 4 y 5 del formato polibinario generados a partir de las muestras experimentales a 125[Mbps] cuando estas viajaron por 18[km] de fibra óptica. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+1.6 \times 10^{-8}[s]$, donde caben ventanas de 8 muestras. **(a)** Duobinario, **(b)** histograma del duobinario, **(c)** polibinario-4, **(d)** histograma del polibinario-4, **(e)** polibinario-5, **(f)** histograma del polibinario-5. 95

6.17. Continuación. **(g)** polibinario-7, **(h)** histograma del polibinario-7, **(i)** polibinario-9, **(j)** histograma del polibinario-9. 96

6.18. Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 3, 4 y 5 del formato polibinario generados a partir de las muestras experimentales a 250[Mbps] cuando estas viajaron por 18[km] de fibra óptica. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+8 \times 10^{-9}[s]$, donde caben ventanas de 4 muestras. **(a)** Duobinario, **(b)** histograma del duobinario, **(c)** polibinario-4, **(d)** histograma del polibinario-4, **(e)** polibinario-5, **(f)** histograma del polibinario-5. 98

6.19. Continuación. Niveles 7 y 9. **(g)** polibinario-7, **(h)** histograma del polibinario-7, **(i)** polibinario-9, **(j)** histograma del polibinario-9. 99

Resumen

En esta tesis se presenta un trabajo experimental que consistió en la implantación de un enlace de fibra óptica constituido por un transmisor (láser + modulador Mach-Zehnder), fibra óptica monomodo de hasta 18[km] de longitud y un receptor (foto diodo PIN). Con esta infraestructura se analizó el desempeño de formatos de modulación de respuesta parcial o polibinarios de hasta 9 niveles y a tasas de transmisión de 32, 125 y 250 [Mb/s].

Los resultados, captados con un osciloscopio, indicaron una buena robustez para el formato de 3 niveles (duobinario), la cual disminuye conforme aumenta el número de niveles, demostrando que el decremento en la razón señal a ruido es el principal obstáculo en la implementación de este tipo de formatos de modulación, caracterizados por un ancho de banda angosto, lo cual los presenta como alternativa para la transmisión de altas tasa de datos en canales espectralmente angostos.

Abstract

In this thesis an experimental work is presented which consisted in the implementation of an optic link implemented using a transmitter (laser + Mach-Zehnder modulator), with up to 18[km] of single-mode fiber (SMF) and a receiver (PIN photodiode). By means of this infrastructure the performance of the partial response modulation formats or polybinary for up to 9 levels and at transmission rates of 32, 125 and 250[Mbps] was analyzed.

The results, recorded through an oscilloscope, indicate robustness of the three level format (duobinary), which diminishes as the number of levels increases, showing that the decrease of the signal-to-noise ratio is the main obstacle in the implementation of this kind of modulation format, characterized by a narrow bandwidth, which presents them as an alternative for high data rate transmission in spectrally narrow channels.

Prólogo

LOS enlaces de fibra óptica son la espina dorsal de la comunicación en la actualidad. Debido al aumento del uso de las tecnologías de la información, el auge de los servicios de *streaming*, el súbito incremento del uso de los servicios remotos por la contingencia sanitaria, entre otros factores, el tráfico de datos en la actualidad ha tenido un severo acrecentamiento. Se estima que para el año 2023, dos tercios de la población mundial tendrán acceso a internet, lo que se traduce aproximadamente en 5.3 miles de millones de usuarios de internet en el mundo, lo cual es un significativo aumento a los 3.9 miles de millones que se tuvieron en 2018 [1].

El constante aumento de tráfico lleva a la industria y a la comunidad científica a buscar tecnologías con más capacidad (chips más rápidos, sistemas con mayor ancho de banda, aparatos que aprovechen mejor el espectro, etc) así como a implementar nuevas redes de telecomunicaciones (satelitales, de telefonía celular y de fibra óptica) para así poder soportar la creciente demanda. De entre todas las redes y sistemas existentes en el mercado de las comunicaciones en la actualidad, los sistemas basados en fibra óptica son los que realizan el trabajo más pesado, al dar cabida a un volumen de tráfico sin comparación y ser la espina dorsal de otras redes de telecomunicaciones. Sin embargo, la construcción de redes ópticas nuevas, o bien, el reemplazo de sistemas de recepción/transmisión ópticos por equipo que soporte tasas de transmisión superiores no son opciones económicamente viables en todos los casos, debido al elevado costo y planificación que requiere su instalación. Es por ello que constantemente se buscan soluciones que permitan aumentar la tasa de transmisión pero que utilicen la fibra y, preferentemente, el equipo que ya se encuentren instalados y

funcionando.

Con tales problemáticas en mente, una propuesta que se plantea es la sustitución de la modulación NRZ (comúnmente utilizada) por la modulación polibinaria en el sistema. La implementación práctica del formato polibinario en la trama binaria en un enlace de fibra óptica de baja capacidad generará una tasa de transmisión ligeramente superior si se compara con el mismo sistema continúe utilizando el formato NRZ. La propuesta de este trabajo de tesis radica en en la creación de una señal polibinaria en el dominio óptico y la observación de su comportamiento.

El uso de la modulación polibinaria exhibe una eficiencia espectral más alta que la modulación NRZ, lo cual se traduce en un ligero aumento en la tasa de transmisión **sin que se tenga que aumentar el ancho de banda del sistema**, lo cual se realizaría cambiando los equipos de recepción y transmisión por otros nuevos más costosos. Si uno aumenta la tasa de transmisión en un enlace con NRZ que no esté preparado para dicho aumento, se observará un aumento en la tasa de bit en error porque el espectro de la señal es más ancho que a aquel que puede manejar el equipo.

El uso del formato polibinario representa una solución a un aumento imprevisto de tasa de transmisión en un sistema previamente consolidado.

Contenido

Esta tesis contiene seis capítulos. El primer capítulo presenta la introducción, que contiene el objetivo, la motivación del problema y las aportaciones del trabajo.

En el segundo capítulo se explican detalladamente conceptos de comunicaciones ópticas necesarios para el entendimiento del desarrollo de esta tesis. Se explican conceptos tales como fibras ópticas, dispersión, fotoreceptores, y modulación óptica con especial interés en la modulación que se realiza con moduladores de fase, basados en el principio del Interferómetro Mach-Zehnder.

En el tercer capítulo se discute el formato polibinario, qué es y cómo se obtiene, así como algunos usos que se le ha dado en comunicaciones ópticas. El formato polibinario es una codificación que otorga un mejor aprovechamiento espectral óptico al introducir interferencia inter-simbólica controlada a la trama óptica.

En el cuarto capítulo se describe el proceso de caracterización del interferómetro Mach-Zehnder utilizado como modulador de amplitud en los experimentos con el formato polibinario. Se describe el proceso de caracterización así como algunos resultados y observaciones acerca del dispositivo.

El quinto capítulo presenta el funcionamiento básico de los programas utilizados como crear la señal polibinaria así como el programa para decodificar las muestras del formato. En este mismo capítulo se muestran los resultados obtenidos a través de simulaciones con el formato polibinario. Todo lo anterior realizado en MATLAB.

El sexto capítulo presenta los resultados de utilizar el formato polibinario en la trama óptica. Se describe el arreglo experimental y se presentan los resultados, mostrados de manera gráfica y a través de tablas de valores de BER. Se muestran para una variedad diferente de parámetros.

Finalmente, en el último apartado se presentan algunas conclusiones sobre este trabajo de tesis así como propuestas para trabajo a futuro.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La propuesta sobre la cual se basa este trabajo de tesis plantea la implementación y análisis experimental de un esquema de modulación polibinario (duobinario y de más niveles) para un sistema de comunicación óptica de corta distancia.

Cuando se instala una red de fibra óptica, se plantea de manera previa la tasa de transmisión máxima que el sistema va a manejar. Si, como normalmente ocurre, se requiere que el sistema posteriormente opere a una tasa de transmisión mayor a la que originalmente se diseñó, comenzará a aumentar la tasa de bit error, porque los componentes del sistema tienen un ancho de banda insuficiente para lidiar con dicha tasa de transmisión. Es aquí donde entra el formato polibinario, pues cambiar la codificación NRZ en un sistema por dicho formato no presenta un cambio difícil, puesto que el equipo que genera el formato NRZ es prácticamente el mismo que aquel que genera el formato polibinario, por tanto no representa una inversión significativa realizar el cambio. Esta ausencia de complejidad radica en que el formato polibinario nace de operaciones lógicas. Por tanto, se puede apreciar su valor cuando se busca implementarlo en redes de fibra óptica que ya se encuentren instaladas, y en las redes cuya tasa de transmisión es insuficiente para atender la siempre

creciente demanda de ancho de banda.

Con la implementación del formato polibinario se busca un aumento en la tasa de transmisión en sistemas que ya se encuentren implementados debido a la inherente eficiencia espectral que otorga este esquema de modulación a la señal óptica, evitando con ello el efecto de concatenación de filtros que los componentes que forman el enlace producirían en una señal con un amplio ancho de banda, acorde con el incremento de la velocidad de transmisión. El principal motivo para el estudio y observación del formato polibinario es que el aumento en la tasa de transmisión beneficiaría a los equipos de telecomunicaciones que ya se encuentren instalados, lo cual a la larga disminuirá los costos de mantenimiento y mejora de redes ópticas al evitar la compra de nuevos equipos más costosos con mayor ancho espectral para elevar el ancho de banda. Más aún, esta modulación mitigaría parte de los efectos nocivos de la dispersión cromática de la fibra al introducir interferencia intersimbólica [15].

1.2. Objetivo

Este proyecto de tesis busca implementar experimentalmente y analizar el comportamiento de un enlace de fibra óptica con modulación polibinaria cuando se usan varios niveles de amplitud en el formato. Se estudiará el comportamiento del interferómetro, la tasa de transmisión al implementar diversos niveles, el efecto de la modulación sobre la dispersión cromática en la fibra óptica, entre otros parámetros.

Como se ha mencionado anteriormente, el formato de modulación polibinario genera una eficiencia espectral aprovechable por los sistemas de comunicación de baja tasa de transmisión y equipos menos sofisticados, por tanto, es de especial interés cómo se comporta en un enlace óptico. El formato polibinario, especialmente de más de 5 niveles (7,9) tiene una mayor eficiencia espectral, lo es una característica muy valiosa, especialmente si se busca combatir los efectos mitigantes de la dispersión cromática. La idea de usar el formato multinivel no es nueva, pues su desarrollo fue planteado originalmente por el Dr. Adam

Lender en 1963. Desde ese tiempo ya se hablaba de la alta sensibilidad al ruido (entre otros problemas) que este formato genera. Sin embargo, se hablaba entonces de señales enteramente eléctricas. Se busca observar el formato polibinario en señales enteramente ópticas, lo cual podría traer a la mesa mejores resultados que su contraparte eléctrica.

Particularmente, se busca:

- Implementar un enlace de fibra óptica y enviar a través del enlace cadenas de bits con modulación polibinaria de 3 niveles (duobinario) creada a través de un modulador Mach-Zehnder. El enlace debe estar conformado por un transmisor láser que module con el formato, un cantidad determinada de fibra óptica como medio y un aparato receptor con los instrumentos de medición.
- Observar los resultados de tasa de transmisión, tasa de bit en error, etc.
- Realizar los mismo objetivos antes mencionados, pero utilizando un formato polibinario de 4, 5, 7, y 9 niveles.

En esta tesis se realizará experimentación e implementación de la modulación polibinaria a través de moduladores Mach-Zehnder. Se busca llevar a la práctica parte de los resultados obtenidos en simulación obtenidos por [14] y comprobarlos o renovarlos al implementarlos físicamente.

1.3. Aportaciones de esta Tesis

A continuación, se resaltan los resultados más importantes derivados de este trabajo:

- Se construyó un programa de comunicación PC-AFG el cual tiene la finalidad de cargar en el AFG una gran variedad de señales arbitrarias, más allá del polibinario, lo cual es de suma utilidad para futuros experimentos que requieran funciones elaboradas.

- Se caracterizó el MZM, lo cual permite conocer con precisión el funcionamiento del modulador, de tal forma que se le saque el mayor provecho. Aunado con el punto anterior, se puede realizar la modulación de la señal óptica con formas arbitrarias de manera rápida y sencilla.
- Se construyó el banco experimental necesario para realizar la caracterización del modulador así como para realizar la transmisión de datos por medio de la señal polibinaria a través de un enlace de fibra óptica. Este banco experimental está construido a partir de un láser, un modulador, un osciloscopio, un AFG, un fotodetector y otros equipos de medición.
- En el banco experimental construido, se logró transmitir señales polibinarias de distintos niveles a través fibra óptica de diversas longitudes, a diferentes tasas. Se logró medir el desempeño de las señales transmitidas, y se desplegaron gráficamente otras características propias de este formato.
- Se simuló el enlace y se logró confirmar de manera experimental las predicciones principales que las simulaciones arrojaron, ampliando así el conocimiento general sobre este tipo particular de modulación en el dominio óptico.

Capítulo 2

Conceptos de Comunicaciones Ópticas

Antes de comenzar a implementar cualquier experimento con el formato polibinario, es necesario reafirmar algunos conceptos relativos a las comunicaciones ópticas, como es el caso de la fibra óptica, los receptores ópticos y principalmente el concepto de modulación óptica y cómo se utiliza en esta tesis.

2.1. Fibra Óptica

La fibra óptica es el medio guiado por el cual se envían los pulsos láser en un enlace de comunicaciones ópticas y usualmente se construye de óxido de silicio (SiO_2) y otros elementos dopantes.

Existe una gran variedad de fibras ópticas. Algunas de ellas son: multimodo, multi-núcleo (de las cuales a su vez existe una gran variedad [16]), Panda, *Bow-tie*, de cristal fotónico, monomodo, etc. De entre todas ellas, es de especial interés la fibra monomodo, o SMF, por sus siglas en inglés.

La SMF es una guía de onda cilíndrica constituida por 3 capas transparentes: el núcleo, el revestimiento (usualmente conocido como *cladding*) y el recubrimiento (conocido como *coating* o *buffer*). En el diagrama mostrado en la Figura 2.1 se aprecia el corte transversal

de una fibra óptica monomodo convencional. La luz entra en uno de los extremos de la fibra y es en el núcleo donde se lleva a cabo la propagación debido al fenómeno de reflexión total interna que se genera por la diferencia de densidad del revestimiento comparado con el núcleo. Capas más allá del *buffer* dependen del tipo de cable que contenga dicha fibra así como el fabricante.

La reflexión total interna se genera debido a la diferencia de índices de refracción de núcleo y del revestimiento. El óxido de silicio que conforma el núcleo tiene un índice de refracción que varía con la longitud de onda que viaje a través de ella ($\eta(\lambda)$), pero tiene valores aproximados de $\eta_{co} = 1.447$ a $\lambda = 1.3[\mu m]$ y $\eta_{co} = 1.444$ a $\lambda = 1.55[\mu m]$, los cuales son los valores de longitud de onda de las ventanas de comunicación ópticas más comunes [13]. El diámetro del núcleo de una SMF es de $10[\mu m]$ mientras que el *cladding* es de $125[\mu m]$.

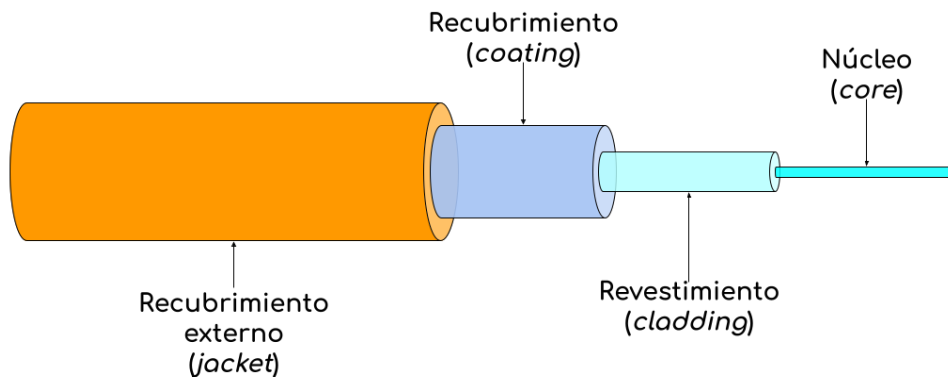


Figura 2.1: Corte transversal de una fibra óptica convencional. El núcleo y el revestimiento usualmente están constituidos de óxido de silicio, están fusionados y son inseparables. El recubrimiento usualmente es de plástico y se debe retirar para realizar empalmes. Dependiendo del tipo de fibra, el cable del que forme parte o el fabricante, nuevas capas entran a conformar los hilos de fibra óptica.

Las fibras ópticas convencionales tienen otras características [18] dignas de mención:

- Alto ancho de banda (decenas de THz) que permite tasas de transmisión superiores a lo que se puede conseguir en sistemas de cobre, radio o inalámbricos.
- La atenuación de fibra hecha de sílice es de alrededor de $0.2[dB/Km]$.

- Las fibras ópticas son electromagnéticamente inertes, pues están constituidas de materiales puramente dieléctricos.

2.1.1. Dispersión

Uno de los principales problemas que se generan en los enlaces ópticos es el fenómeno denominado como dispersión. La dispersión es conocida como la diferencia de la velocidad de grupo en la onda electromagnética como función de la longitud de onda. Este fenómeno produce el ensanchamiento de los pulsos de luz que viajan a través de la fibra óptica conforma aumenta la distancia recorrida. Este aumento del ancho de pulso genera interferencia inter-simbólica (ISI), lo que a su vez genera un impacto en la tasa de transmisión.

Existen tres tipos principales de dispersión: modal, por modo de polarización y cromática. En enlaces de fibra óptica multimodal (de baja capacidad y corta distancia) predomina la dispersión modal, la cual es generada por la diferencia de la velocidad con la que se propagan los modos del haz de luz. La dispersión por modo de polarización se debe a la birrefringencia intrínseca de la fibra que genera que cada componente del vector de campo eléctrico del haz de luz viaje a distinta velocidad. Por último, tenemos la dispersión más conocida y más problemática de todas: la dispersión cromática, la cual es la diferencia de la velocidad a la que cada longitud de onda viaja en la fibra óptica.

Siendo más específicos, la dispersión cromática es la dependencia frecuencial del índice de refracción del medio. Si a través de una fibra óptica monomodal de longitud L se lanza un pulso, entonces el tiempo que tarda dicho pulso en alcanzar el otro extremo del medio está dado por la siguiente expresión:

$$T = \frac{L}{v_g}, \quad (2.1)$$

donde v_g es la velocidad de grupo, definida por:

$$\frac{1}{v_g} = \frac{d\beta}{d\omega}, \quad (2.2)$$

donde β es la constante de propagación de la onda electromagnética. Ahora bien, se puede observar que la velocidad de grupo es una función que depende de la frecuencia, lo cual lleva al ensanchamiento de los pulsos debido a que cada componente espectral del mismo llega al extremo de la fibra a destiempo [3]. Haciendo uso de la expresión 2.2 se puede determinar la expresión del ensanchamiento de pulso ΔT :

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta\omega = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega, \quad (2.3)$$

donde $\Delta\omega$ es el ancho espectral del pulso y β_2 es el parámetro conocido como dispersión de segundo orden y determina que tanto se ensancha un pulsos en la fibra monomodal [3]. La expresión 2.3 puede expresarse en término de la longitud de onda λ :

$$\Delta T = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta\lambda = DL\Delta\lambda, \quad (2.4)$$

donde $\Delta\lambda$ es el ancho espectral en términos de la longitud de onda y D es el parámetro de dispersión con unidades de $[\frac{ps}{km-nm}]$. A este parámetro lo define la siguiente expresión que lo conecta directamente con β_2 :

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2, \quad (2.5)$$

2.2. Fotodetector

Los receptores ópticos son dispositivos electro ópticos que tienen la finalidad de detectar la luz proveniente de la fibra óptica y mediante diversos procesos, dependiendo de la modulación de la luz, decodificar la información. Uno de sus componentes más importantes es el llamado fotodetector, el cual es un fotodiodo construido generalmente de semicon-

ductor el cual se encarga de traducir la potencia del campo eléctrico incidente en corriente eléctrica.

Para los experimentos realizados en esta tesis, se utilizó el esquema de transmisión / recepción más sencillo, el cual es denominado modulación de intensidad-detección directa (IM-DD), donde solo requiere un fotodetector para recibir la señal que viaje por la fibra óptica. El esquema IM-DD es el más simple para entender, pues del lado de transmisión se utiliza la modulación de amplitud, la cual puede ser OOK, o algún nivel de PAM y no se involucra la fase u otras modificaciones a la señal óptica. Del lado del receptor, además del fotodetector, se utiliza un circuito de decisión, denominado como *slicer*, el cual decide que significado (símbolo) se le da a cada nivel que lee el fotodetector. Que tan acertada es la decisión del *slicer* dependerá de la SNR de la señal eléctrica transformada, la cual a su vez está ligada al ruido del fotodetector y otros factores. En tanto exista una distinción en potencia discernible entre distintos niveles de una señal (es decir, que se puedan distinguir un ‘1’ de un ‘0’), es posible muestrear y obtener información de una señal.

Regresando al fotodetector, el proceso para transformar el campo óptico incidente en una señal eléctrica viene del fenómeno de absorción de fotones por un material semiconductor. Cuando la energía de dichos fotones entra en contacto con el material y esta excede la energía de la banda de paso, provoca que se generen pares electrón-hueco. Debido al campo eléctrico producido por un voltaje aplicado al semiconductor, los pares electrón-hueco fluyen a través del material, generando así una corriente. Matemáticamente:

$$I_p = R_d P_{in}, \quad (2.6)$$

donde I_p es la corriente generada en el fotodetector, P_{in} es la potencia óptica de la señal de entrada y R_d es la responsividad del fotodetector [3]. La responsividad se expresa en términos de un parámetro conocido como eficiencia cuántica, la cual denota la razón entre la tasa de generación de electrones contra la tasa de incidencia de fotones. Esto queda más claro si se observa la siguiente expresión [3]:

$$\eta = \frac{\text{tasa de generación de electrones}}{\text{tasa de incidencia de fotones}} = \frac{h\nu}{q} R_d = \frac{hc}{\lambda q} R_d \quad (2.7)$$

La expresión 2.7 denota una dependencia con la longitud de onda. La eficiencia cuántica puede describirse también en términos del coeficiente de absorción α del material semiconductor con el que se trabaje de acuerdo a la siguiente expresión [3]:

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{out}}{P_{in}} = 1 - e^{-\alpha W}, \quad (2.8)$$

donde W es el grosor del material semiconductor.

2.2.1. Fotodiodos

Existen múltiples tipos de fotodetectores: unión $p - n$, unión $p - i - n$, de avalancha, msm, etc. El trabajo presentado en esta tesis utilizó un fotodetector de tipo pin y por tanto es necesario hablar de como funciona dicho fotodetector.

Para comenzar, es necesario hablar de los fotodiodos de tipo $p - n$ polarizados en inversa. Uno de estos fotodiodos está conformado por una región de tipo p y una región tipo n , las cuales generan entre ellas una región de agotamiento. Cuando el fotodetector se enciende, se aplica un voltaje a través de esta unión de materiales que evita que electrones viajen del lado n al p . Cuando se ilumina una de las regiones con una potencia óptica incidente, se generan pares hueco-electrón debido al proceso de absorción. Los electrones y huecos generados se mueven en direcciones contrarias (electrones al lado n , huecos al lado p) y por tanto se genera una corriente eléctrica.

Esta corriente eléctrica posee dos componentes principales: la corriente de deriva o derrape y la corriente difusa. Esta última está relacionada con la absorción de la luz fuera de la zona de agotamiento [3], y afecta la respuesta temporal del fotodiodo.

Ahora bien; una manera de mejorar el funcionamiento de este diodo es agregando una

capa de un material semiconductor distinto entre las regiones p y n , denominada región i , llamada así por que es una región de material semiconductor intrínseco. Así nace el fotodiodo $p-i-n$ o simplemente PIN. Esta zona i posee una mayor resistencia y la mayor caída de voltaje lo que causa que la componente de deriva de la corriente del fotodiodo domine sobre la componente difusa, por que la absorción se realiza principalmente en la región i [3].

2.2.2. Ruido en el Receptor

Como se ha mencionado anteriormente, los fotodetectores transforman una potencia óptica incidente en una corriente eléctrica con base en el fenómeno fotoeléctrico. Sin embargo, este proceso no está exento del ruido. Existe dos principales mecanismos generadores de ruido presentes en el fotoreceptor, el ruido térmico y el ruido de disparo.

El ruido de disparo (conocido como *shot noise*) se genera principalmente por que el flujo de electrones se genera en tiempos aleatorios. La corriente de disparo, $i_s(t)$, es un proceso aleatorio estacionario con estadística de Poisson y no es posible reducirlo por ser parte del proceso de fotodetección.

Por otro lado se encuentra el ruido térmico. En un semiconductor a una temperatura dada, los electrones que lo conforman se mueven de manera aleatoria. Este movimiento termal se puede interpretar como una corriente, $i_T(t)$, aun sin la existencia de un voltaje aplicado. Esta corriente se conoce como ruido termal o térmico (conocido como *thermal noise*). Este tipo de ruido se modela como un proceso aleatorio estacionario Gaussiano. La densidad espectral del proceso térmico está dada por la siguiente expresión:

$$S_T(f) = \frac{2k_B T}{R_L}, \quad (2.9)$$

donde k_B es la constante de Boltzman, T es la temperatura absoluta y R_L es la carga resistiva. Su variancia está dada por:

$$\sigma_T^2 = \frac{4k_B T}{R_l} \Delta f, \quad (2.10)$$

con Δf como el ancho de banda. Esta expresión se puede mejorar al introducir el parámetro de figura de ruido, F_n , que representa como el ruido térmico se amplifica por otros componentes electrónicos. Con ello se llega a la siguiente expresión [3]:

$$\sigma_T^2 = \frac{4k_B T}{R_l} F_n \Delta f \quad (2.11)$$

2.3. Modulación Óptica

En telecomunicaciones, modular es un proceso en el cual se le aplica un tratamiento a los símbolos del mensaje, previo a la transmisión por el canal de comunicaciones, tal que los símbolos se transformen en una señal que se acomode mejor al medio por donde va a ser enviada [5].

Modular puede significar una considerable cantidad de tratamientos:

- Bajar o subir la frecuencia de operación.
- Transformar una señal lógica binaria a una señal en banda base (modulación de pulso).
- Adaptar la señal de información dentro de algún aspecto físico de una señal portadora, la cual se adapte mejor al medio (como es el caso de AM, FM y PM).
- Adaptar señales eléctricas de alta velocidad a una señal láser (modulación óptica).
- Aplicar una codificación a la señal lógica tal que esta adquiera ciertas características deseadas.

El formato polibinario entra dentro de esta última categoría, pero hablaremos de él en

el capítulo 3: Formato Polibinario. Es de especial interés para este capítulo la modulación de un señal láser a través de interferómetros Mach-Zehnder.

Cuando hablamos de sistemas de comunicaciones ópticos, lo primero que debe venir a nuestra mente es la fibra óptica: hilos de vidrio más delgados que un cabello humano, diseñados para transportar luz que lleve información sobre ella. Pero el otro factor primordial de un enlace con fibra óptica es el tipo de luz que utiliza. En un sistema de comunicación óptica, dicha luz en realidad son pulsos láser en el espectro infrarrojo enviados a una alta tasa de transmisión. En general si hablamos de transmisiones en enlaces de fibra óptica a largas distancia, el láser es la señal portadora por excelencia y es la que se modula con la señal de información de interés.

Existe múltiples técnicas para modular un haz láser, pero en general estas técnicas pueden dividirse en dos categorías: modulación directa y modulación externa.

2.3.1. Modulación Directa

Se habla de modulación directa cuando la señal de información modifica la corriente de alimentación del láser de manera directa, es decir, el láser se enciende y apaga de acuerdo a la los niveles altos y bajos de la señal de información. Es un tipo de modulación sumamente sencilla que no requiere una implementación muy compleja. Su funcionamiento se aprecia mejor en el esquema de la Figura 2.2.

Este tipo de modulación presenta una serie de inconvenientes. En primer lugar, los láseres no pueden encenderse y apagarse instantáneamente, lo cual genera distorsión. Además, el mayor problema es que se genera una automodulación de frecuencia en el pulso láser, conocida como *chirp*. A pesar de que este *chirp* puede ser utilizado como una medida para precompensar la dispersión que se genera en la fibra, puede que no sea deseado, por que produce un ensanchamiento del ancho espectral de la señal láser. Por tanto, este tipo de modulación se utiliza principalmente en enlaces de baja tasa de transmisión, usualmente menos de 10[Gbps], donde el ensanchamiento puede ser tolerado [4].

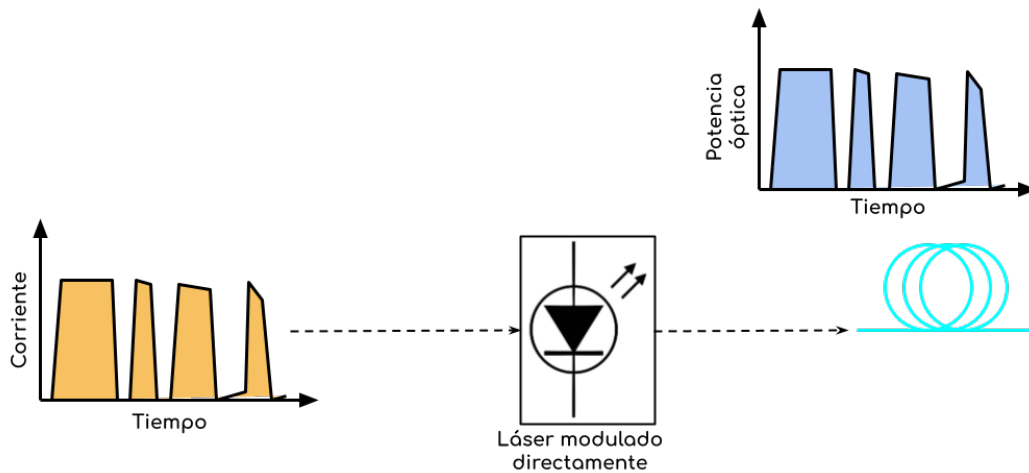


Figura 2.2: Modulación directa.

2.3.2. Modulación Externa

Se habla de modulación externa cuando la modulación se aplica de manera independiente al dispositivo que genere el haz láser. Entonces, la función de un modulador externo es utilizar la señal de información para modificar directamente las características electromagnéticas del haz láser puro, mientras el láser está encendido, otorgando un haz continuo. También existe sistemas que bloquean la luz de acuerdo a la señal de información, utilizando un haz de luz continuo. Su funcionamiento se entiende mejor si se observa el esquema de la Figura 2.3.

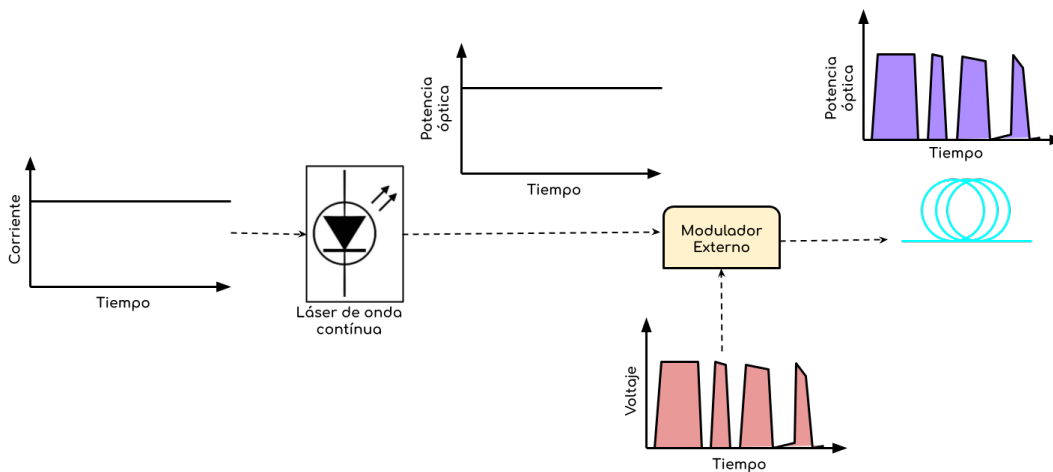


Figura 2.3: Modulación externa.

Existen varios tipos de moduladores externos, de entre los cuales resaltan:

- Moduladores de electro-absorción, o bien EAM por sus siglas en inglés (*Electro-Absorption Modulator*).
- Moduladores electro-ópticos, o bien EOM por sus siglas en inglés (*Electro-Optic Modulator*).

De esos dos, es de particular interés los EOM pues esta familia de moduladores pueden modular en intensidad, fase o polarización y en general funcionan de acuerdo al efecto Pockels. De entre todos ellos, hablaremos en particular del modulador derivado del interferómetro Mach-Zehnder.

2.4. Modulador de Amplitud Basado en el Interferómetro Mach-Zehnder

El interferómetro Mach-Zehnder (MZI, del vocablo en inglés *Mach-Zehnder Interferometer*) es un dispositivo, por lo general óptico, que trabaja extrayendo información de la interferencia destructiva y constructiva que se puede dar entre las ondas electromagnéticas para diversos fines. Trabaja al medir el cambio relativo de fase entre ondas que se separan y se vuelven a encontrar. Existen múltiples variaciones del MZI que sirven para diversos fines en la campo de la ciencia y la industria. Para el caso particular de esta tesis, nos enfocaremos en un tipo específico de MZI: el construido para haces de luz, con uso comercial como modulador para comunicaciones ópticas. El diagrama del modulador Mach-Zehnder, MZM, en cuestión se observa en la Figura 2.4.

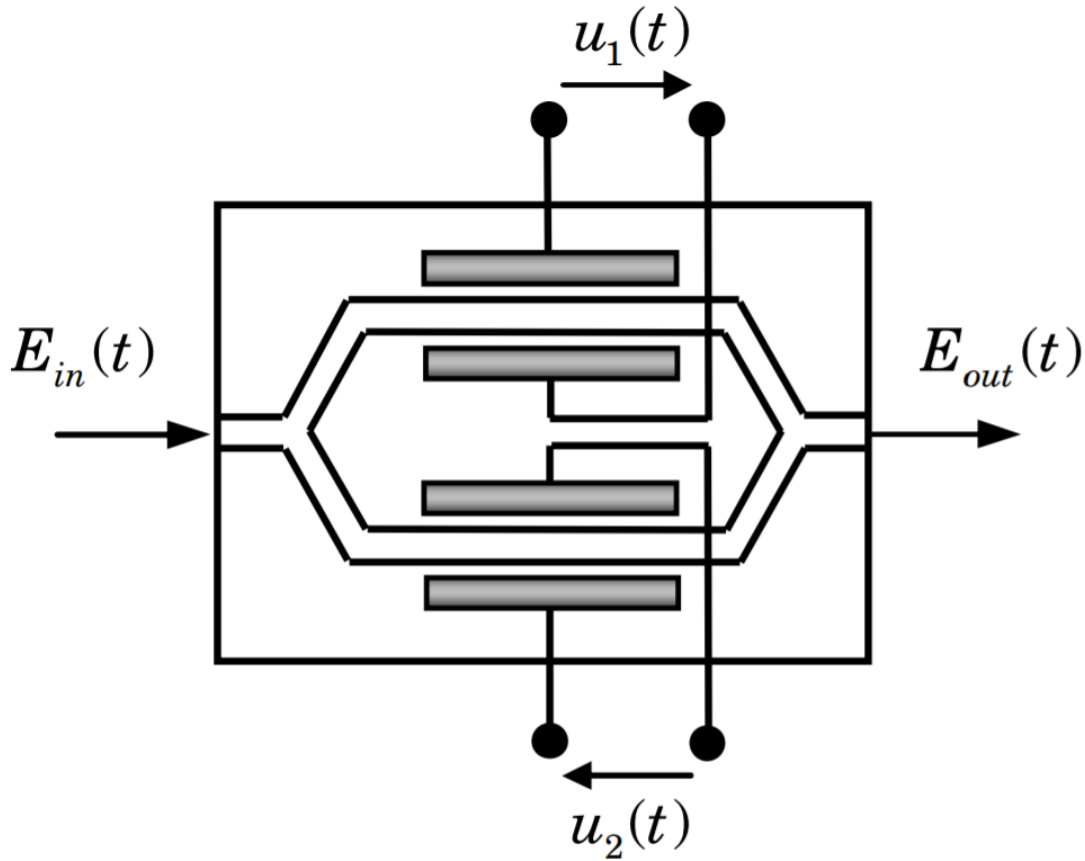


Figura 2.4: Esquema del modulador de amplitud basado en el Interferómetro Mach-Zehnder [17]. El campo eléctrico del haz luz a la entrada $E_{in}(t)$ atraviesa un acoplador 50/50. Cada haz generado pasa a través de una guía de onda creada de cristal de $LiNbO_3$, los cuales se modulan de acuerdo a los voltajes de control $u_1(t)$ y $u_2(t)$. Estos haces modulados se reencuentran a través de otro acoplador 50/50 para formar el haz de luz de salida $E_{out}(t)$.

Este modulador trabaja al hacer incidir un haz de luz (un haz láser específicamente) en un extremo. El haz láser se encuentra con un acoplador 50/50 el cual divide haz en dos haces idénticos con la mitad de la potencia inicial. Cada uno de estos haces atraviesa un brazo del acoplador y viajan por un tramo de guía de onda con características particulares. Esta fibra está construida a partir de un cristal especial (por ejemplo el niobato de litio, $LiNbO_3$, utilizado en muchos moduladores comerciales) que tiene la particularidad de ser susceptible al efecto Pockels, es decir, tiene la particularidad de cambiar su índice de refracción cuando existe un campo eléctrico aplicado. Cuando existe un cambio de índice de refracción en el medio, el haz que atraviese el cristal se verá retrasado (viajará más lento) con respecto a aquel haz que viaje cuando no hay campo eléctrico aplicado. Un

acoplador final reencuentra los dos haces que habían sido separados. Si uno de los haces ha sufrido el efecto Pockels y se ha retrasado con respecto al otro, al reencontrarse existirá una diferencia de fase entre ellos, lo que causará interferencia destructiva. Si ninguno de los haces recombinados sufre retraso, los haces al recombinarse sufrirán interferencia constructiva. Uno puede controlar el campo eléctrico que incide en los brazos. Si una señal de información es la señal que rige o controla los campos eléctricos en cada brazo de tal forma que la señal óptica se vea transformada por esta señal, entonces estamos utilizando el interferómetro como un modulador de amplitud óptica. La señal de información se vuelve quien controla la modulación, y usualmente conoce como *driving signal* o bien la señal de control. En la Figura 2.5 se aprecian moduladores de fase ópticos comerciales.

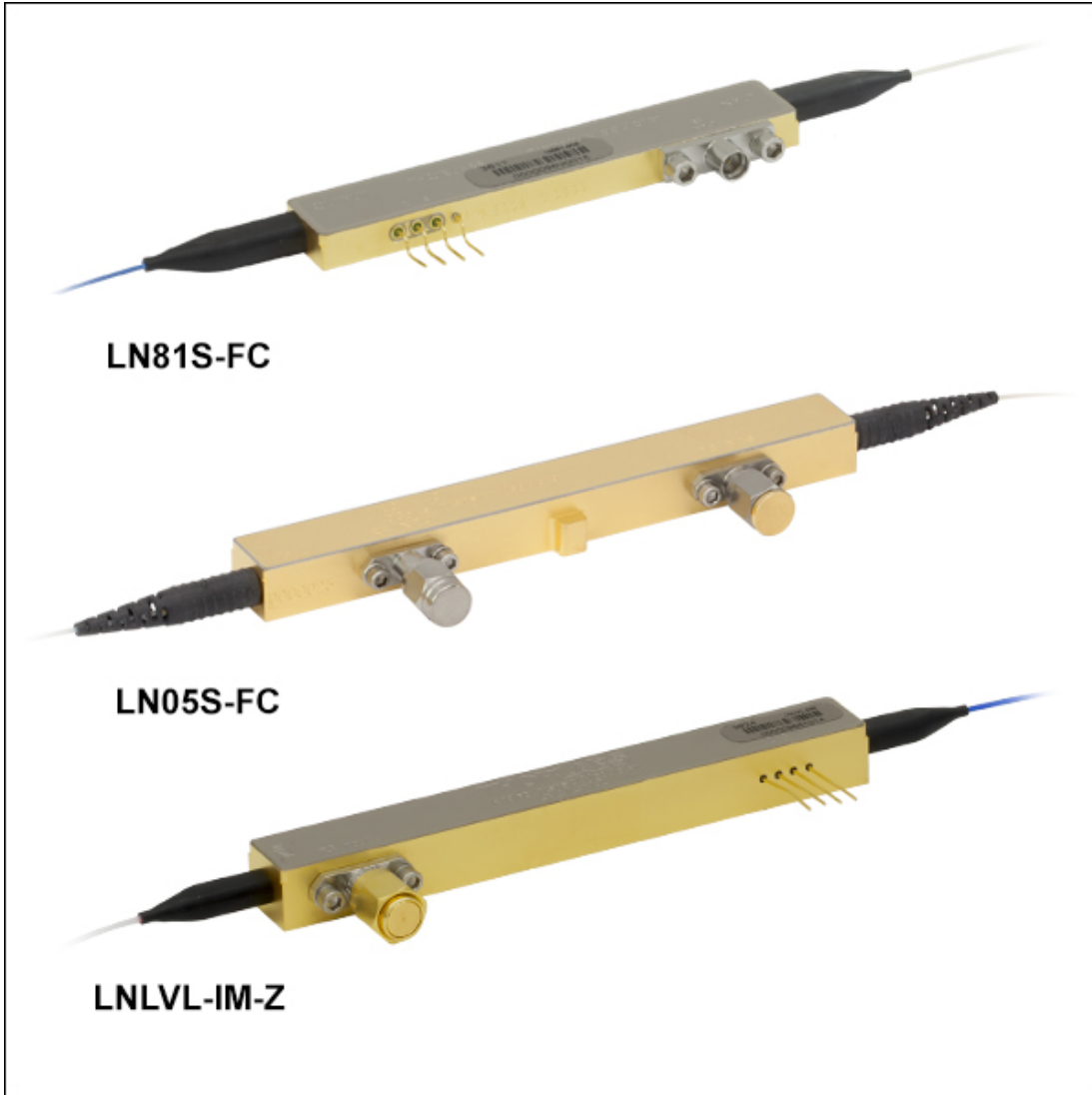


Figura 2.5: Variedad de moduladores de fase ópticos comerciales. Todos trabajan bajo la estructura del MZI y utilizan $LiNbO_3$ como cristal susceptible al efecto Pockels [20].

El campo eléctrico se aplica sobre el cristal electro-óptico a través de electrodos que lo recubren. Matemáticamente, la modulación de fase, $\Phi_{PM}(t)$, que se genera en un brazo de un MZI está dada por la siguiente expresión:

$$\Phi_{PM}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{eff} L_{electrodo} \approx u(t), \quad (2.12)$$

donde λ es la longitud de onda de trabajo, Δn_{eff} es el cambio de índice de refracción efectivo que se presenta en el cristal, L es la longitud del electrodo y $u(t)$ es la señal

eléctrica de información [17]. Lo que esta expresión indica es que el cambio en el índice de refracción dentro del cristal es directamente proporcional a la señal eléctrica que maneje los electrodos, lo cual a su vez es proporcional a la modulación que se aplica al haz láser.

Un modulador óptico con estructura de MZI cuyos dos brazos tienen la capacidad de modular trabaja diferente a aquel con solo un brazo con esa capacidad.

2.5. Función de Transferencia del MZI de Dos Brazos

Para poder entender más a fondo el funcionamiento del MZI como modulador es necesario entrar en la matemática detrás de este. Para hacer eso es necesario analizar la función de transferencia que rige el modulador. La función de transferencia de un modulador de un brazo diverge ligeramente de aquella TF de un modulador con dos brazos con capacidad modulante. Se comenzará el análisis con la TF del modulador de dos brazos. Para todos los análisis siguientes se asume que el MZI es ideal: posee pérdidas de inserción nulas y una división de potencia perfecta (50:50).

Lo que se debe entender primero es cómo es la función de transferencia del cristal electro-óptico. Sabemos que su objetivo es introducir un cambio de fase, por tanto sabemos que se trata de una función compleja. Lo segundo que sabemos es que el cambio de fase debe ser controlado por la señal de información $u(t)$. Se denota entonces un valor V_π que ocasione un cambio de fase de π radianes. Si el valor de la función de información tomar un valor igual a V_π entonces a la salida se observará que la señal tuvo un cambio de fase de π radianes. Con ello podemos escribir matemáticamente la siguiente TF:

$$E_{out}(t) = e^{i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} E_{in}(t), \quad (2.13)$$

donde $E_{in}(t)$ es el campo eléctrico del haz láser a la entrada del cristal electro-óptico y $E_{out}(t)$ es el campo eléctrico del haz láser a la salida del cristal electro-óptico [17].

Ahora bien, es necesario hablar del modulador completo. Para este caso estamos anali-

zando uno con capacidad de modulación en cada brazo. Recordamos que el haz de luz a la entrada se divide en dos haces exactamente iguales y luego las señales partidas y atrasadas se vuelven a encontrar en el siguiente acoplador. Teniendo en cuenta eso y que la expresión 2.13 aplica para cada brazo, entonces la TF de un modulador de dos brazos es la siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} &= \frac{1}{2} \left(e^{i\frac{u(t)_1}{V_{\pi_1}}\pi} + e^{i\frac{u(t)_2}{V_{\pi_2}}\pi} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\cos\left(\frac{u(t)_1}{V_{\pi_1}}\pi\right) + i\sin\left(\frac{u(t)_1}{V_{\pi_1}}\pi\right) + \cos\left(\frac{u(t)_2}{V_{\pi_2}}\pi\right) + i\sin\left(\frac{u(t)_2}{V_{\pi_2}}\pi\right) \right) \end{aligned} \quad (2.14)$$

2.5.1. Configuraciones

Ahora bien, el MZI puede operar bajo distintos regímenes, dependiendo de como se configuren los brazos del modulador. Dichas formas son denominadas operación en modo *push-push* (modulación en fase) y operación en modo de *push-pull* (modulación en intensidad y fase).

Antes de pasar a analizar cada régimen, es importante hacer la simplificación de la expresión 2.15. En moduladores Mach-Zehnder (MZM, utilizando el acrónimo en inglés) de dos brazos, es común que ambos brazos tengan un mismo valor para V_{π} .

$$V_{\pi_1} = V_{\pi_2} = V_{\pi} \quad (2.15)$$

Cuando el cambio de fase que se induce en cada brazo es el mismo, entonces se dice que el modulador trabaja en el régimen *push-push*. Bajo este modo de operación se observa una modulación enteramente de fase. Si el cambio de fase es el mismo, entonces:

$$u(t)_1 = u(t)_2 = u(t) \quad (2.16)$$

Con ello, la expresión 2.14 queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} &= \frac{1}{2} \left(e^{i\frac{u(t)_1}{V_{\pi_1}}\pi} + e^{i\frac{u(t)_2}{V_{\pi_2}}\pi} \right) \\
&= \frac{1}{2} \left(e^{i\frac{u(t)}{V_{\pi}}\pi} + e^{i\frac{u(t)}{V_{\pi}}\pi} \right) \\
&= \frac{1}{2} \left(2e^{i\frac{u(t)}{V_{\pi}}\pi} \right) \\
&= e^{i\frac{u(t)}{V_{\pi}}\pi} \\
&= \cos \left(\frac{u(t)}{V_{\pi}}\pi \right) + i \sin \left(\frac{u(t)}{V_{\pi}}\pi \right)
\end{aligned} \tag{2.17}$$

La expresión anterior queda igual a aquella mostrada en la expresión 2.13, es decir, en esta configuración el modulador trabaja como si fuera un modulador de fase.

Por otro lado, si existe un cambio de fase negativo entre un bazo y otro, se dice que se trabaja en el régimen *push-pull*. Cuando se trabaja en esta configuración se genera una modulación en amplitud y fase. Si existe una diferencia de fase negativa, entonces se tiene que:

$$u(t)_1 = -u(t)_2 \tag{2.18}$$

Para una mayor simplificación, usualmente se tiene que:

$$u(t)_1 = \frac{u(t)}{2} \tag{2.19}$$

Con ello, la expresión 2.14 se transforma de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} &= \frac{1}{2} \left(e^{i\frac{u(t)}{V_{\pi 1}}\pi} + e^{i\frac{u(t)}{V_{\pi 2}}\pi} \right) \\
&= \frac{1}{2} \left(e^{i\frac{u(t)}{2V_{\pi}}\pi} + e^{-i\frac{u(t)}{2V_{\pi}}\pi} \right) \\
&= \frac{1}{2} \left(\cos \left(\frac{u(t)}{2V_{\pi}}\pi \right) + i\sin \left(\frac{u(t)}{2V_{\pi}}\pi \right) + \cos \left(-\frac{u(t)}{2V_{\pi}}\pi \right) + i\sin \left(-\frac{u(t)}{2V_{\pi}}\pi \right) \right) \\
&= \frac{1}{2} \left(\cos \left(\frac{u(t)}{2V_{\pi}}\pi \right) + i\sin \left(\frac{u(t)}{2V_{\pi}}\pi \right) + \cos \left(\frac{u(t)}{2V_{\pi}}\pi \right) - i\sin \left(\frac{u(t)}{2V_{\pi}}\pi \right) \right) \\
&= \frac{1}{2} \left(2\cos \left(\frac{u(t)}{2V_{\pi}}\pi \right) \right) \\
&= \cos \left(\frac{u(t)}{2V_{\pi}}\pi \right)
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Recordemos que estamos trabajando con haces láser. Muchos receptores ópticos trabajan solo recibiendo potencia óptica, y no pueden detectar los cambios del campo eléctrico. Como se comentó en el capítulo anterior, este tipo de recepción se conoce como detección directa, y se lleva bien con la modulación intensidad (*Intensity Modulation-Direct Detection*, IM-DD) debido a que estos tipos de receptores ópticos son sencillos y de bajo costo. Por tanto, debemos analizar las funciones de transferencia desde el punto de vista de la potencia. Para pasar la función de transferencia en su versión de potencia es necesario multiplicarla por su complejo conjugado; sin embargo el resultado del desarrollo 2.20 es real, por tanto solo hace falta elevarlo al cuadrado.

$$\frac{P_{out}(t)}{P_{in}(t)} = \left| \frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} \right|^2 = \cos^2 \left(\frac{u(t)}{2V_{\pi}}\pi \right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos \left(\frac{u(t)}{V_{\pi}}\pi \right) \tag{2.21}$$

En la Figura 2.6 se observan graficados los resultados de las expresiones 2.20 y 2.21. Para la figura se utilizó un valor de $V_{\pi} = 5[v]$. Lo que esto quiere decir es que cuando se apliquen $5[v]$ y $-5[v]$ a los brazos del MZM observaremos a la salida un cambio de $1/2$ longitud de onda de potencia óptica

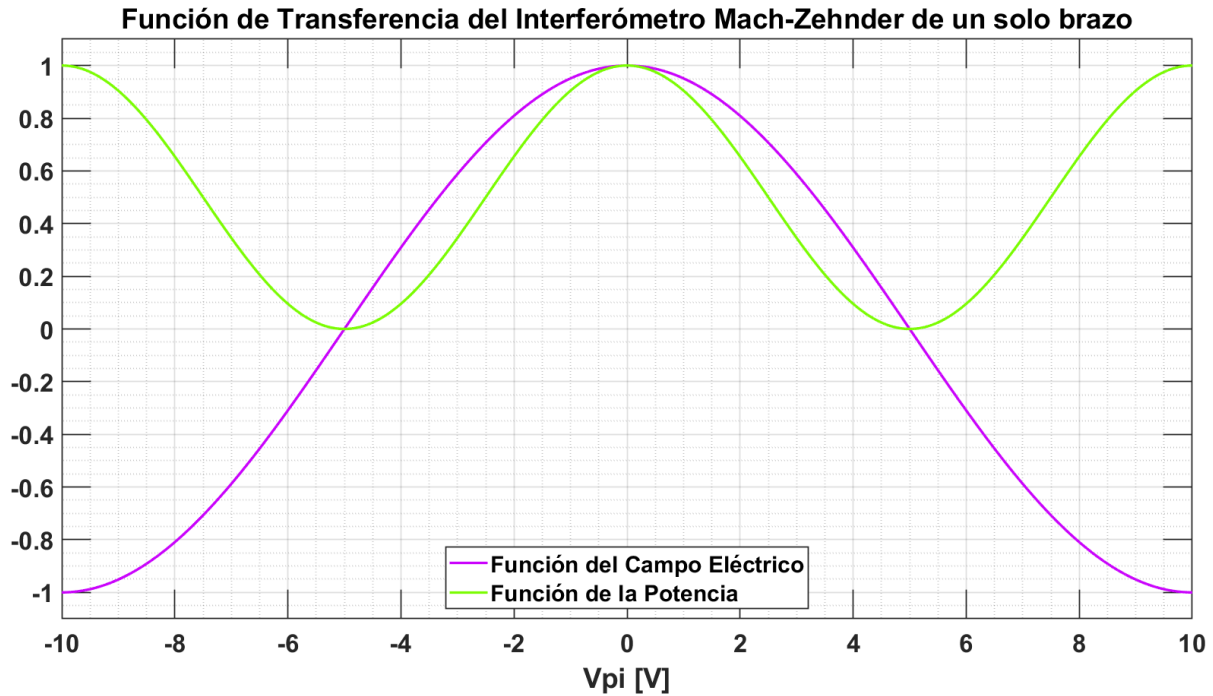


Figura 2.6: Funciones de transferencia (Campo eléctrico y potencia) de un modulador óptico basado en estructura Mach-Zehnder de dos brazos en configuración *push-pull* con $V_{\pi} = 5$ [v].

2.6. Función de Transferencia del MZI de un Brazo

Ahora nos toca estudiar el caso de la función de transferencia para un MZM que posee un solo brazo con capacidad de modulación. Este dispositivo es de particular interés pues es del tipo que se posee en el laboratorio del Instituto de Ingeniería y es con el que se realizarán los experimentos posteriores.

Ahora bien, en la sección anterior, se llegó a la expresión 2.13, es decir la expresión del cristal electro-óptico. La función de transferencia del brazo que solo transmite la fibra del primer acoplador al segundo sin realizar ningún cambio es trivial, siempre y cuando se ignoren los mínimos efectos de atenuación y dispersión en ese pequeño trayecto y es igual a 1. Con ello, la función de transferencia del MZM de un brazo es la siguiente:

$$\begin{aligned}
\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} &= \frac{1}{2} \left(e^{i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} + 1 \right) \\
&= \frac{1}{2} \left(\cos \left(\frac{u(t)}{V_\pi}\pi \right) + i \sin \left(\frac{u(t)}{V_\pi}\pi \right) + 1 \right)
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Para este tipo de moduladores no existen regímenes, pues para ello se requeriría otro brazo que ofreciera versatilidad en la diferencia de fase. Por tanto, pasamos directamente a observar la función de transferencia en su versión de potencia. Por simpleza, es mejor realizar este desarrollo con la forma exponencial de la función de transferencia de campo eléctrico.

$$\begin{aligned}
\frac{P_{out}(t)}{P_{in}(t)} &= \left(\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} \right) \left(\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} \right)^* \\
&= \frac{1}{2} \left(e^{i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} + 1 \right) \cdot \frac{1}{2} \left(e^{-i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} + 1 \right) \\
&= \frac{1}{4} \left(e^{i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} e^{-i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} + e^{i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} + e^{-i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} + 1 \right) \\
&= \frac{1}{4} \left(e^{i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi - i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} + e^{i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} + e^{-i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} + 1 \right) \\
&= \frac{1}{4} \left(e^0 + e^{i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} + e^{-i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} + 1 \right) \\
&= \frac{1}{4} \left(2 + e^{i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} + e^{-i\frac{u(t)}{V_\pi}\pi} \right) \\
&= \frac{1}{4} \left(2 + 2\cos \left(\frac{u(t)}{V_\pi}\pi \right) \right) \\
&= \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{u(t)}{V_\pi}\pi \right) \right) \\
&= \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos \left(\frac{u(t)}{V_\pi}\pi \right)
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Resulta ser que el resultado del desarrollo 2.23 es igual al resultado obtenido en la expresión 2.21, con lo que se concluye que utilizar un MZM de dos brazos moduladores en su configuración *push-pull* es idéntico a utilizar un MZM de un solo brazo al trabajar con moduladores de detección directa (modulación de amplitud).

2.7. Función de Transferencia del MZI de un Brazo no Ideal

En la sección anterior se observaron las TF de los MZM (uno y dos brazos). Ahora bien, estas funciones complejas son teóricas y en la vida real tienen toda clase de limitantes. Sin embargo, existe una diferencia fundamental entre la TF de un MZM real y los vistos anteriormente y es que dichas funciones **no se hayan centradas en 0**. La TF tiene un corrimiento o fase, ϕ , en voltaje que permite más versatilidad a la hora de controlar la modulación. Una versión más realista de las TF del MZM real de un brazo son las siguientes.

$$\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)}_{Real} = \frac{1}{2} \left(\cos \left(\frac{u(t)}{V_{\pi}} \pi + \phi \right) + i \sin \left(\frac{u(t)}{V_{\pi}} \pi + \phi \right) + 1 \right) \quad (2.24)$$

$$\frac{P_{out}(t)}{P_{in}(t)}_{Real} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\frac{u(t)}{V_{\pi}} \pi + \phi \right) \quad (2.25)$$

La función de transferencia es sumamente importante por que nos permite observar como se transforma la potencia de una señal óptica (es decir la variable dependiente, eje absciso) con respecto a una señal eléctrica de control, *driving voltage*, (es decir la variable independiente, eje ordenado).

Si nosotros contamos con la TF real de potencia de un MZM, podemos entonces definir los límites lineales sobre los cuales se puede trabajar. Estos límites lineales son aproximadamente del 20% al 80% de los costados de la función cosenoidal, es decir, la subida y bajada de la función cosenoidal. Esto queda mejor explicado si se observa la Figura 2.7. En esta TF de potencia, se han superpuesto dos rectas en cada costado de la función cosenoidal: la izquierda y la derecha. Elegir cualquiera de estas es trivial, sin embargo, si se utilizan los límites sobre la recta izquierda se tiene un control directamente proporcional,

es decir, si se tiene un voltaje bajo de entrada, se tiene una baja potencia óptica de salida, y si se tiene un voltaje alto de entrada, se tiene una potencia óptica alta a la salida.

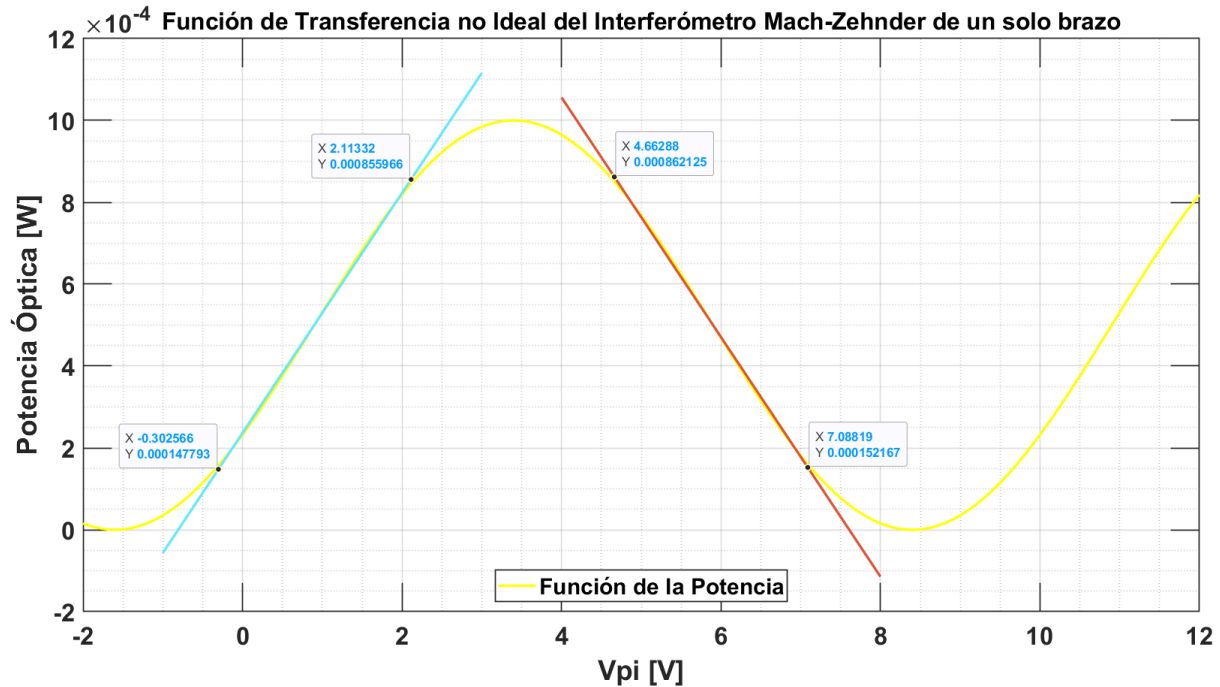


Figura 2.7: Límites lineales dibujados sobre el costado izquierdo de la función de transferencia. El uso de un costado u otro de la TF es trivial pero se prefiere un control directamente proporcional. Este ejemplo tiene un desfase $\phi = 3.4[V]$ y un $V_{\pi} = [4]$.

En la Figura 2.7 se ilustra un ejemplo de TF donde la fase se ha configurado con un valor de $\phi = 3.4[V]$ basado en valores usuales de *datasheets*. Con dicha fase, los límites lineales se han dejado con poco menos del 20% y poco más del 80%. Esto con el objetivo de ilustrar el rango de valores que se deben utilizar, el cual debe ser tan extenso como sea posible, sin entrar en el régimen de la no linealidad de la función. En este ejemplo, el límite máximo queda con un valor de $Lim_{max} = 2.1[V]$ y el límite inferior queda con un valor de $Lim_{max} = -0.3[V]$, los cuales son valores de voltaje manejables. Si las TF de este tipo de modulador se encontraran centradas en 0, los límites lineales serían valores muy altos o muy bajos difíciles de manejar. Estos valores son un buen estimado, sin embargo, para acercarnos más a la realidad, se realizará la caracterización del MZM con el que se realizarán las pruebas. Los resultados de esta caracterización se muestran en secciones posteriores.

Capítulo 3

Formato Polibinario

La señalización de respuesta parcial o modulación correlativa es una técnica de modulación que otorga una cantidad controlada de interferencia intersimbólica (ISI) a una trama binaria. La modulación polibinaria es una subtécnica de la codificación correlativa; es decir, genera una modificación en la trama binaria donde los pulsos dependen de los pulsos anteriores [5].

El aumento de la demanda de tasa de transmisión ha hecho que la industria en telecomunicaciones busque nuevos métodos de modulación avanzados. El problema radica en que estos esquemas de modulación avanzada requieren sistemas muy complejos, como lo sería WDM, polarización dual, recepción coherente u otros procesos, los cuales son costosos, especialmente si se trata de sistemas de relativa corta distancia. El esquema de modulación polibinaria presenta una solución a la necesidad del incremento de ancho de banda, pues fue creado originalmente para dicho problema pero para sistemas basados en cobre. Al otorgarle ISI a una trama binaria ocurre un ensanchamiento de los pulsos. Rememorando lo aprendido con el análisis de Fourier, recordamos que pulsos más anchos en el dominio del tiempo son más estrechos en el dominio de la frecuencia. Por tanto, una ventaja de este formato de modulación es que al generar un ensanchamiento, se crea también un espectro más angosto, lo cual se traduce en una mejor eficiencia espectral.

Otra principal razón para continuar investigando el formato polibinario en un sistema óptico es que existe una estrecha relación entre el uso de espectro y la dispersión cromática. Con una mejor eficiencia espectral, teóricamente el efecto de la dispersión cromática debe disminuir [15]. Recordemos que eliminar los efectos de la dispersión cromática es el ‘santo grial’ de las comunicaciones ópticas.

3.1. Estado del Arte

Como se mencionó anteriormente, el Dr. Adam Lender introdujo la técnica de codificación correlativa conocida como polibinario en 1963 [11, 12]. En dichos trabajos se habla de la capacidad que tiene este tipo de modulación para manipular el espectro de un flujo de bits en uno más compacto. En la actualidad, dichos trabajos se quedan rezagados debido a la facilidad para generar el formato polibinario desde el dominio digital y no a través de dispositivos analógicos como se habla en los artículos.

Con el avance tecnológico, el formato polibinario ha cambiado de los sistemas de cobre y ya ha hecho su camino rumbo a los sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica. De entre todo el trabajo realizado con el formato polibinario, resaltan las siguientes investigaciones.

En el trabajo de [22] se contrasta, a través de simulaciones, el desempeño de cuatro modulaciones diferentes: polibinario, polibinario AM-PSK, M-ary ASK y policuaternario cuando se trabaja en enlaces de fibra óptica a 1550[nm]. Las simulaciones concluyeron que la señalización multinivel puede utilizarse para extender el rango de un enlace óptico cuando se trabaja a 10[Gb/s]. También se concluye que el sistema multinivel no presenta mejores resultados que el sencillo duobinario.

En el trabajo presentado en [19], se ha reportado una tasa de transmisión de hasta 14.32[Gbps] utilizando el formato polibinario de 7 niveles a través de 40[km] de fibra óptica SMF utilizando un láser modulado directamente (DML, por las siglas del vocablo en inglés *Directly Modulated Laser*). El láser utilizado fue un láser de realimentación distribuida

(*distributed feedback laser*) con una corriente de sesgo de 45[mA] operando a 1550.2[nm] con un ancho de banda de 12.5[GHz].

En 2015, en el trabajo presentado en [6] se utilizó una técnica de detección en cuadratura con polibinario de 4 niveles (*quadrature-4PB*) junto con MLSE (acrónimo de *Maximum Likelihood Sequence Estimation* - estimación de secuencia a través de parecido máximo) con la cual se pudo construir un sistema de 3 canales super-Nyquist WDM PDM-QPSK a 112[Gbps] con espaciamiento intercanal de 20[GHz] obteniendo así una eficiencia espectral de 5[bit/s/Hz]. De acuerdo con lo resultados, la OSNR (con una BER de 10^{-3}) es 1.4[dB] menor que aquella necesaria para un sistema PDM-16QAM. Este sistema funcionó en un enlace de 960[km]. Sin embargo, la diferencia principal con otros sistemas es que en esta investigación no se realizó ninguna transformación de pulso del lado del transmisor, sino más bien se realizó la transformación de pulsos QPSK a *quadrature-4PB* de manera digital en el receptor.

En [9, 10, 23], Igarashi et al. presentan una serie de investigaciones referentes al desempeño de pulsos polibinarios para señales QAM multiplexadas en polarización en sistemas Super-Nyquist-WDM. Estas investigaciones nacen de la eficiencia espectral inherente del formato polibinario la cual puede ser una solución para reducir el problema de *crosstalk* que se genera en sistemas WDM debido a la ISI.

Sin embargo, no todos las investigaciones buscan mejorar los enlaces de larga distancia. Los sistemas de comunicaciones de corta distancia que utilizan VCSELs (del acrónimo *Vertical-cavity surface-emitting laser* - láser de superficie emisora con cavidad vertical) y fibra multinúcleo son implementaciones de bajo costo y baja complejidad. En el trabajo de [21] se utiliza el formato duobinario y polibinario-3 para incrementar la tasa de transmisión sin aumentar drásticamente la complejidad del sistema. Esta investigación se realizó sin errores ($BER < 10^{-12}$) y sin utilizar FEC. El formato polibinario se implementó a través de sumas y atrasos de manera digital. Se alcanzaron tasas semejantes a PAM-4.

3.2. Del Binario al Polibinario

En la modulación polibinaria una trama de dos niveles lógicos ('0' y '1'), a_k , se transforma en una trama, c_k , de M niveles lógicos $(0, 1, 2, \dots, M)$.

$$\text{Polibinario}(a_k) \longrightarrow c_k \quad (3.1)$$

La cantidad de estos niveles está dictaminada por el tamaño de la ventana de bits que se suman para ser correlacionados. Conforme se vaya trabajando con una modulación polibinaria con una cantidad más alta de niveles, más difícil es alcanzar el nivel más alto o el más bajo, pues es menos probable encontrar una cadena bits consecutivos (ceros seguidos o unos seguidos) que sumen el valor de dicho nivel. Cada vez que se codifica en uno de los niveles, la ventana se mueve un bit, creando un nuevo nivel que le corresponda a dicho nuevo bit. Entre más niveles tenga esta modulación, mejor será la eficiencia espectral, es decir, más estrecho será su espectro.

Ahora bien, es necesario hablar de como se genera una señal polibinaria de M niveles. En si, el algoritmo para transformar una cadena de bits regulares a una cadena polibinaria es bastante sencillo. Este procedimiento se explica a continuación.

3.2.1. Precodificación

Para una demodulación de la señal polibinaria con menos probabilidad de bits en error, es necesario una precodificación. Esto es debido a la propagación de errores. Sin precodificación, el proceso de decodificación de un bit actual requiere del bit decodificado anteriormente. Esta memoria produce cadenas de errores, pues si existe un bit en error, este error se propaga. Se entiende que sin esta precodificación, la demodulación puede ser exitosa pero está sujeta a ser transmitida por un canal que no produzca tantos errores, o que exista una OSNR considerable. El problema es que esas son características lujosas que usualmente no se poseen en el canal óptico. Con esta sencilla precodificación, podemos

evitar esta concatenación de errores, pues el proceso de decodificación pierde la necesidad de saber el resultado del bit anterior. Para precodificar una cadena de bits a_k en la cadena b_k se sigue la siguiente expresión [5]:

$$b_k = a_k \oplus b_{k-1} \oplus \cdots \oplus b_{k-(M-2)} \quad (3.2)$$

La expresión 3.2 puede traducirse en que para transformar el bit actual de la secuencia a_k en su contraparte b_k , es necesario aplicar la operación suma en aritmética módulo 2 (o bien la operación XOR) entre dicho dígito actual con los dígitos ya transformados anteriormente. La cantidad de dígitos ya transformados a operar está dada por el nivel del formato M . Por ejemplo, si se trabaja con el formato duobinario, la cantidad de niveles M que puede alcanzar es 3, por tanto la expresión anterior se simplifica a lo siguiente:

$$b_k = a_k \oplus b_{k-1} \oplus \cdots \oplus b_{k-(3-2)} \rightarrow b_k = a_k \oplus b_{k-1}, \quad (3.3)$$

lo cual significa que el dígito actual solo depende del dígito inmediato anterior transformado. Esto resulta más claro con un ejemplo. Obsérvese la Figura 3.1. Se tiene una cadena binaria coloreada en rosa. Debemos aplicar la ecuación 3.3. Al iniciar la precodificación necesitamos el último bit transformado b_{k-1} para operar, pero como apenas estamos comenzando, lo podemos proponer. Considerando $b_{k-1} = 0$, entonces se opera b_{k-1} con el dígito a_k para obtener el dígito b_k como ilustran las flechas de la figura. Este último resultado es ahora el dígito b_{k-1} y se repite el proceso con el bit siguiente. La operación continúa hasta haber transformado toda la cadena de bits.

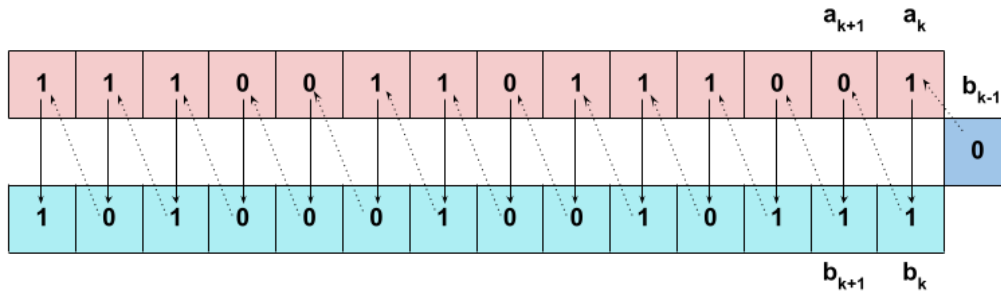


Figura 3.1: Ejemplo del proceso de precodificación de una cadena binaria (rosa). Número de niveles M es igual a 2 (duobinario).

Como se mencionó, es posible utilizar el formato polibinario sin utilizar la precodificación antes vista pero al requerir tomar en cuenta el valor decodificado anteriormente caemos en problema de la propagación de errores. Si durante el proceso de detección, un símbolo polibinario se detectó incorrectamente en otro valor por cuestiones de baja OSNR, resulta que el proceso de decodificación comenzará a propagar este error con los símbolos que vengan. Utilizar la precodificación permite que el proceso de decodificación no tenga memoria (*memoryless*) y se realice la operación símbolo por símbolo [5].

3.2.2. Señal Polibinaria

Ahora, sucede la verdadera transformación a polibinario. La siguiente operación puede realizarse ya sea con o sin precodificación, pero por las razones antes discutidas y por fines didácticos, consideramos la cadena de bits precodificada. Para transformar una cadena b_k a una cadena en formato polibinario c_k se realiza lo siguiente:

$$c_k = b_k + b_{k-1} + \cdots + b_{k-(M-2)} \quad (3.4)$$

La expresión anterior puede traducirse en que para transformar un bit de la secuencia precodificada b_k en su contraparte polibinaria c_k , es necesario sumar el dígito actual con los dígitos anteriormente codificados. La cantidad de dígitos ya transformados a operar

junto con el actual está dada por la cantidad M de niveles con los que se esté trabajando. Nuevamente, si se trabaja con el formato duobinario, la cantidad de niveles M con los que se trabaja son 3, lo que significa que la transformación del dígito actual solo depende del dígito inmediato anterior transformado [5].

$$c_k = b_k + b_{k-1} \tag{3.5}$$

Una vez más, esto se entiende mejor con un ejemplo. Utilizando la cadena precodificada que se obtuvo en el ejemplo anterior coloreada de azul, pasamos a codificarla a duobinario utilizando la expresión 3.5. Hacemos uso del bit inicial propuesto, b_{k-1} , que utilizamos para precodificar como parte de toda la cadena, de tal forma que sumamos el bit actual, b_k con el anterior, que sería b_{k-1} , para así obtener c_k . Recorremos la ventana, y operamos como ilustran las flechas de la figura, siempre sumando el dígito actual con el anterior. La operación continúa hasta haber transformado toda la cadena de bits precodificados.

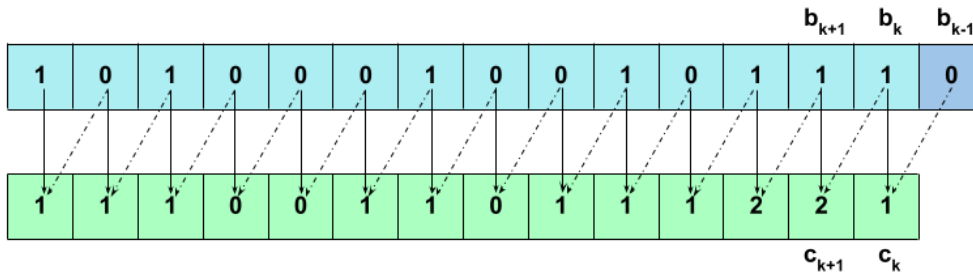


Figura 3.2: Proceso de codificación de una cadena precodificada. Número de niveles M es igual a 2.

3.2.3. Decodificación

Ahora es momento de recuperar la información binaria que está contenida en la cadena polibinaria. La demodulación de una señal polibinaria es sencilla, si se utiliza una precodificación previa. Como se mencionó anteriormente, gracias a esa precodificación el proceso para hallar los bit codificados es un proceso sin memoria, pues solo se le debe hacer una operación módulo 2 (residuo al dividir entre 2 cada dígito polibinario) a cada elemento de

la trama polibinaria c_k y con eso se recupera la trama original a_k [5].

$$a_k = \text{mod}_2(c_k) \quad (3.6)$$

Si nosotros realizamos esta sencilla operación a la trama duobinaria que venimos trabajando en nuestro ejemplo, resulta que obtendremos la trama binaria original. Esto se ilustra en la Figura 3.3.

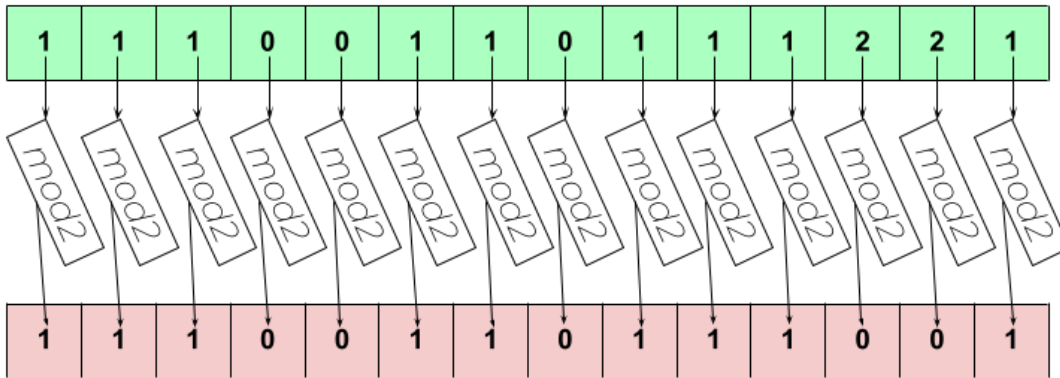


Figura 3.3: Proceso de decodificación de una cadena polibinaria a la cadena binaria que la originó. Número de niveles M es igual a 2.

Capítulo 4

Caracterización del Modulador

IM-1550-20-u

Una vez que se han repasado los conceptos básicos del funcionamiento del modulador basado en el interferómetro Mach-Zehnder en el capítulo 2, es necesario realizar la caracterización del dispositivo físico que se usará en los experimentos con el formato polibinario.

Esta caracterización es necesaria para que se pueda asegurar que las propiedades presentadas en el material de referencia del dispositivo sean correctas; y en caso de que existan cosas imprevistas sea posible realizar las modificaciones necesarias para acoplar los experimentos.

El modulador MZ utilizado es el presentado en la Figura 4.1. Este dispositivo es un modulador de la marca Optilab que trabaja a una $\lambda = 1550[nm]$ y tiene un ancho de banda de $20[GHz]$. Como se observa en la figura, este dispositivo posee 2 puertos eléctricos de entrada: el puerto RF y el puerto DC. Es necesario conocer el comportamiento de estos puertos para elegir con cual conviene trabajar así como encontrar el punto de cuadratura óptimo para saber como afectan entradas de voltaje a la señal portadora óptica y así generar la modulación óptica necesaria.

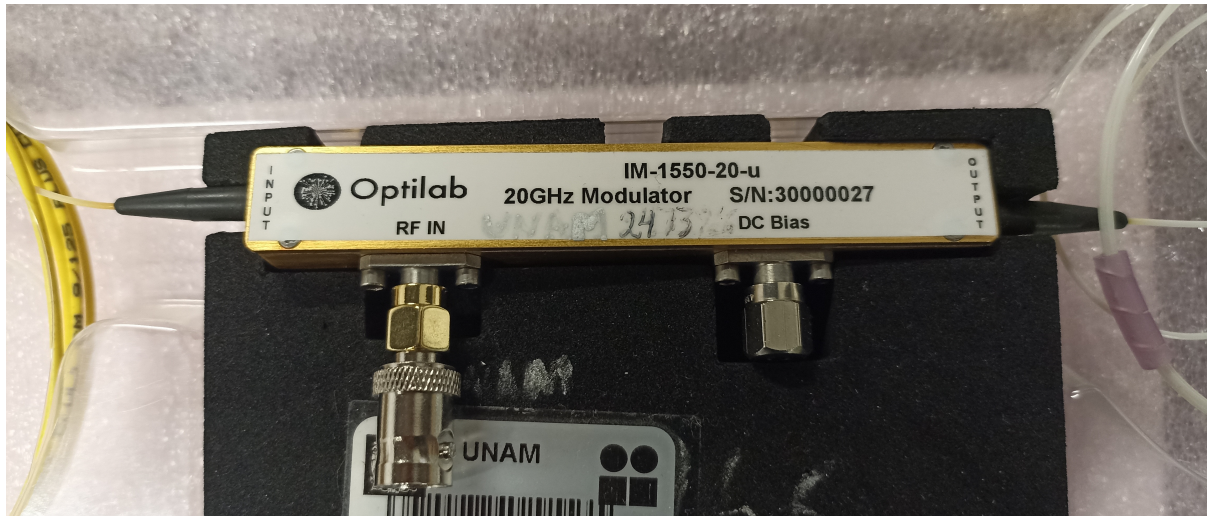


Figura 4.1: MZM marca Optilab. Se aprecian los dos puertos de entrada eléctrica: DC y RF, así como los puertos ópticos de entrada y salida. Opera a 1550[nm] y posee un ancho de banda de 20[GHz].

Con estas interrogantes en mente se procedió a realizar la caracterización de cada puerto del interferómetro.

4.1. Pruebas en el Puerto DC

Inicialmente, se trabajó con el puerto DC. Este puerto tiene la función de ayudarle al usuario a situarse sobre el punto de cuadratura de la función de transferencia para así encontrar la posición que otorgue el *swing* óptimo. Su función de transferencia es una función cosenoidal.

Para realizar la caracterización se introdujo una variable en la forma de una señal de corriente directa al puerto mientras una señal láser continua atravesaba el modulador. Se observó como se modifica la potencia óptica de la señal portadora láser conforme la señal de voltaje variaba. Se realizó un barrido de corriente directa introducida en el puerto DC con el cual se pudieron obtener los datos de la Tabla 4.1.

Con los datos anteriores se puede construir una gráfica cuya forma asemeja a una función cosenoidal. Conociendo la forma de la respuesta, se utilizó un programa de Matlab

Tabla 4.1: Respuesta del Puerto DC del MZM 1.

Voltaje [V]	Potencia [mW]	Voltaje [V]	Potencia [mW]
0	0.92045	6.1	1.26474
1.2	2.10378	6.2	1.06660
2	2.95121	6.3	1.03514
3.2	3.65595	6.5	0.77090
4	3.64754	7	0.22646
5	2.95121	8	0.07816
5.3	2.48313	9.1	1.01625
5.7	1.68112	10	2.44343
5.9	1.55955		

cuyo objetivo es otorgar los coeficientes necesarios para construir la función cosenoidal que más se aproxime a los puntos otorgados. La función cosenoidal que más se aproxima se observa en la Figura 4.2.

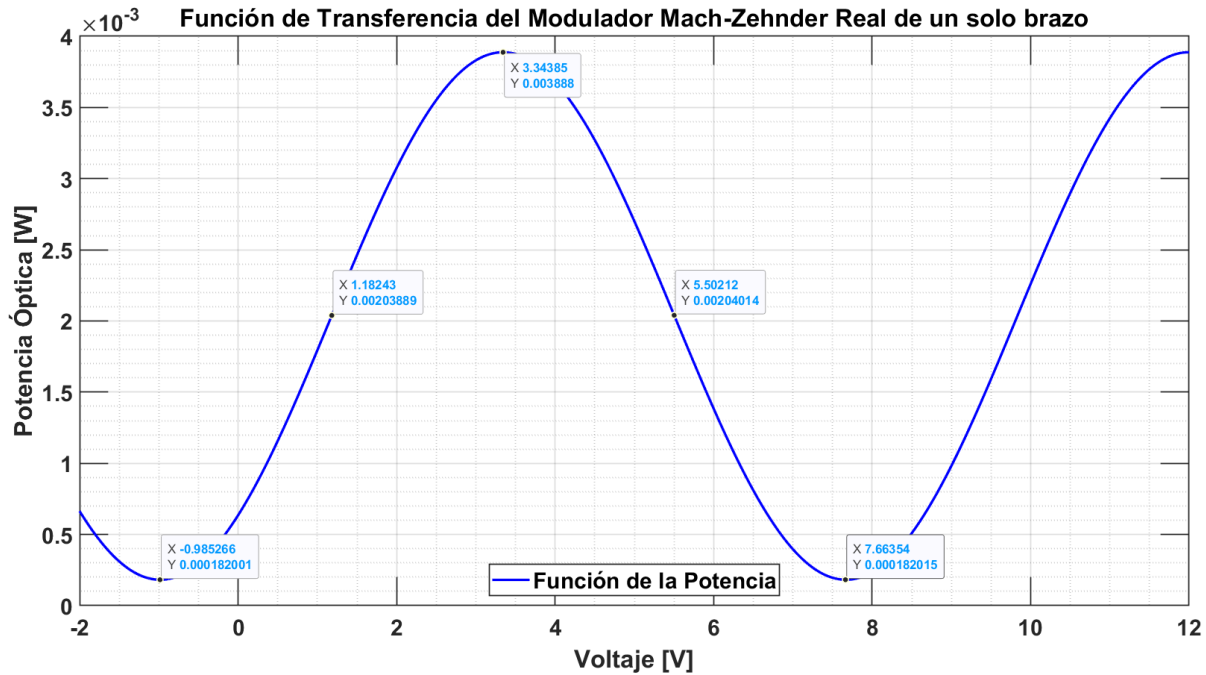


Figura 4.2: Función de transferencia del MZM.

Lo más importante es que se obtuvo el valor del parámetro más importante: $V_{\pi} = 7.66[V]$. La hoja de especificaciones marca, para V_{π} en DC, un rango entre 6.5[V] y 8[V].

Sobre la curva sinusoidal que se generó, se pudieron hallar los siguientes puntos de

cuadratura: $QP_1 = 1.18[V]$ y $QP_2 = 5.5[V]$. Estos parámetros son de vital importancia para configurar correctamente el programa de control que permite controlar el MZM. Los puntos más relevantes se destacan en la Figura 4.2.

4.2. Pruebas en el Puerto RF

Para el puerto denominado RF se realizaron una serie de distintas pruebas con el objetivo de comprender como utilizarlo y si es el puerto viable para realizar los experimentos.

4.2.1. *Offset* Variable y Potencia de Salida

En este experimento se introdujo al puerto RF del MZM una señal conformada por pulsos de 100[ns] de ancho a una frecuencia de repetición de 20[kHz]. La amplitud de los pulsos se mantuvo fija a 5[V] y la variable es el *offset* (también conocido como *DC-bias*) de la señal de voltaje, medido en [V]. Se realizó un barrido del *offset* de -5 A 5 [V]. La señal portadora es un haz láser a 1550.2[nm] y 10[dBm] de potencia de entrada. Se realizaron mediciones de potencia a la salida del modulador. Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 4.2: Amplitud fija de 5[V]. *Offset* variable vs. Potencia de Salida

Offset [V]	Potencia [W]	Offset [V]	Potencia [W]	Offset [V]	Potencia [W]
-5	1.20E-03	-1.6	6.97E-04	1.8	1.63E-03
-4.8	4.90E-04	-1.4	7.52E-04	2	1.70E-03
-4.6	1.53E-04	-1.2	8.08E-04	2.2	1.78E-03
-4.4	2.10E-04	-1	8.54E-04	2.4	1.84E-03
-4.2	9.70E-05	-0.8	9.00E-04	2.6	1.90E-03
-4	3.48E-05	-0.6	9.17E-04	2.8	1.96E-03
-3.8	6.70E-05	-0.4	9.47E-04	3	2.00E-03
-3.6	1.32E-04	-0.2	1.01E-03	3.2	2.07E-03
-3.4	1.85E-04	0	1.09E-03	3.4	2.11E-03
-3.2	2.04E-04	0.2	1.08E-03	3.6	2.15E-03
-3	2.72E-04	0.4	1.13E-03	3.8	2.20E-03
-2.8	3.27E-04	0.6	1.23E-03	4	2.25E-03
-2.6	3.75E-04	0.8	1.30E-03	4.2	2.30E-03
-2.4	4.29E-04	1	1.38E-03	4.4	2.34E-03
-2.2	4.98E-04	1.2	1.46E-03	4.6	2.38E-03
-2	5.73E-04	1.4	1.52E-03	4.8	2.43E-03
-1.8	6.37E-04	1.6	1.56E-03	5	2.46E-03

Con eso datos podemos generar la gráfica ilustrada en la Figura 4.3.

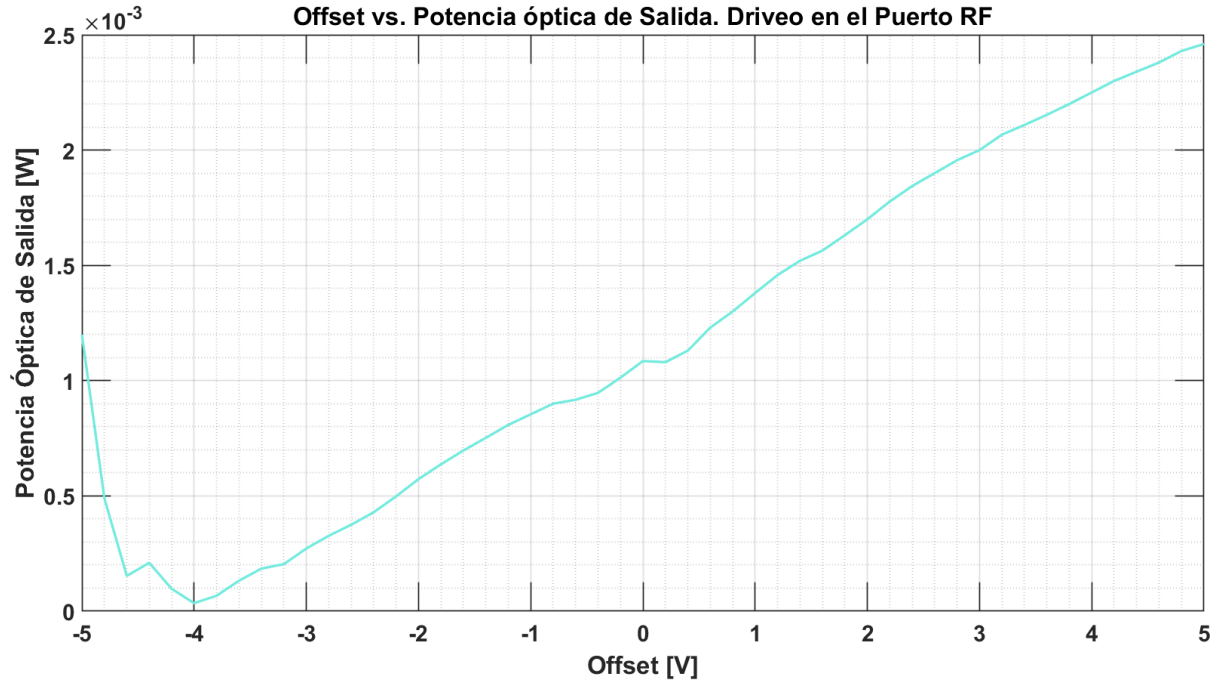


Figura 4.3: Offset Variable vs. Potencia de Salida Óptica.

Esta gráfica nos da una idea de donde ubicar la señal de control para el modulador. Esta señal del control puede subir y bajar (*swing*) en tanto se centre aproximadamente entre 0 y 1 [v]. Podemos mandar una señal de información que tenga un *offset* de 0[V] y una amplitud pico-pico de 5[V], por ejemplo.

4.2.2. Amplitud de Entrada vs. Amplitud de Salida

En este otro experimento se busco observar la respuesta del modulador ante un barrido de la amplitud pico-pico del pulso que se mande.

Se utilizó como entrada un tren de pulsos cuadrados con ancho de pulso $\tau = 32[ns]$ como señal moduladora y el mismo haz láser a $\lambda = 1550[nm]$ en la entrada óptica como señal portadora. En la salida no se trabajo con potencia óptica, si no esta vez se observaron los pulsos recibidos en un osciloscopio y se midió su amplitud. Para observar los cambios en la salida, a la señal eléctrica se le modificó su amplitud pico-pico y el *offset* de dicho pulso se mantuvo constante en 1.5[V]. El aumento de la amplitud de la señal realizó aumentado

0.25[V] al nivel alto de la señal y aumentando -0.25[V] al nivel bajo de la señal.

Las mediciones realizadas se plasman en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: $Amplitud_{Pico-Pico}$ variable vs. $Amplitud_{Pico-Pico}$ de Salida

Límite Superior (High) [V]	Límite Inferior (Low) [V]	Amplitud de Entrada [Vpp]	Amplitud de Salida [mV]
2	1	1	0.28
2.25	0.75	1.5	0.424
2.5	0.5	2	0.536
2.75	0.25	2.5	0.632
3	0	3	0.776
3.25	-0.25	3.5	0.888
3.5	-0.5	4	0.984
3.75	-0.75	4.5	1.08
4	-1	5	1.16
4.25	-1.25	5.5	1.24
4.5	-1.5	6	1.26
4.75	-1.75	6.5	1.3
5	-2	7	1.34
5.25	-2.25	7.5	1.36
5.5	-2.5	8	1.36
5.75	-2.75	8.5	1.36
6	-3	9	1.31
6.25	-3.25	9.5	1.24
6.5	-3.5	10	1.22

Con los datos de la tabla anterior, específicamente la tercer y cuarta columna, podemos construir la gráfica presentada en la Figura 4.4.

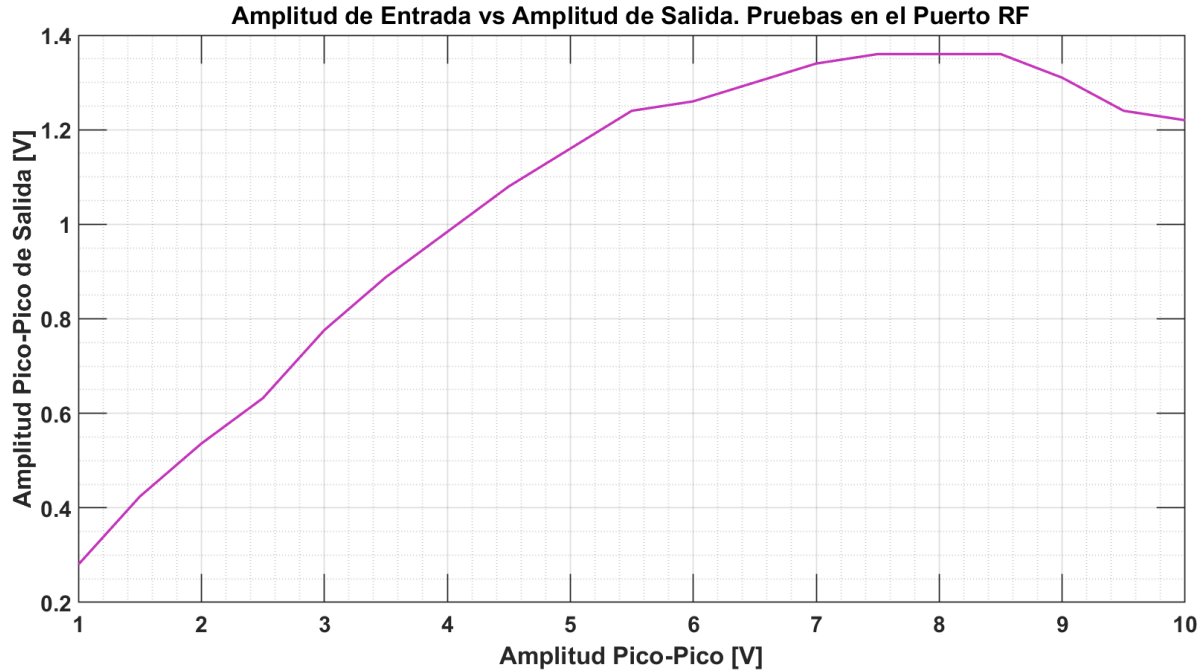


Figura 4.4: Amplitud de la señal de entrada vs. amplitud de la señal de salida. Pruebas en el puerto de RF.

Pasados los 5.5 [v_{pp}] se observa que el modulador pierde linealidad, por tanto no podemos abusar del rango de valores para un *swing* apropiado. La señal de control se vería distorsionada en las partes más altas y bajas si la amplitud es demasiado alta.

4.3. Conclusiones Preliminares

El modulador de amplitud M-1550-20-U basado en el interferómetro Mach Zehnder utilizado en esta caracterización es un dispositivo muy peculiar. El aparato presentó una serie de problemas inesperados. Los resultados obtenidos presentaban demasiadas variaciones entre experimento y experimento, inclusive entre cada toma de datos. Los valores mostrados en los aparatos de medición fueron erráticos y a pesar de esperar un tiempo para tratar de llegar a valores estabilizados, en general no llevó a ningún resultado provechoso. A pesar de esas limitantes, el modulador lleva a cabo su trabajo, pues nos permite controlar la luz láser, aunque no con tanta precisión como se esperaría.

Se concluyó que llevar al modulador a cambios extremadamente bruscos en los voltajes de control, como aquellos utilizados para realizar barridos, alteraban el comportamiento del modulador. Los puntos de cuadratura no se mantienen en un punto establecido. Uno puede obtener un rango de resultados al comienzo de una experimentación y tras una jornada de experimentos, acabar en otro rango distinto.

Otro detalle que se encontró al trabajar con ese modulador poco estable, es que la entrada láser es muy susceptible a la polarización de la luz. La fibra a la entrada del modulador es muy sensible al movimiento, posición y a las vueltas que esté enrollada. Este comportamiento muchas veces pasaba desapercibido y fue causante de varios tropiezos, pues llegaban a existir posiciones de la fibra donde la señal se distorsionaba completamente. Lo que se concluyó al final fue que antes de realizar cualquier experimento con el modulador se recomienda encontrar una posición óptima de esta fibra, donde a la salida del modulador se tenga la mayor amplitud posible.

A pesar de todos esos tropiezos, el trabajo con el modulador estaba hecho y se optó por mantenerlo por el resto de los experimentos, pues una vez conociendo su comportamiento errático, fue posible encontrar un punto con condiciones suficientes para realizar los experimentos con el formato polibinario. Al final se llegó a la selección de pulsos de $Amp_{in} = 5[V_{pp}]$ con un *offset* variable. Cualquier variación es dependiente las condiciones del laboratorio y particularmente de las circunstancias del modulador en ese momento.

Capítulo 5

Simulaciones y Comportamiento del Formato Polibinario

Antes de pasar a implementar el sistema de transmisión polibinario completo, es conveniente simular dicho sistema para prever cualquier problema y poder analizar de manera previa el comportamiento del enlace.

En este capítulo se mostrarán los resultados que arroja el programa que simula el comportamiento del enlace polibinario. Se describen los efectos de cada paso del programa que genera la señal polibinaria, así como el proceso de decodificación de la señal recibida. En cuanto a resultados, se muestran una variedad de resultados obtenidos para la configuración *back-to-back* (con el objetivo de demostrar que la decodificación funciona) así como los resultados para cuando se trata de un enlace con fibra óptica. Estas simulaciones se centran en el efecto de la dispersión ocasionada por la fibra óptica, y se dejan de lado sistemas causantes de ruido.

5.1. Funcionamiento del Programa de Simulación

Ya sea para generar una simulación así como para aplicar físicamente una corriente de control al MZM, es necesario un programa que genere una trama polibinaria. El programa que genera dicha señal polibinaria se construyó con base en aquel utilizado en [7]. Dicho algoritmo simplemente tenía la finalidad de crear una señal binaria NRZ que tuviera un forma más real, es decir, crear una serie de bits conformados por n muestras por cada bit, a una cierta frecuencia de muestreo, con una duración específica y que la señal en si tuviera una forma más ‘suave’, o bien, más realista que los inalcanzables pulsos lógicos. El programa arrojaba a la salida la señal resultante y el diagrama de ojo.

El programa principal de este trabajo introduce el algoritmo de precodificación y codificación polibinaria mostrados anteriormente. Se modificó inicialmente para un sistema polibinario de tres niveles, es decir un sistema duobinario. Y posteriormente se extendió para general señales polibinarias de más niveles.

El programa creado para controlar físicamente el MZM es subconjunto del programa utilizado para simular. La señal con la que controlamos el haz láser es la misma que utilizamos para el enlace entero, lo cual hace aun más valioso el programa que desarrollamos para simular en enlace.

Por tanto es útil conocer el funcionamiento del simulador con fin de saber cómo se controla la señal que entra al MZM para modular el haz láser.

5.1.1. Sección de Generación de la Señal Control

La sección inicial del programa de simulación es la sección de parámetros. Aquí se establecen y calculan los parámetros iniciales del programa, de entre quienes destacan la tasa de transmisión, la cantidad de bits a generar y la cantidad de muestras que tendrá cada bit generado.

Posteriormente, se genera una cadena de n bits aleatorios lógicos. En la Figura 5.1 se

aprecia dicha cadena antes de cualquier tratamiento. Esta cadena pasa por el algoritmo para construir el formato polibinario (duobinario u otros) explicado en capítulos anteriores.

Combinando los parámetros establecidos al comienzo junto con la señal lógica se generan las muestras que construyen una señal polibinaria eléctrica, o bien, más realista. Se trabajó exclusivamente con el formato duobinario. Este resultado se aprecia en la Figura 5.2. Se observa en este ejemplo la trama duobinaria tiene una forma más suave, simulando la transición del dominio lógico al eléctrico. También se pueden apreciar claramente los tres niveles de amplitud: 0, 0.5 y 1 unidades (específicamente para duobinario). Estos tres niveles se aprecian aun mejor en la Figura 5.3, el cual es el diagrama de ojo generado de la señal eléctrica duobinaria.

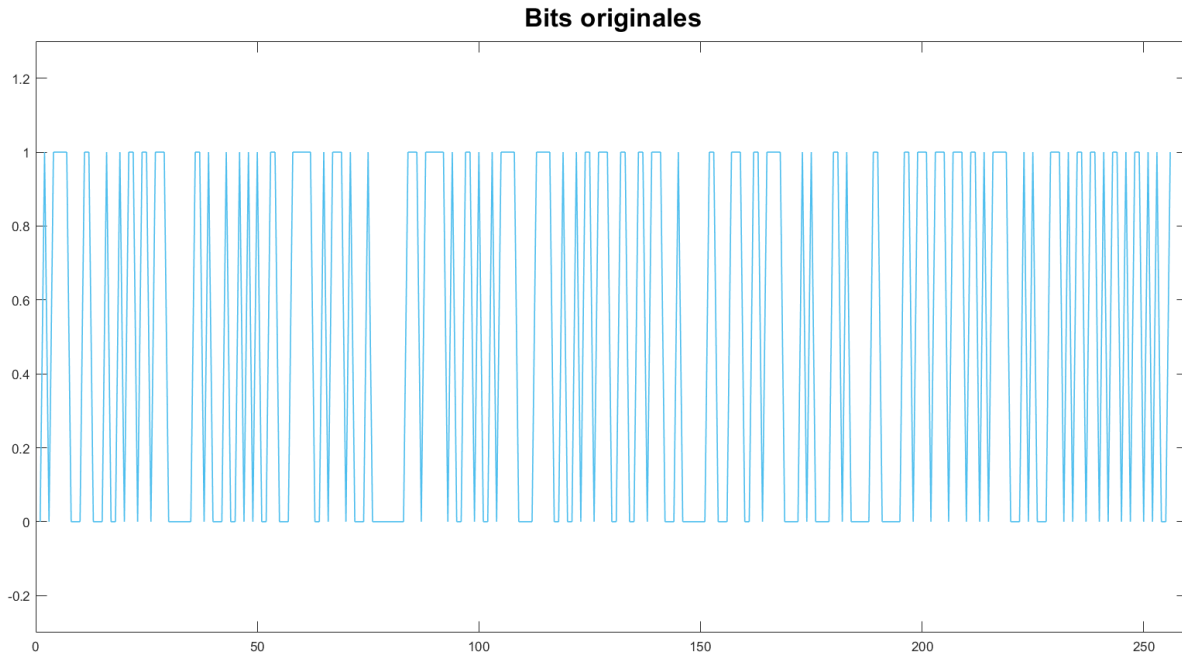


Figura 5.1: Cadena de bits originales. Por simpleza se usa esta cadena aleatoria todas las demostraciones e ilustraciones.

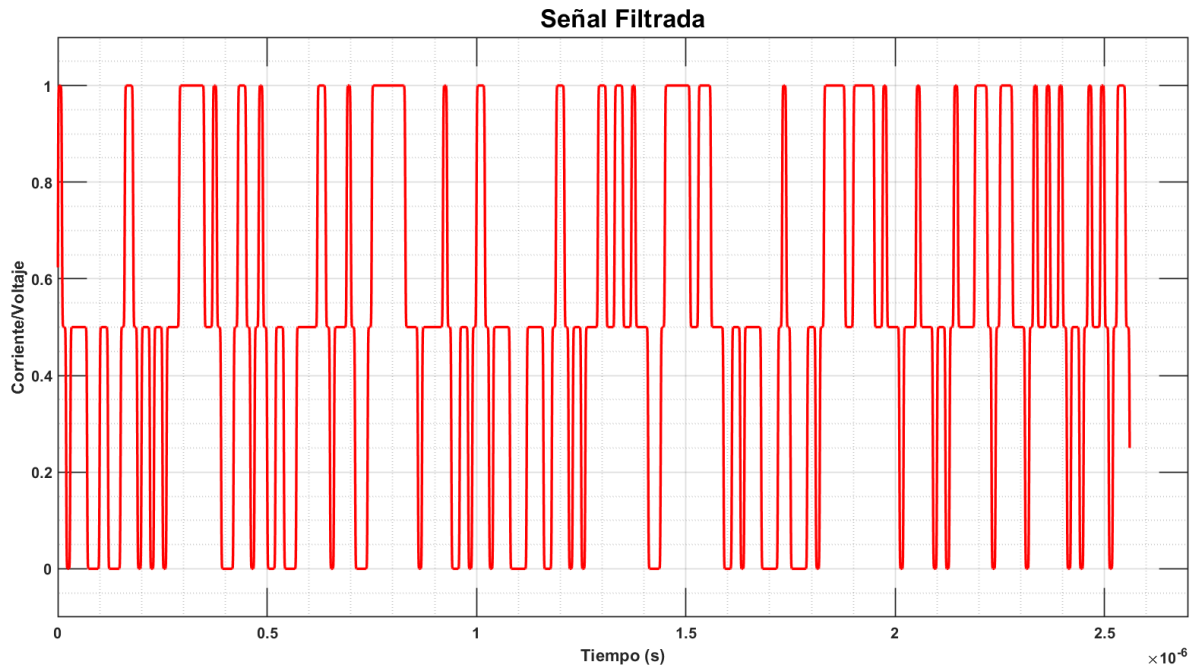


Figura 5.2: Cadena de bits transformados a duobinario y en el dominio eléctrico.

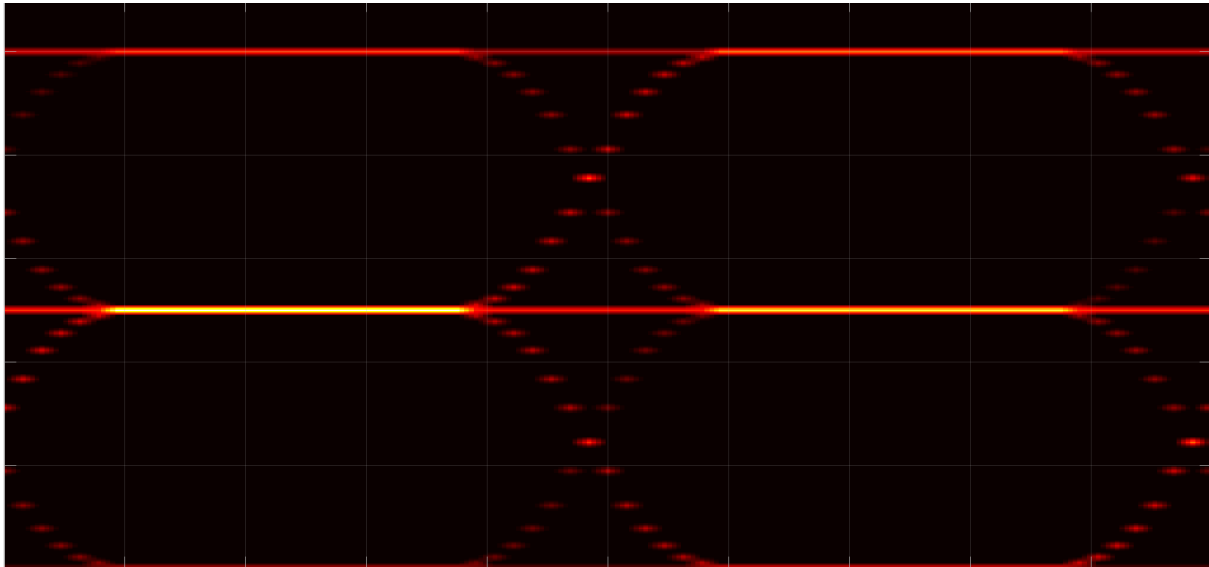


Figura 5.3: Diagrama de ojo generado a partir de la señal duobinaria eléctrica.

Hasta este punto llegan las similitudes entre el programa que controla el modulador físico y el programa de la simulación. En el programa de control la señal pasa por una operación lineal la cual sitúa sus límites entre -1 y 1, y no entre 0 y 1, con el objetivo de entregarla de manera óptima al programa que realiza el puente entre AFG y PC.

5.1.2. Simulación de Dominio Eléctrico y Óptico

Retomando el camino del programa de simulación, el siguiente paso en el programa es hacer pasar la señal de la Figura 5.2 por una sencilla función de tipo lineal que la sitúe entre los límites discutidos en la sección final del capítulo 2. Con la expresión 5.1 podemos hacer que el valor de la señal duobinaria se encuentre entre los límites lineales específicos de la TF ilustrada en la Figura 2.7. De esta forma un pulso de amplitud mínima (primer nivel para cualquier esquema polibinario) alcanza el límite inferior, mientras que pulso de amplitud máxima (tercer nivel para duobinario) alcanza el límite superior, lo que a su vez significa que se transforma en potencia máxima y potencia mínima respectivamente. Esta expresión es modificable de acuerdo la TF del MZI con que se trabaje.

$$f(Cadena_{duobinaria}) = 2.16 \times Cadena_{duobinaria} + 1.18 \quad (5.1)$$

El siguiente paso de la simulación es la transformación del dominio eléctrico al dominio óptico.

Antes de pasar a simular la transformación, primero se construye una señal láser que será modulada por la señal de bits polibinarios. Esta señal láser se simula a través de una función que genera un campo eléctrico que posee cierta potencia óptica. Se construye a través de una potencia de salida deseada, el ancho de línea del láser, el número de muestras totales de la señal que se va a controlar y su frecuencia de muestreo. A la salida se tiene un vector complejo que simula una potencia óptica con un grado de ruido en la fase, nacido de la inherente imperfección del láser, es decir, su ancho de línea.

Es momento de hablar del modulador Mach-Zehnder. Sin bien utilizamos la TF en potencia para definir los límites lineales con los que controla el MZI, es la TF en campo eléctrico la mejor manera de definir lo que le sucede a la señal óptica modulada. Por tanto el siguiente paso es operar nuestra señal duobinaria con la función de transferencia de campo eléctrico, la cual es compleja. Se utiliza la expresión 2.24 con $V_{\pi} = 4.3264[V]$ y $bias = -8.7105[rad]$, los cuáles son los valores que se encontraron en la caracterización de

MZM del capítulo pasado. La parte real y la parte imaginaria de la señal de campo óptico simulada se aprecia en la Figura 5.4.

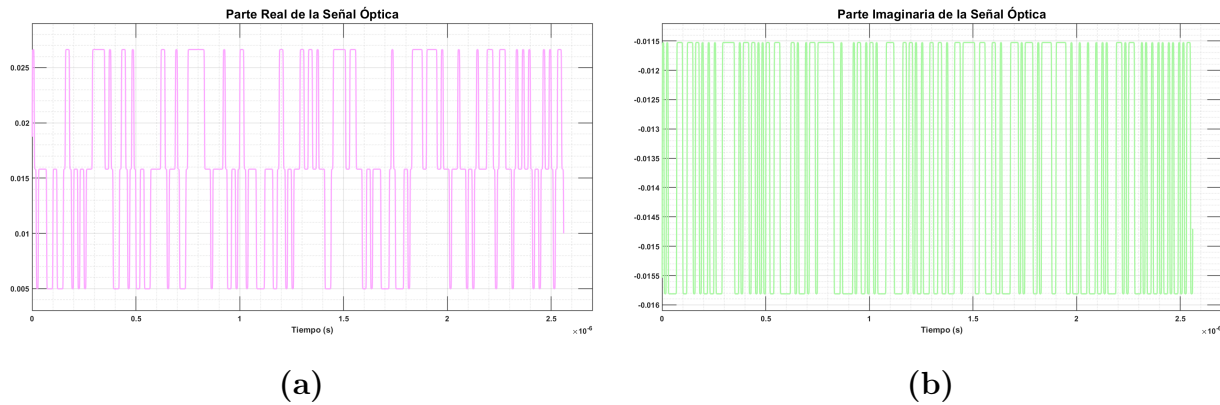


Figura 5.4: Simulación de la señal en el dominio óptico. (a) Parte real de la señal óptica compleja que atraviesa la fibra óptica. (b) Parte imaginaria de la señal óptica compleja que atraviesa la fibra óptica.

Finalmente, modulamos el láser, y esto se simula simplemente multiplicando punto a punto cada muestra que conforma la señal láser con cada muestra que conforma la señal polibinaria compleja, dando como resultado la señal a la salida del MZM.

5.1.3. Recepción y Demodulación

Una vez que se ha transformado la señal duobinaria en su contraparte óptica, el siguiente paso es ‘recibir’ dicha señal óptica. Si se busca simular *back-to-back*, el proceso continúa directamente con la recepción. Si se busca simular con fibra en medio, se introduce una función que simula la fibra dispersiva, de la cual se hablará más adelante.

Para simular la recepción de la señal óptica, lo único que se realiza es que se multiplica la señal por su complejo conjugado y en principio se multiplica por un parámetro de responsividad del receptor. La señal recibida de ejemplo se ilustra en la Figura 5.5.

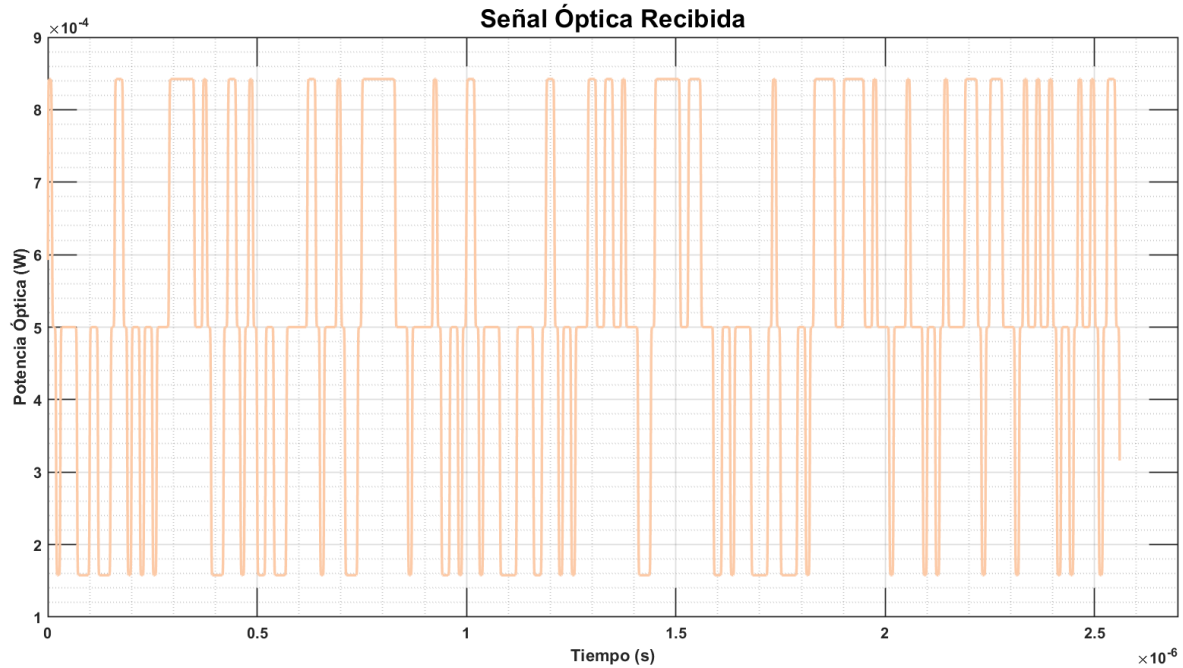


Figura 5.5: Señal óptica recibida. Los detectores de ley cuadrada solo observan potencia, no campo eléctrico. En la simulación la potencia se aprecia gracias al obtener el módulo del campo eléctrico. En la simulación se obviaron los efectos de la atenuación y la dispersión.

Una vez que se ‘recibió’ la señal, el siguiente paso es realizar un muestreo y posteriormente un *slicing* para poder abstraer la señal lógica duobinaria de la señal recibida. El muestreo se realiza con la finalidad de obtener el valor de un solo momento del pulso duobinario. El *slicing* se encarga de acomodar la muestra obtenida en el nivel correspondiente. Esto último se encuentra basado en unos umbrales previamente establecidos. La cantidad de umbrales (y de regiones que estos umbrales delimitan) están dadas por la cantidad de niveles de amplitud de la señal polibinaria. Para este ejemplo, dado que se trabaja con una señal duobinaria, entonces el *slicing* se realiza con dos umbrales y tres regiones. Dependiendo de en donde se halle la toma de datos que el muestreo arroje, el *slicing* acomodará la muestra en un umbral. De esta forma obtenemos una señal duobinaria lógica una vez más, la cual es la señal que se mostró anteriormente en la Figura 5.2.

El siguiente paso es regresar la señal duobinaria a la señal binaria original. Para ello se realiza la operación módulo 2 que se explicó anteriormente. Finalmente, podemos hacer una comparación entre la cadena de bits decodificada y la cadena de bits original para

observar si son la misma. La comparación se muestra en la Figura 5.6.

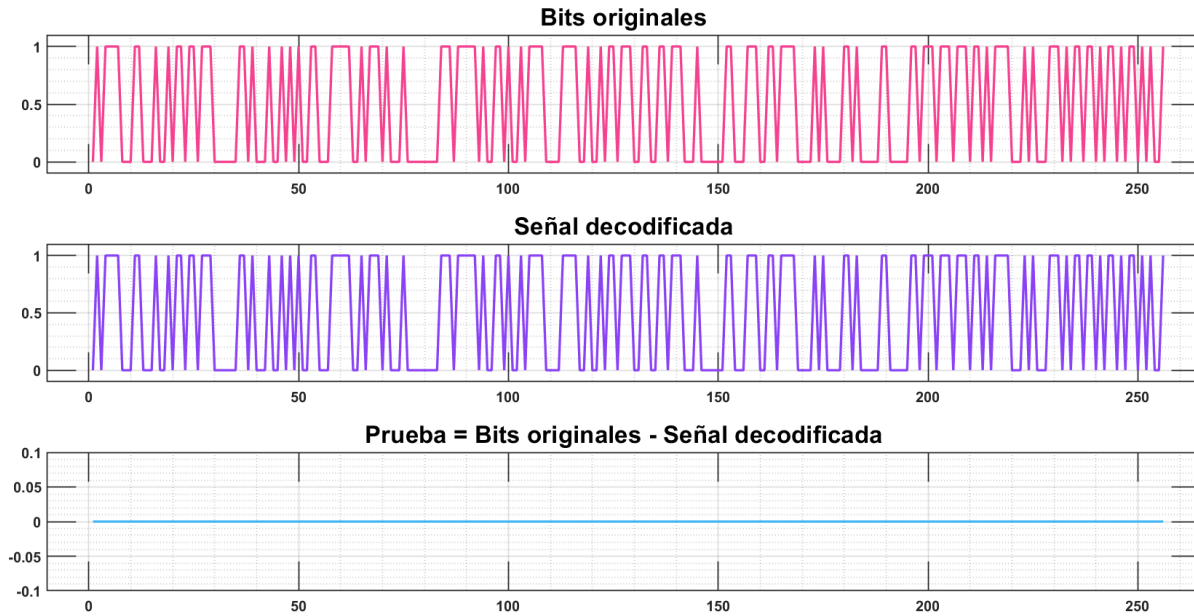


Figura 5.6: Comparación entre la cadena de bits originales y la cadena de bits decodificados.

La comparación de la Figura 5.6 es bastante simple. Si la cadena original es igual a la cadena que se decodificó, entonces si se resta una a la otra, el resultado debe ser una trama constituida solamente de ceros. Este es el caso y es lo que se observa en la figura.

En las siguientes secciones se describen los resultados obtenidos en la simulación para cuando se simula la transmisión en *back-to-back* o bien cuando hay una longitud de fibra en medio para diversas tasas de transmisión.

5.2. Simulación *Back-to-Back*

Cuando se trabaja con la simulación en la forma *back-to-back* se ignoraron los efectos de la dispersión o la atenuación que se observarían cuando la verdadera señal óptica viaje a través de cierta longitud de fibra óptica.

Lo que busca simular es el comportamiento de la transformación de señal eléctrica a óptica por medio de la TF del modulador. A partir de este momento se concretaron los

niveles del formato polibinario con los que de ahora en adelante se trabajaría. Estos son: **3, 4, 5, 7 y 9**.

Se obtuvieron múltiples resultados para cadenas de 4096 bits. Se probó con distintas tasas de transmisión sujetas a una cantidad de muestras por bit:

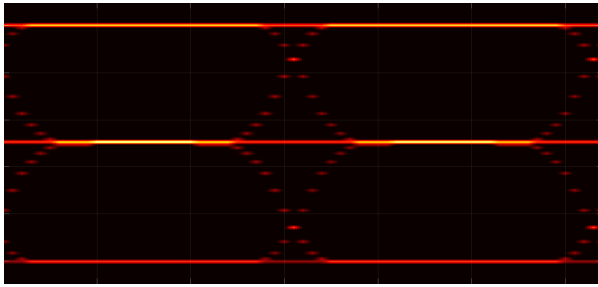
- 31.25 [Mbps] (32 muestras por bit).
- 125 [Mbps] (8 muestras por bit).
- 250 [Mbps] (4 muestras por bit).

La razón por la cual la muestras disminuyen conforme aumenta la tasa se debe al funcionamiento intrínseco del generador de funciones arbitrarias (AFG). Esto se explicará con más detalle en el capítulo donde se hable de sistema físico utilizado en los experimentos.

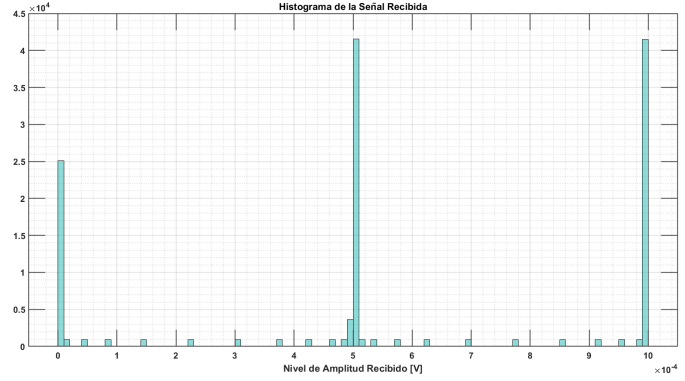
Los resultados finales de los cinco niveles del polibinario para las tres tasas de transmisión trabajadas se pueden resumir fácilmente: $BER = 0$. Esto significa que sin importar el ancho de bit que se mande, la simulación indica que es posible demodular la señal recibida sin ningún error.

A continuación se muestran, en las Figuras 5.7 y 5.8, los diagramas de ojo de la señal polibinaria así como los histogramas de las muestras que conforman dichos ojos para los cinco niveles de la modulación que se vienen manejando. Lo anterior a una tasa de 31.25[Mbps]. En el diagrama de ojo se aprecian los niveles o escalones de la señal polibinaria, y esos mismos niveles se aprecian como las barras principales de los histogramas. Estos histogramas se construyen utilizando el vector que conforma la señal completo sin haberlo muestreado.

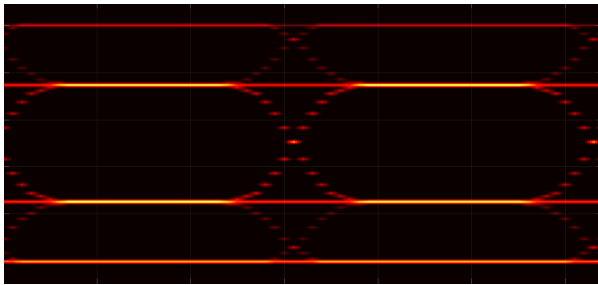
En los diagramas de ojo se recolectan muestras suficientes para conformar dos ventanas o aberturas. Lo interesante es observar que al no tratarse de un esquema NRZ, se observan múltiples ojos nacidos de los niveles del formato polibinario.



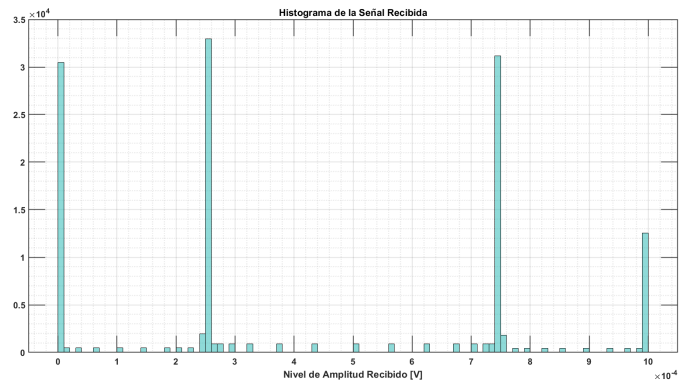
(a)



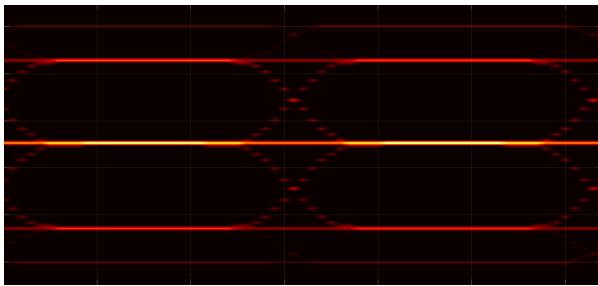
(b)



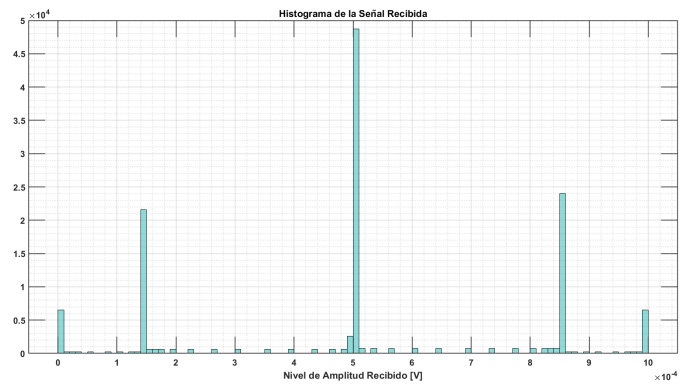
(c)



(d)

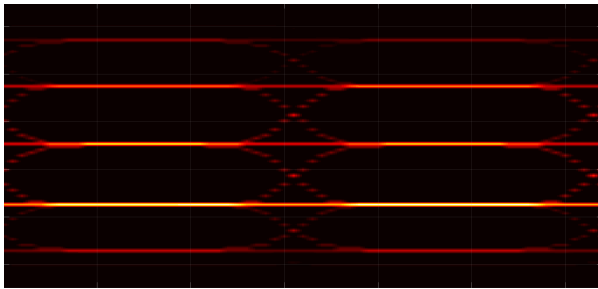


(e)

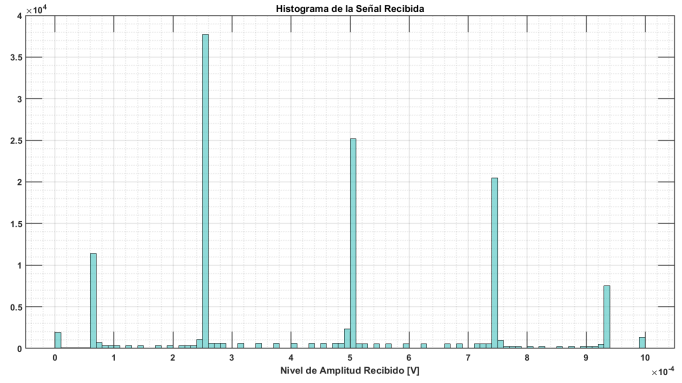


(f)

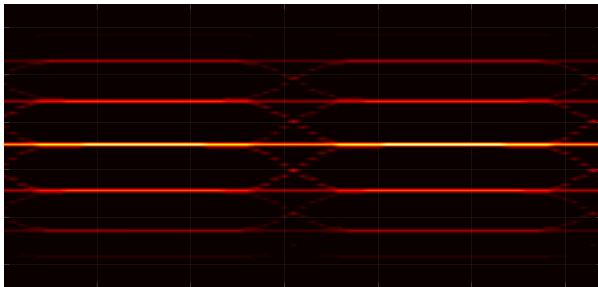
Figura 5.7: Diagramas de ojo e histogramas del formato polibinario generados a partir de la simulación *back-to-back* a 31.25[Mbps]. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 64 muestras. (a) Duobinario, (b) histograma del duobinario, (c) polibinario de 4 niveles, (d) histograma de 4 niveles, (e) Polibinario de 5 niveles, (f) histograma del polibinario de 5 niveles.



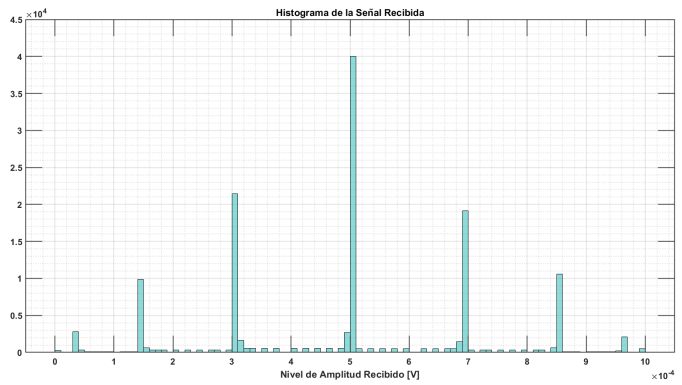
(g)



(h)

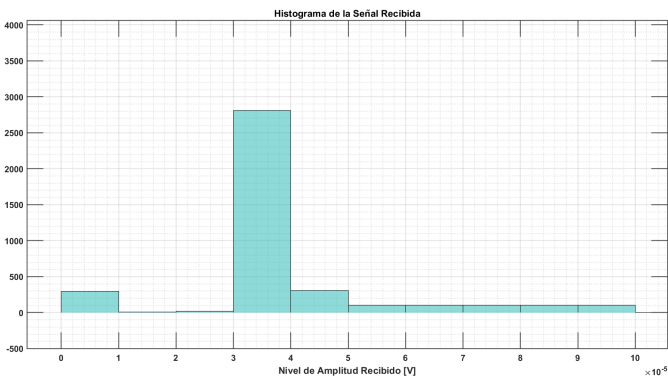


(i)

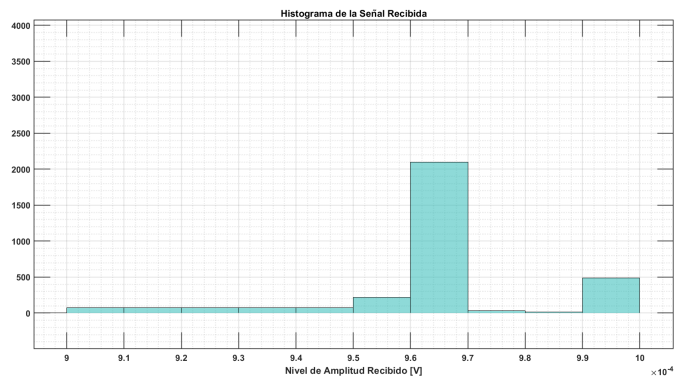


(j)

Figura 5.8: Diagramas de ojo e histogramas del formato polibinario generados a partir de la simulación *back-to-back* a 31.25[Mbps]. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben 64 muestras. (g) Polibinario de 7 niveles, (h) histograma del polibinario de 7 niveles, (i) polibinario de 9 niveles, e (j) histograma del polibinario de 9 niveles.



(a)



(b)

Figura 5.9: Zoom de los primeros y últimos niveles del histograma de polibinario-9 *back-to-back* a 31.25[Mbps]. (a) Nivel 1 y 2, y (b) nivel 7 y 9.

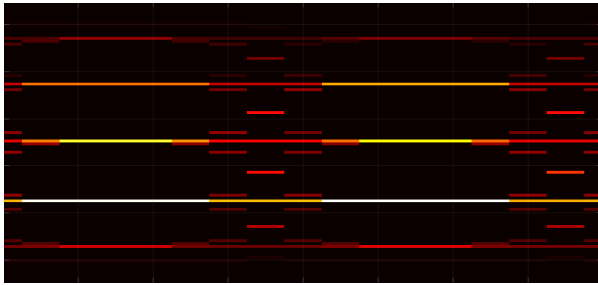
Se pueden realizar una serie de observaciones de las figuras anteriores. Se observa la forma bien definida del diagrama de ojo y se hace evidente a que nos referimos cuando se habla de los umbrales y regiones del polibinario. Las regiones y umbrales que dan forma al polibinario se ven perfectamente definidas para los formatos más pequeños (3 y 4), sin embargo observamos como para los niveles más altos, se pierde la definición de las regiones más alejadas, especialmente los primeros y últimos. Esto sucede por que para alcanzar un ‘bit’ polibinario de un nivel superior es necesario tener una sucesión más larga de bits iguales consecutivos, lo cual es menos probable que suceda. Por ejemplo, para alcanzar un símbolo en el noveno nivel, es necesario que en la ventana de suma se encuentren nueve unos seguidos. La probabilidad de que eventos como esos sucedan naturalmente en una cadena de bits es muy baja, y encima de eso, esta probabilidad disminuye entre más elementos se requieran para ser sumados (polibinario de 10+).

De hecho, el primer y último nivel del ojo de polibinario-9 se difuminan tanto que parecen inexistentes, como si de polibinario-7 se tratara. Por tanto, ahora es momento de observar los histogramas, donde podemos observar los niveles por cantidad de muestras. Se observan para los formatos de bajo nivel barras bien definidas, las cuales pueden compaginarse bien con los ojos. Para formatos más altos los niveles de los extremos disminuyen su nivel. Aunque casi inexistentes, los primeros y últimos niveles de los formatos más altos se observan como las columnas iniciales y finales, y, como se dijo, esto es por que muy pocos símbolos polibinarios alcanzan a formarse ahí, debido a la baja probabilidad de bits consecutivos del mismo valor lógico. Específicamente para polibinario-9 se optó por realizar un par de acercamientos a los extremos del histograma, ilustrados en la Figura 5.9. Si se comparan estos acercamientos con el histograma completo, se entiende que, aunque muy poco probable, si existieron secuencias seguidas de bits iguales que generaron símbolos polibinarios de tan bajos/altos niveles.

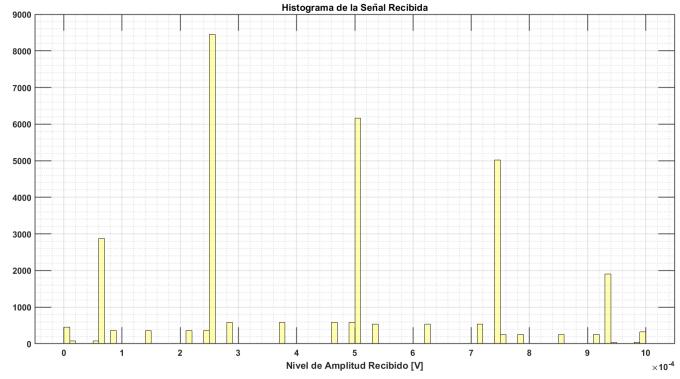
Finalmente observamos que la diferencia en amplitud de voltaje entre un nivel y otro varía. Los niveles no están uniformemente distribuidos. Esto se debe a que la forma de la función de transferencia del modulador Mach-Zehnder de potencia sobre la que se realiza el *swing* de amplitud no es del todo lineal. Uno adapta los rangos más lineales para trabajar,

pero no lo son, lo que genera que entre más en los extremos de la TF se trabaje, mayor será la no-linealidad, lo que genera que, en el diagrama de ojo las amplitudes de los ojos para niveles más lejanos sea más pequeña, y en el histograma, genera que las barras estén separadas por intervalos no regulares.

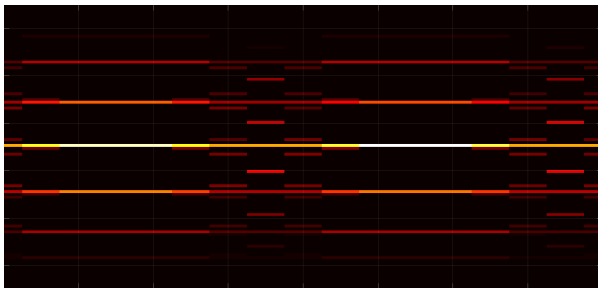
Observemos ahora los ojos e histogramas para cuando se simuló una tasa cuatro veces más rápida. A 125[*Mbps*] se disminuyó la cantidad de muestras por bit, de 32 a 8 muestras por bit. Esta disminución de muestras es debido a limitaciones del equipo electrónico. De estos límites se hablará más adelante cuando se entre en detalle del arreglo experimental. Esta disminución de muestras se vuelve muy evidente en el diagrama de ojo, pues estos pierden suavidad. Es de particular interés el comportamiento de los niveles superiores (7 y 9), por tanto solo estos se ilustran en la Figura 5.10.



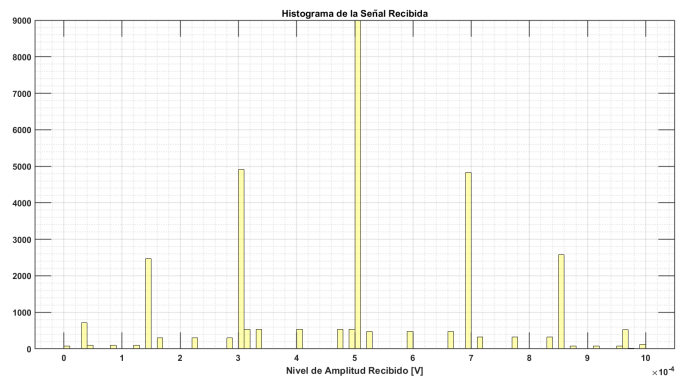
(a)



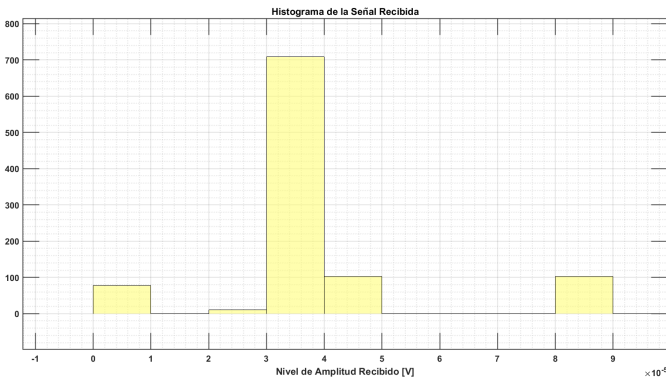
(b)



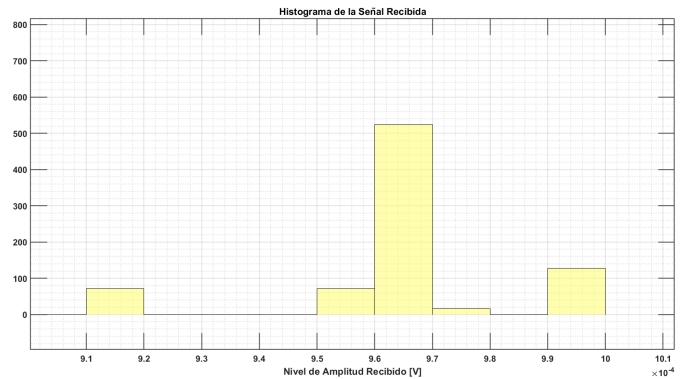
(c)



(d)



(e)



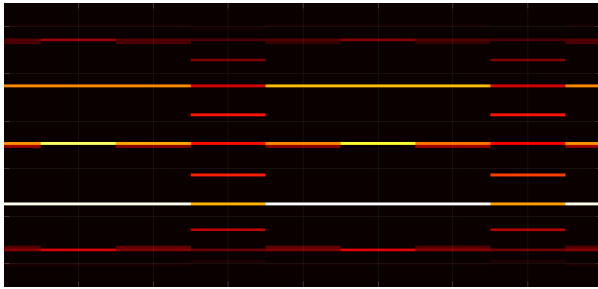
(f)

Figura 5.10: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación *back-to-back* a 125[MBps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma de polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+1.6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 16 muestras. (a) Polibinario-7, (b) histograma del polibinario-7, (c) polibinario-9, (d) histograma del polibinario-9, (e) nivel 1 y 2, y (f) nivel 7 y 9.

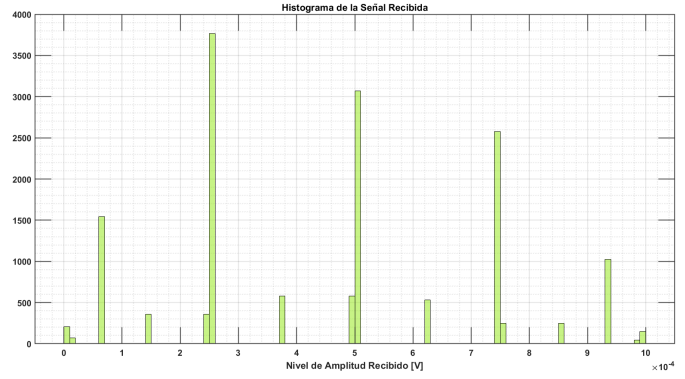
Se aprecia la pérdida de suavidad pero no se pierde la forma de ni un solo nivel del

formato, por tanto se entiende que se pueda demodular sin error alguno. Los histogramas complementan lo que sabemos. Existen suficientes muestras en los diversos rangos, lo que permite que se puedan clasificar correctamente en los niveles de polibinario, (*'slicing'*).

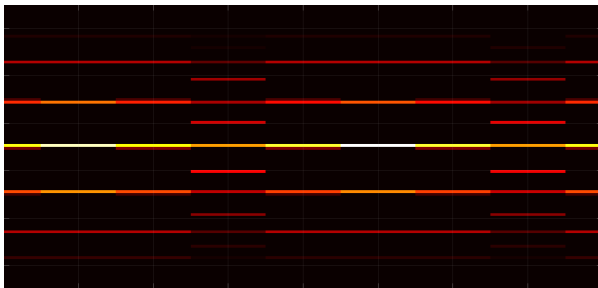
Aumentando una vez más, está vez al doble, llegamos a los diagramas de ojo e histogramas a continuación mostrados. Con una tasa de a 250[Mbps] sin fibra llegamos al límite físico al que nos somete el equipo disponible para las pruebas reales. Sin embargo, el BER se mantuvo en 0.



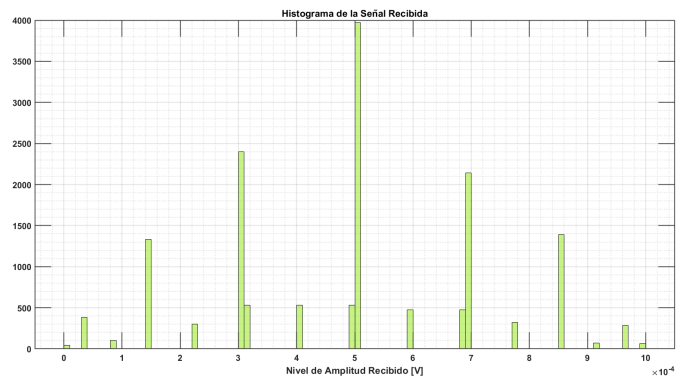
(a)



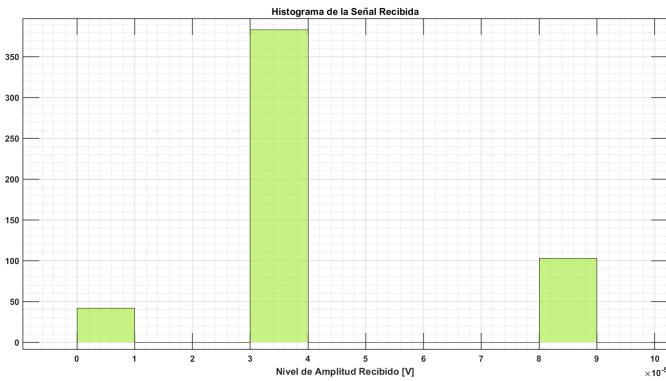
(b)



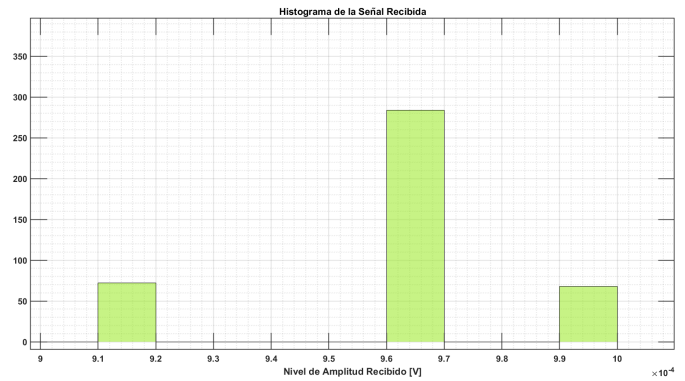
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.11: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación *back-to-back* a 250[Mbps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma del polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+8 \times 10^{-9}$ [s], donde caben ventanas de 4 muestras. (a) Polibinario-7, (b) histograma del polibinario-7, (c) polibinario-9, (d) histograma del polibinario-9, (e) nivel 1 y 2, y (f) nivel 7 y 9.

5.3. Simulación con Fibra

En esta sección se describen los resultados obtenidos en la simulación cuando se introduce fibra óptica. Al sistema de simulación se le introduce una función desarrollada basada en el libro de no linealidades de Agrawal [2], el cual es un programa que simula el comportamiento de la fibra dispersiva y atenuante. Al introducir esta función podemos pasar de simular un enlace *back-to-back* a simular un enlace con un tramo de fibra óptica en medio.

Esta función toma como entrada un vector de campo eléctrico óptico y otorga a la salida un vector de campo eléctrico óptico modificado de acuerdo a los valores de dispersión y atenuación que se le configuren. Este tratamiento se realiza a través de un filtrado en frecuencia. Esta función sigue un enfoque escalar, es decir, no toma en cuenta la polarización de la luz.

Utilizando esta función que simula el comportamiento de la fibra se puede apreciar un fenómeno que se preveía; esto es que la fibra dispersiva y atenuante comenzará a afectar el desempeño del enlace, especialmente en niveles superiores del formato polibinario.

El funcionamiento del programa es exactamente el mismo que se describe en la sección salvo la diferencia de la introducción de una línea de código donde se manda a llamar la función que simula la fibra. En esta función, se configuran los parámetros que describen la fibra (longitud variable de acuerdo a cada caso, coeficiente de atenuación, dispersión, etc) y con eso estamos simulando un enlace con fibra óptica. Para todas las simulaciones se trabajó con lo siguientes parámetros:

- Longitud de onda: $\lambda = 1550.85[nm]$,
- dispersión de la fibra óptica: $D = 17[ps/nm * km]$,
- dispersión de segundo orden : $slope = 0.092[ps/km * nm^2]$ y
- coeficiente de atenuación de la fibra: $a = 0.2[dB/km]$.

Estas simulaciones se realizaron para los 5 niveles de polibinario, para las tres tasas de transmisión antes trabajadas y se realizó para dos longitudes de fibra: 5[km] y 21[km].

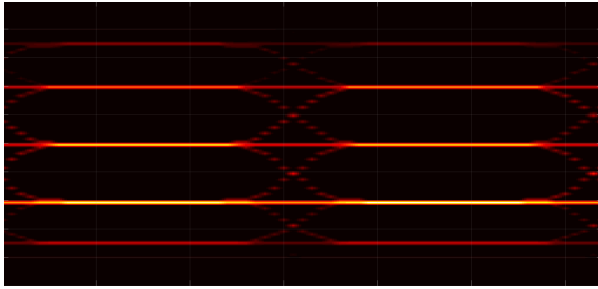
El resultado general de todas las posibles combinaciones entre todos los niveles que se trabajan (3, 4, 5, 7 y 9), las tres tasas y las dos longitudes de fibra óptica es bastante prometedor: cero errores. Una vez más el resultado contundente es que el valor de BER sigue siendo igual a cero, lo que significa que es posible decodificar sin error, a pesar de que la señal se haya visto atenuada. Sin importar con que combinación de parámetros se haya trabajado (tasa, longitud de la fibra o nivel del polibinario) la señal polibinaria no se ve distorsionada como para que exista error al decodificar la información. Lo que es necesario decir, es que la atenuación de la señal se hizo presente. Es decir, en tanto el receptor óptico sea capaz de detectar la señal, la simulación indica que es posible recuperarla.

La simulación indica que la dispersión de la fibra no afecta el formato polibinario a tasas tan bajas a pesar de la distancia del enlace. La máxima tasa apenas alcanza un cuarto de Gbps, lo cual aun es muy bajo en enlaces de fibra óptica. Sin embargo estos resultados son prometedores para pasar a la parte física. Este comportamiento es esperado y probablemente se presenten errores en las pruebas físicas, considerando el ruido de los sistema electrónicos así como las pérdidas de los enlaces de fibra a utilizar.

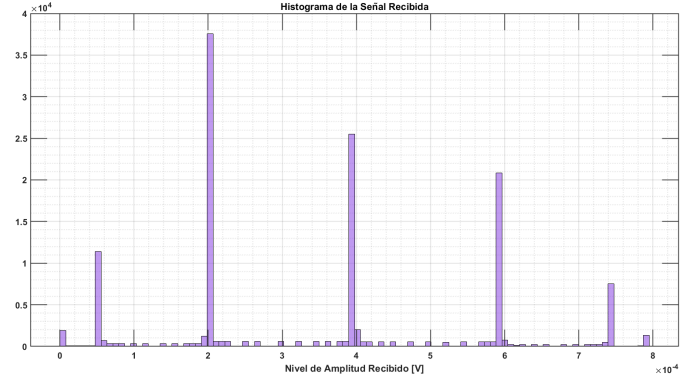
Algunos resultados, en forma de diagramas de ojos y los histogramas de las muestras que generan dichos diagramas se muestran a continuación.

5.3.1. 5 Kilómetros

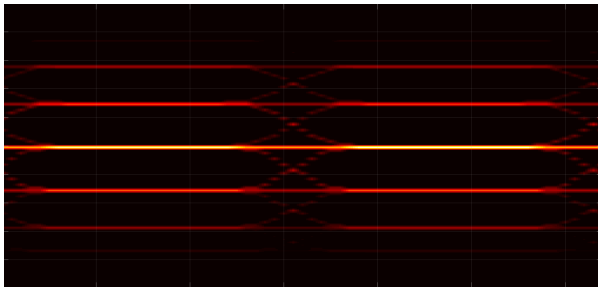
La simulación de la transmisión a través de 5[km] de fibra óptica indica que la dispersión no afecta el enlace. Lo único presente es la atenuación. En las Figuras 5.12, 5.13 y 5.14 se muestran ojos e histogramas de los niveles 7 y 9 del polibinario, y se observa principalmente que no existe mucho cambio entre estos esquemas y los de la sección anterior, salvo en la amplitud.



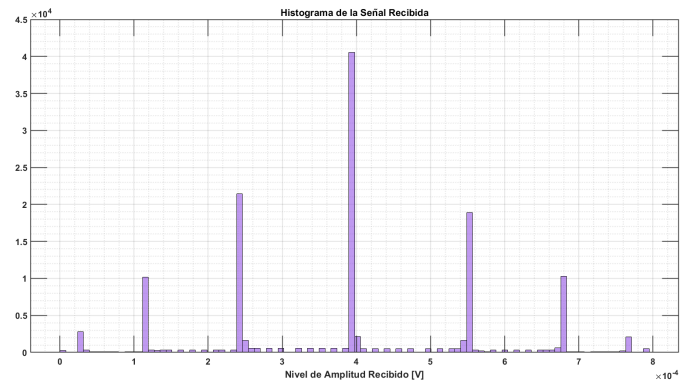
(a)



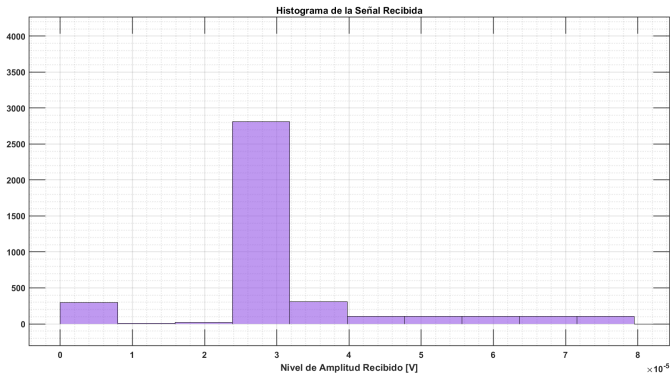
(b)



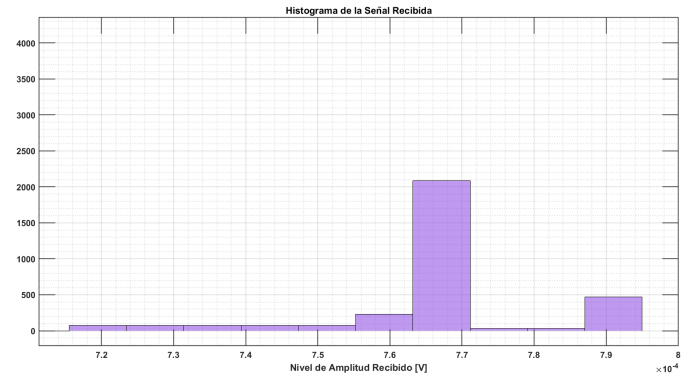
(c)



(d)

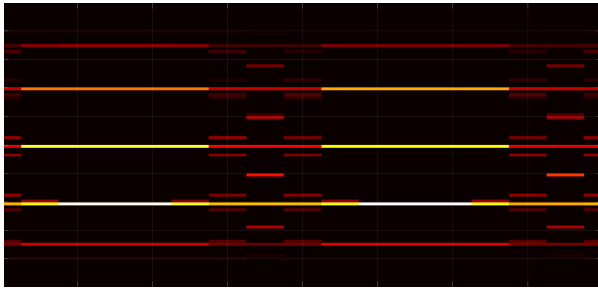


(e)

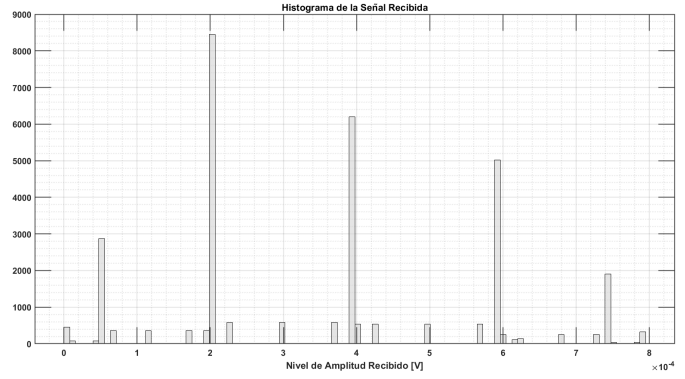


(f)

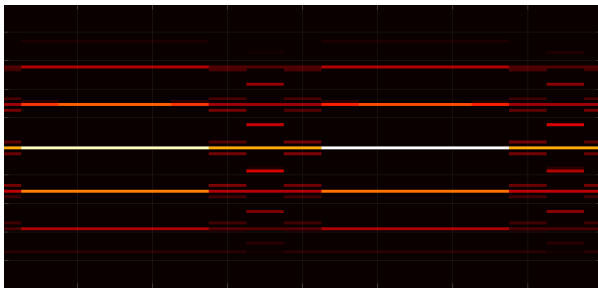
Figura 5.12: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación con 5[km] de fibra óptica a 31.25[Mbps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma del polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 32 muestras. (a) Polibinario-7, (b) histograma del polibinario-7, (c) polibinario-9, (d) histograma del polibinario-9, (e) nivel 1 y 2, y (f) nivel 7 y 9.



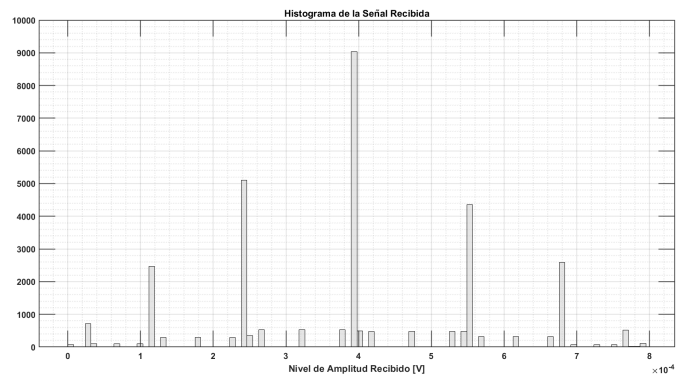
(a)



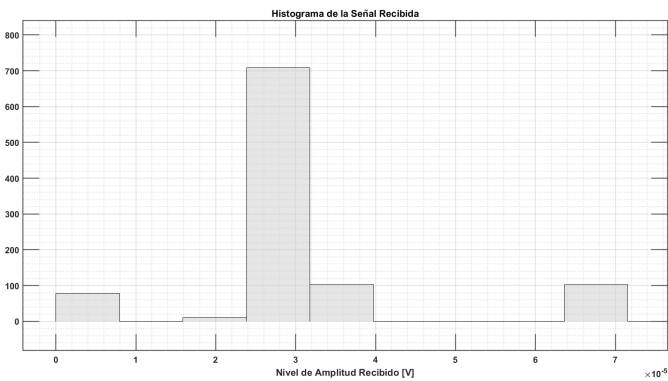
(b)



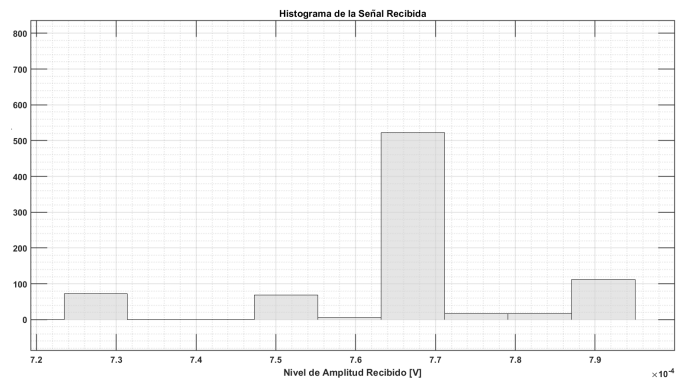
(c)



(d)

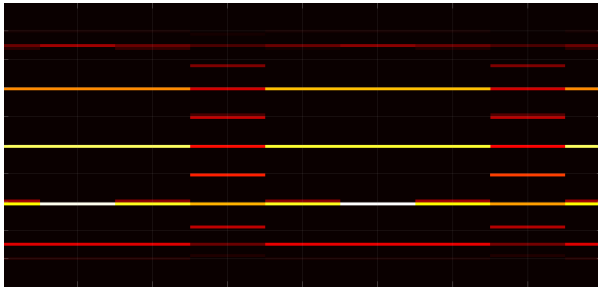


(e)

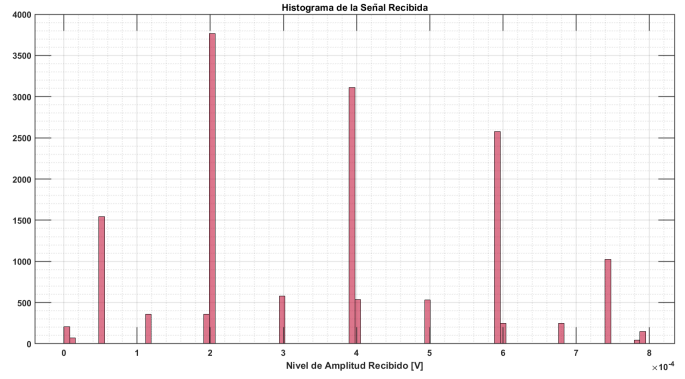


(f)

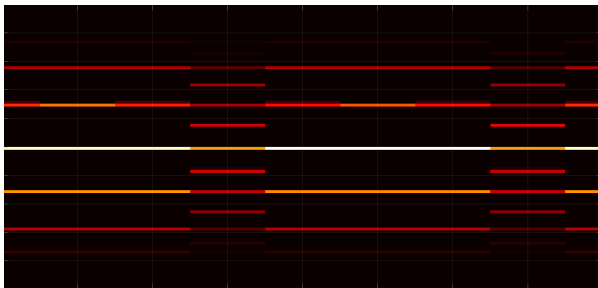
Figura 5.13: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación con 5[km] de fibra óptica a 125[Mbps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma del polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+1.6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 8 muestras. (a) Polibinario-7, (b) histograma del polibinario-7, (c) polibinario-9, (d) histograma del polibinario-9, (e) nivel 1 y 2, y (f) nivel 7 y 9.



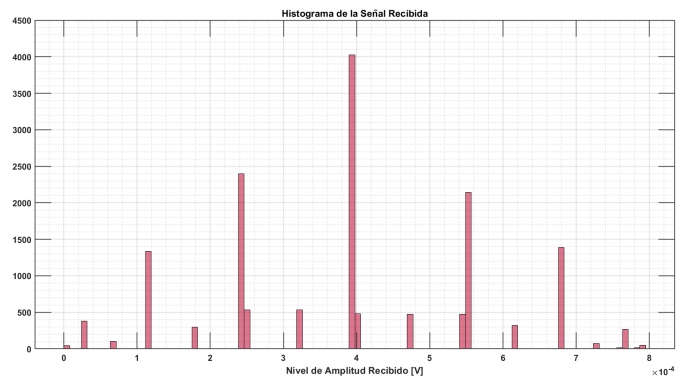
(a)



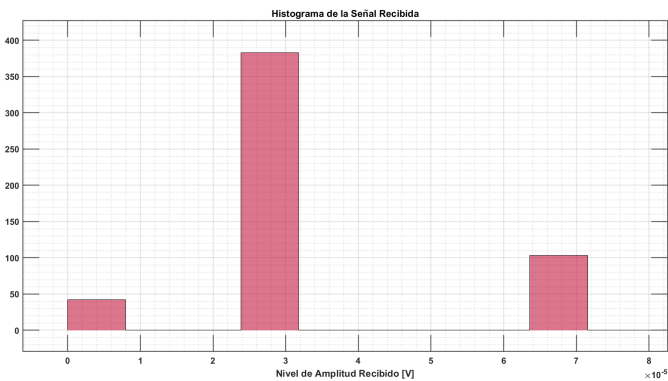
(b)



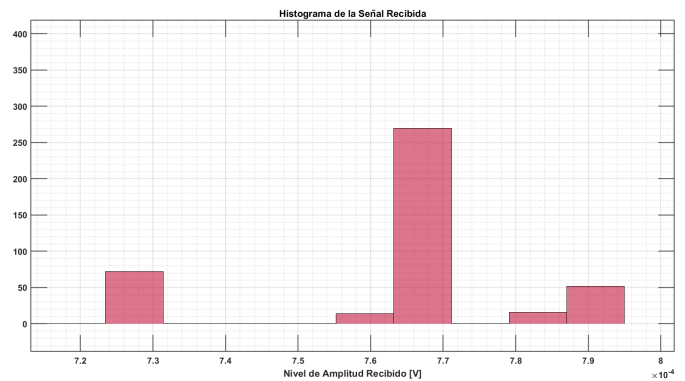
(c)



(d)



(e)



(f)

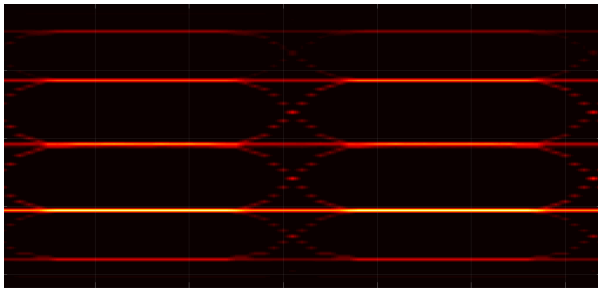
Figura 5.14: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación con 5[km] de fibra óptica a 250[Mbps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma del polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+8 \times 10^{-9}$ [s], donde caben ventanas de 4 muestras. (a) Polibinario-7, (b) histograma del polibinario-7, (c) polibinario-9, (d) histograma del polibinario-9, (e) nivel 1 y 2, y (f) nivel 7 y 9.

5.3.2. 21 Kilómetros

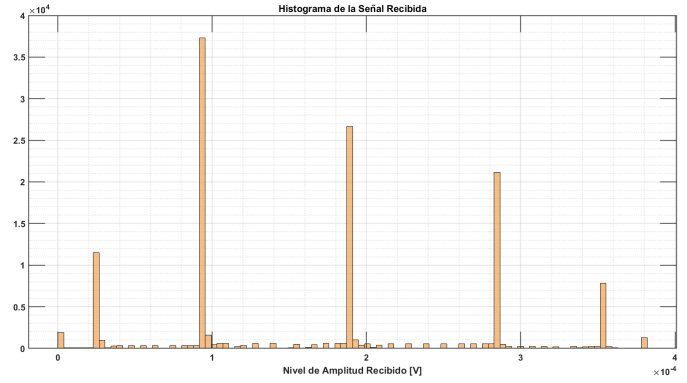
Finalmente, se aumentó la longitud del enlace simulado, de 5[km] a 21[km], pues es la longitud de la fibra instalada más larga con la que se puede trabajar en el Instituto de Ingeniería.

Con 21[km] de fibra óptica en la simulación, se tiene una pérdida total por la fibra de 4.2[dB], la cual contrasta con la pérdida de 1[dB] para los 5[km] de fibra. En cuanto a la dispersión acumulada, se tiene que para los 21[km] existe una acumulación de 357[ps/nm] y para 5[km] solamente de 85[ps/nm].

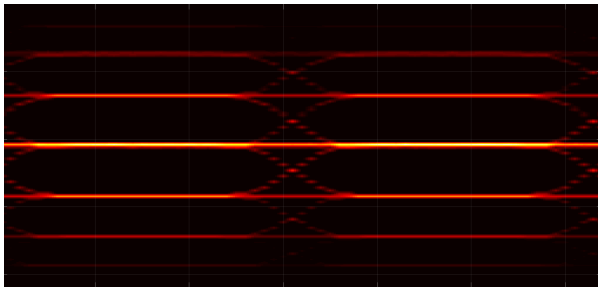
Como se mencionó al principio, se continuó manejando un error nulo en la decodificación.



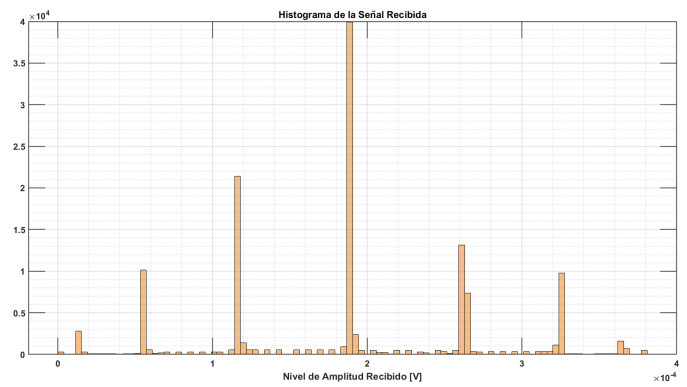
(a)



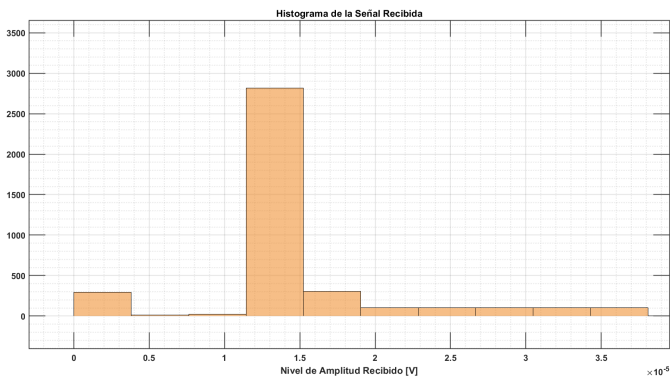
(b)



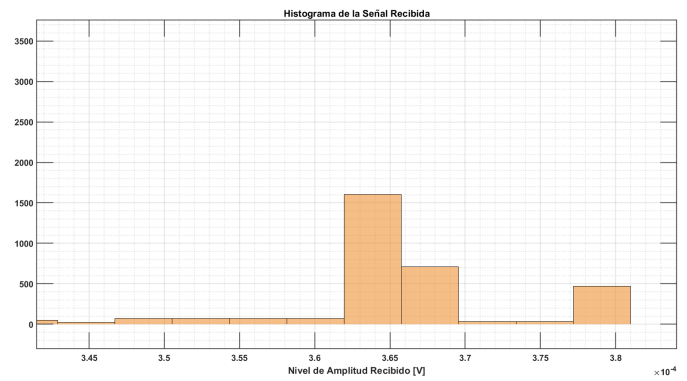
(c)



(d)

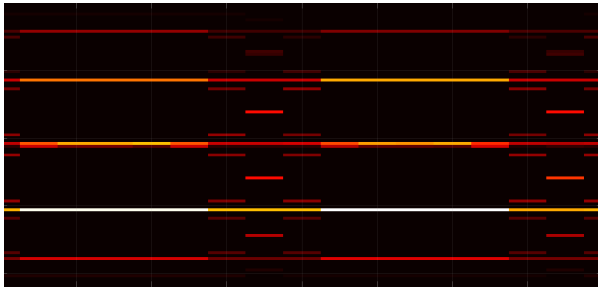


(e)

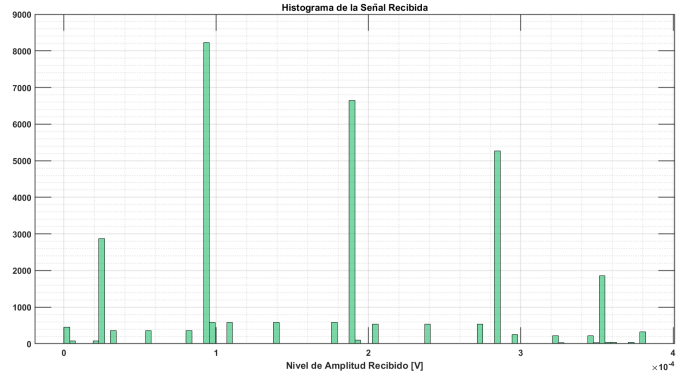


(f)

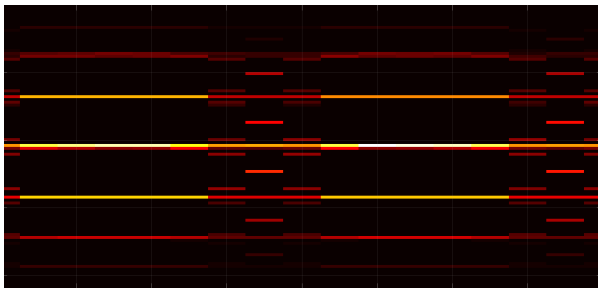
Figura 5.15: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación con 21[km] de fibra óptica a 31.25[Mbps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma del polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 32 muestras. (a) Polibinario-7, (b) histograma del polibinario-7, (c) polibinario-9, (d) histograma del polibinario-9, (e) nivel 1 y 2, y (f) nivel 7 y 9.



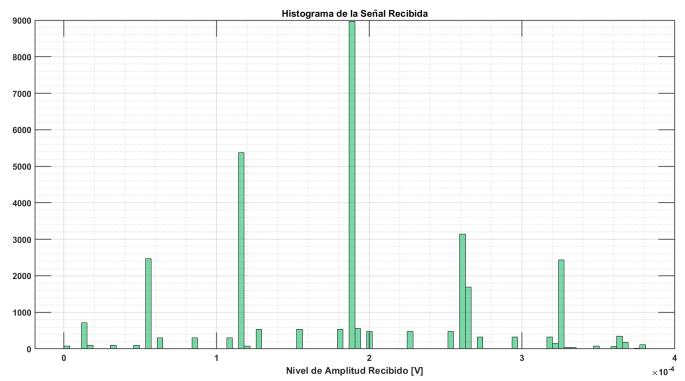
(a)



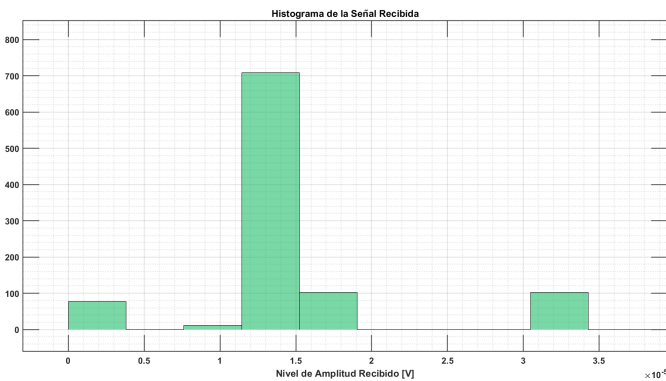
(b)



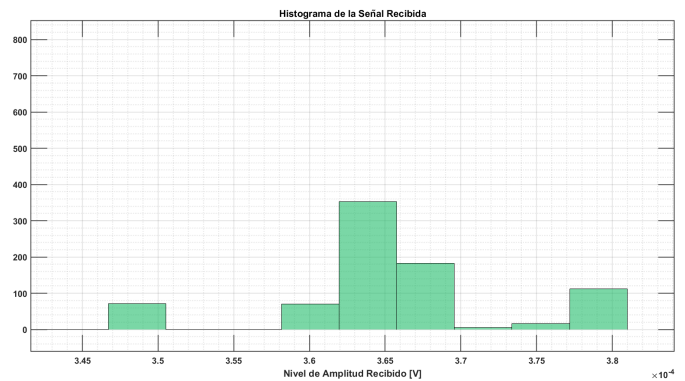
(c)



(d)

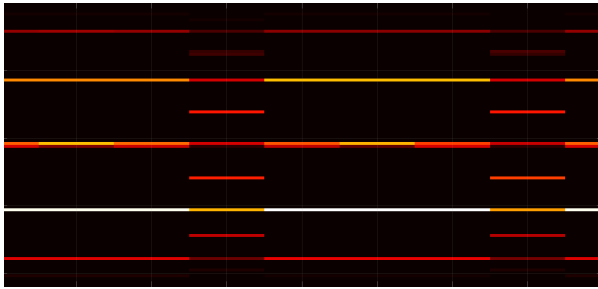


(e)

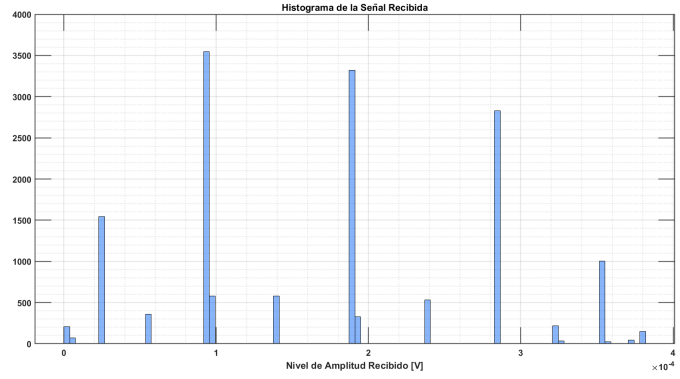


(f)

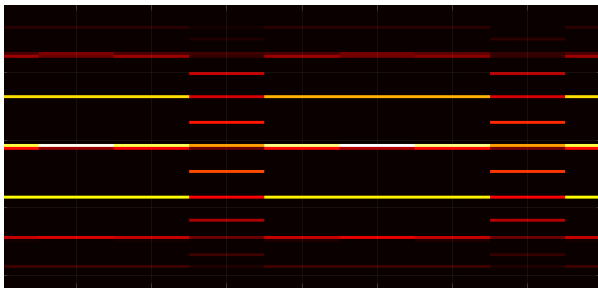
Figura 5.16: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación con 21[km] de fibra óptica a 125[Mbps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma del polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+1.6 \times 10^{-9}$ [s], donde caben ventanas de 8 muestras. (a) Polibinario-7, (b) histograma del polibinario-7, (c) polibinario-9, (d) histograma del polibinario-9, (e) nivel 1 y 2, y (f) nivel 7 y 9.



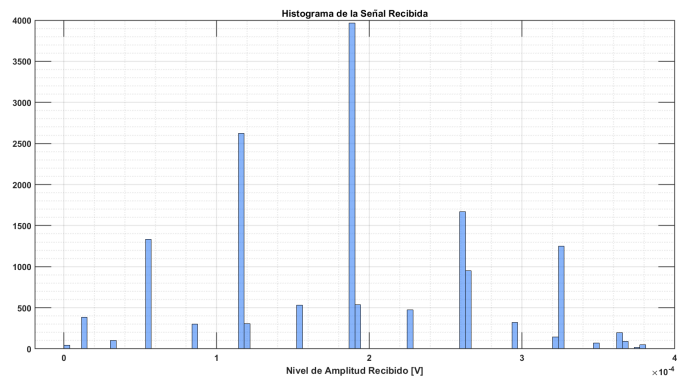
(a)



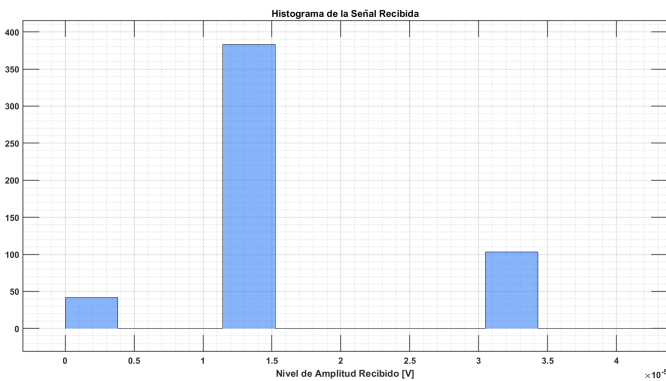
(b)



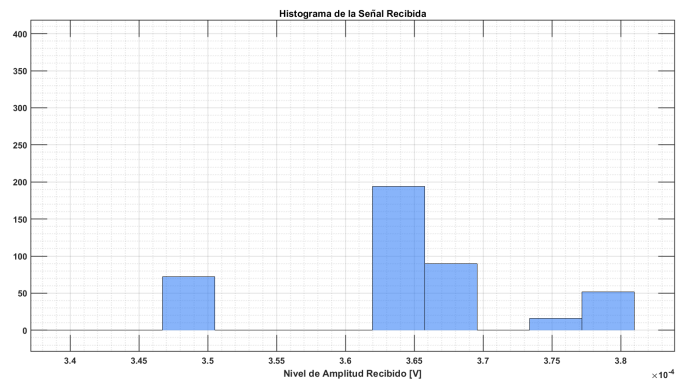
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.17: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 7 y 9 del formato polibinario generados a partir de la simulación con 21[km] de fibra óptica a 250[Mbps] y acercamiento de los primeros y últimos niveles del histograma del polibinario-9. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+8 \times 10^{-9}$ [s], donde caben ventanas de 4 muestras. (a) Polibinario-7, (b) histograma del polibinario-7, (c) polibinario-9, (d) histograma del polibinario-9, (e) nivel 1 y 2, y (f) nivel 7 y 9.

Una vez que hemos demostrado, a través de las simulaciones anteriores, que el programa

que genera la señal polibinaria, así como el programa que decodifica la señal recibida, funcionan de manera correcta, es momento de especificar como es el arreglo experimental que se va a necesitar para poner a prueba la señal polibinaria.

Capítulo 6

Resultados

Habiendo entendido el algoritmo teórico para generar el formato polibinario a partir de una cadena de bits, es necesario afrontar el problema de llevar este formato al dominio óptico aprovechando lo observado al trabajar con el modulador Mach-Zehnder.

En el capítulo 2 se desglosó la función de transferencia que rige el funcionamiento del MZM, el cual es el tipo de modulador que se utilizará para las pruebas de rendimiento. Complementando lo anterior, en el capítulo 4 se reportó el funcionamiento de un MZM físico. En el capítulo 3 se explicaron los algoritmos necesarios para generar y decodificar el formato polibinario mientras que en el capítulo 5 se mostró el funcionamiento del programa de Matlab que lleva el formato polibinario al dominio óptico a través de los algoritmos vistos previamente para así generar la señal polibinaria que ha de controlar al AFG, quien a su vez, crea la señal de control que rija la modulación en el MZM.

6.1. Detalles Experimentales

Todo lo anterior nos lleva al punto cúlpe de esta investigación, donde se conecta todo lo investigado en la implementación del sistema de pruebas. Este sistema se entiende mejor si se observa el diagrama de la Figura 6.1 y el arreglo experimental en la Figura 6.2.

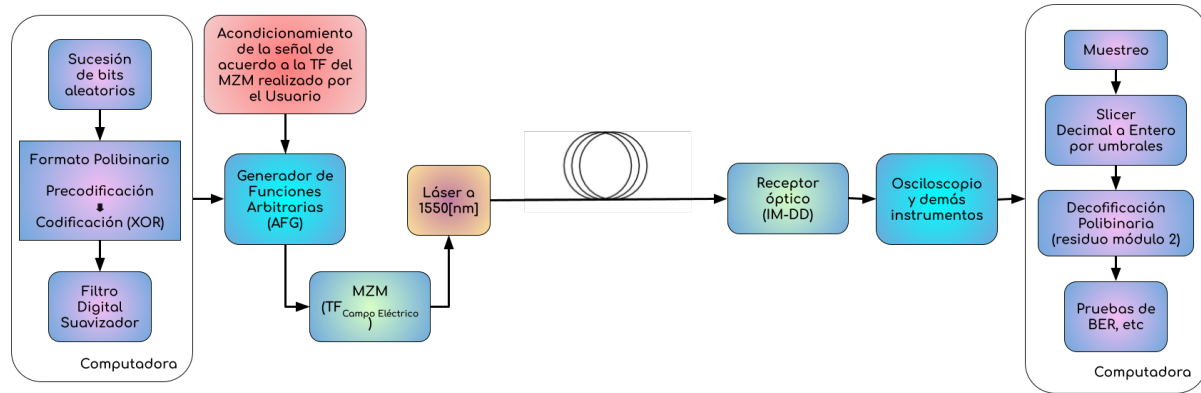


Figura 6.1: Diagrama de bloques del proceso para transformar la señal de información del régimen lógico al dominio óptico.

El sistema básicamente opera de la siguiente manera.

Primero, se ejecuta el programa que crea la cadena duobinaria. Este programa genera una señal de 4096 bits, con n muestras por cada bit (dependiendo de la velocidad con la que se desee mandar la señal). Esta cadena polibinaria, contenida dentro de un vector, se introduce al generador de funciones arbitrarias (AFG) a través de la ejecución de un programa de comunicación (en Matlab) el cual establece el enlace entre estos dos elementos a través de la *api* VISA. Las muestras de la señal polibinaria se envían al AFG a través de un cable USB.

Este dispositivo entra en el modo *arbitrary function* inmediatamente se ejecute el programa de comunicación. En este modo, el AFG toma las muestras que se le enviaron y las reproduce a la frecuencia que se le solicite. Con la cantidad de bits que conforman la señal polibinaria N_{bits} y la frecuencia f a la cual se repita el conjunto de muestras, podemos calcular la tasa de transmisión R de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R[b/s] = fN_{bits} \quad (6.1)$$

Con ellos podemos darnos una idea de a que velocidad estamos transmitiendo. Por ejemplo, para transmitir a una tasa de 125 [Mbps] con un mensaje de 4086 bits, el AFG

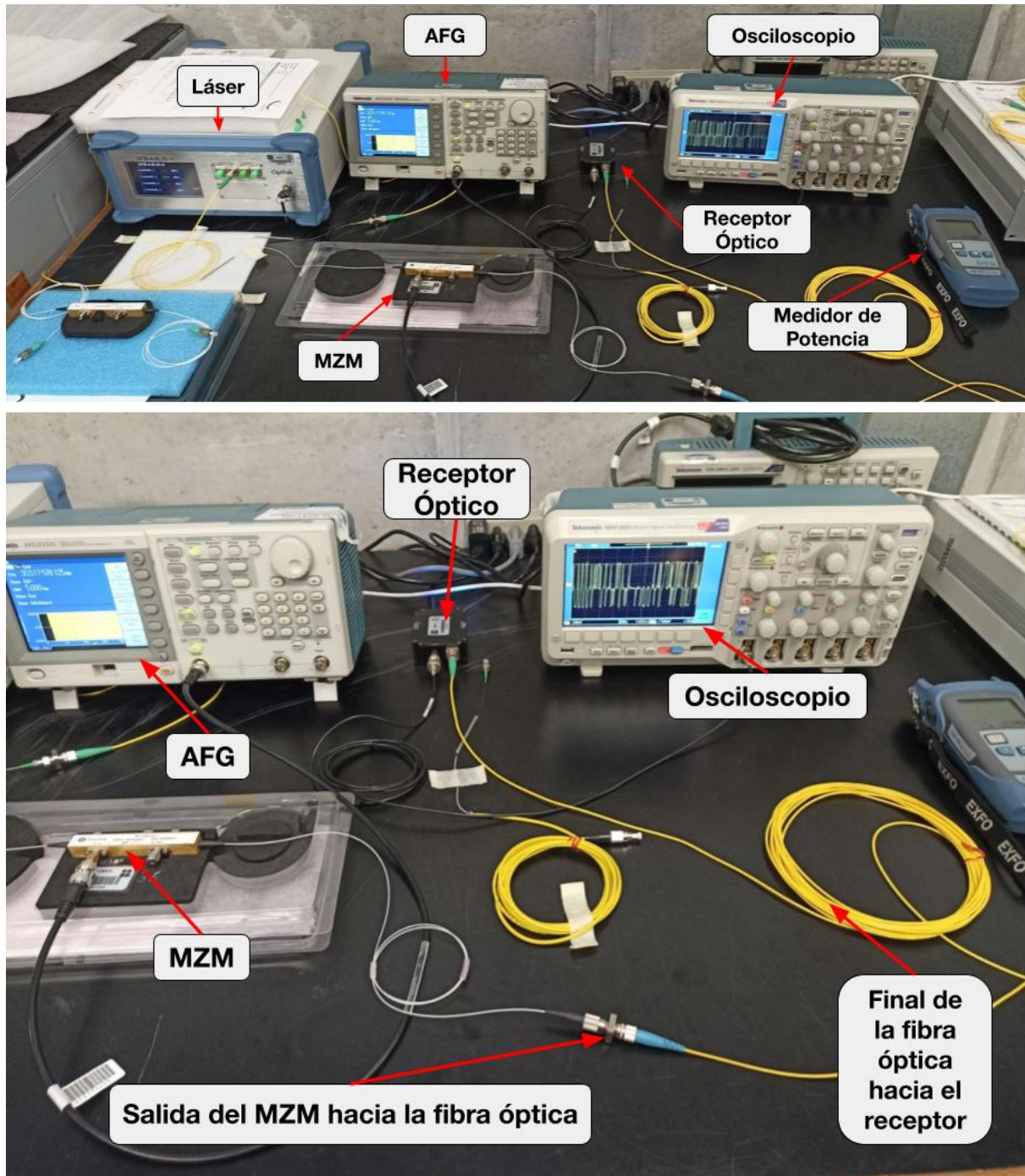


Figura 6.2: Implementación del sistema físico. Se aprecian el láser, el AFG, el MZM, el receptor óptico y el osciloscopio. En la pantalla del osciloscopio se aprecia la recepción de una señal duobinaria.

se debe configurar para que oscile a:

$$f[Hz] = \frac{R}{N} = \frac{125 \times 10^6}{4096} = 30.5175[kHz] \quad (6.2)$$

En este ejemplo, configurar el AFG para que el mensaje de 4096 bits se repita más de 30000 veces por segundo nos da una tasa de salida de 125 [Mbps].

El AFG replica la señal digital en el dominio eléctrico y la sube al MZM. Al mismo tiempo, se introduce una señal láser continua a 1550[nm]. El MZM modula la señal láser generando así una señal polibinaria. Esta señal se envía, ya sea *back-to-back* o a través de fibra óptica y se recibe con un receptor óptico basado en detección directa. La conexión entre AFG y MZM se realiza a través de un cable coaxial.

El generador láser utilizado genera un haz continuo de 10[dBm] de potencia (13[dBm] para ciertos casos), el cual llega al MZM a través de un conector APC. La señal polibinaria modula el haz láser, lo que da lugar a la señal polibinaria óptica. Primero se trabajó con el MZM directamente conectado con el receptor óptico (*back-to-back*) y luego se trabajó con cierta distancia de fibra óptica en medio.

La recepción de la trama polibinaria óptica se realiza a través del fotoreceptor discutido en la sección 2.2 del capítulo 2; un fotodiodo. Este dispositivo traduce la potencia de la señal óptica en una señal eléctrica la cual se puede apreciar en un osciloscopio. En el osciloscopio podemos obtener las muestras necesarias para realizar el análisis posterior. Habiendo extraído las muestras del osciloscopio, se llevan a la pc donde se ejecuta el programa de demodulación polibinaria el cual abstrae las muestras obtenidas, las normaliza, las muestrea, aplica el *slicer* para volver a una señal polibinaria sin ruido y finalmente se demodula la señal para regresar al mensaje original. Finalmente, se observa la trama binaria demodulada y se contrasta con la que se creó originalmente para poder observar los errores, a través del nivel de BER, el diagrama ojo, entre otras cosas.

Es importante mencionar que la computadora de trabajo es el cerebro de toda esta operación. Es a través de ella que se opera: el programa de creación de la señal duobinaria,

el programa de comunicación con el AFG y el programa de demodulación.

6.1.1. Generador de Funciones Arbitrarias

En secciones anteriores hemos mencionado que para poder elevar la tasa a la cual el AFG envía la señal al MZM, el número de muestras por bit que conforman el mensaje pseudo-aleatorio se ven reducidas en un factor igual al aumento de la tasa.

Esta relación no es trivial, pues radica del funcionamiento interno del modulador. Dentro de los AFG comerciales, las señales clásicas como una onda cosenoidal o un diente de sierra están guardadas en la memoria interna. Estas señales están conformadas por un vector de muestras de longitud específica. También estos generadores funcionan con una frecuencia de muestreo fija. Para el caso del AFG utilizando en esta tesis, dicha frecuencia es de $S_f = 1[\text{Gsample}/s]$. Ahora bien, para que un generador genere una señal, toma las muestras que conforman la señal deseada y las propaga a la frecuencia de muestreo. La frecuencia de la señal de salida está dada por la siguiente expresión:

$$f_{Out} = \frac{S_f}{\#Muestras} \quad (6.3)$$

De esta expresión nace una pregunta. Si el número de muestras que conforman una señal es fijo, y la frecuencia de muestreo es fija también, entonces ¿cómo es que un usuario configura la frecuencia a la que quiere su señal? En esta pregunta radica el verdadero funcionamiento del AFG. El generador de funciones realiza un cálculo utilizando la frecuencia que el usuario requiere, y modifica la cantidad de muestras que conforman la señal.

Una señal que utiliza el 100 % de las muestras destinadas construirla sale a una frecuencia f_0 . Pero, por ejemplo, supongamos que queremos una señal que oscile a la mitad de la frecuencia f_0 . Dado que la frecuencia de muestreo es fija, entonces el AFG comenzará a duplicar muestras. Por otro lado, si la frecuencia deseada es el doble de la frecuencia f_0 , entonces el AFG comenzará a saltarse muestras, una de cada dos. En realidad, para cual-

quier frecuencia que el usuario configure, el AFG realiza el ajuste de muestras necesarias para que se genere la señal, ya sea repitiendo muestras o sustrayéndolas.

Puede observarse el problema intrínseco de este tipo de equipos. Entre más alta sea la frecuencia deseada de la señal de salida, menos muestras conforman la señal de salida, pues el generador comienza a saltarse más y más muestras. Que una señal esté conformada por menos muestras significa que se pierde su suavidad al grado de que puede verse completamente desfigurada.

Aterricemos estos conceptos con las señales que venimos manejando en este proyecto.

El mensaje de bits que se maneja en todos y cada uno de los experimentos y simulaciones es el mismo. Se trata de una cadena de 4096 bits, donde los primeros 512 son iguales a 0 (un encabezado) y los siguientes 3584 son pseudo-aleatorios. Originalmente se trabajó con un sobremuestreo de 32 muestras por cada bit. Es decir, nuestro mensaje de 4096 bits originalmente tenía una longitud de 131072 muestras. Con estos datos podemos aplicar las Ecuaciones 6.1 y 6.3.

$$f_{Out} = \frac{S_f}{\#Muestras} = \frac{1 \times 10^9}{131072} = 7.6293[kHz] \quad (6.4)$$

$$R = fN_{bits} = (7.6293 \times 10^3)(4096) = 31.25[Mbps] \quad (6.5)$$

Esta tasa de transmisión es con la que se trabajó originalmente en diversas iteraciones de los experimentos. Sin embargo, es una tasa extremadamente baja considerando que estamos trabajando en un sistema óptico. Por tanto, se optó por aumentar la tasa. El AFG es perfectamente capaz de hacerlo y por tanto empieza a eliminar muestras, pero para tener un mejor control de lo que sucedía con las muestras, se optó por eliminarlas de antemano. Lo anterior se realizó disminuyendo el sobremuestreo. Las tasas a las que se trabajó se resumen en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Resumen de Muestras y Tasas

Sobremuestreo [bits/muestra]	Muestras Totales	Frecuencia en el Osciloscopio [kHz]	Tasa de Transmisión [Mbps]
32	131072	7.6293	31.25
8	32768	30.5175	125
4	16384	61.0351	250

A pesar de que el generador realiza esta reducción de muestras de manera automática, se optó por reducir el sobremuestreo de antemano y así construir un vector de muestras más pequeño. Configurar el sobremuestreo de antemano fue útil para poder generar los diagramas de ojos por cada experimento de manera correcta.

6.2. *Back-to-Back* Óptico

Como medida preliminar para establecer que el sistema funciona, se realizó una primer toma de datos, donde se trabajó como en el sistema de la Figura 6.1, con la única diferencia de que no se colocó el tramo de fibra óptica, es decir, se trabajó en la modalidad *back-to-back* óptico.

Se trabajó con el láser a 1550[nm] y una potencia óptica de 10[dBm]. A la salida del modulador se midió una potencia óptica promedio de entre 1.4 y 1.6[dBm]. La tasa utilizada para este experimento preliminar fue de 31.25[Mbps].

Los resultados de esta implementación fueron bastante prometedores. La transformación del dominio eléctrico al óptico modifica muy poco la forma de la señal y el problema que se observa son las pérdidas que genera el modulador. Todas las cadenas enviadas se recibieron y decodificaron sin ningún error. Es más significativo observar la distorsión del vector de muestras a través de la comparativa entre diagramas de ojo. Dichas comparativas se aprecian en las siguientes figuras.

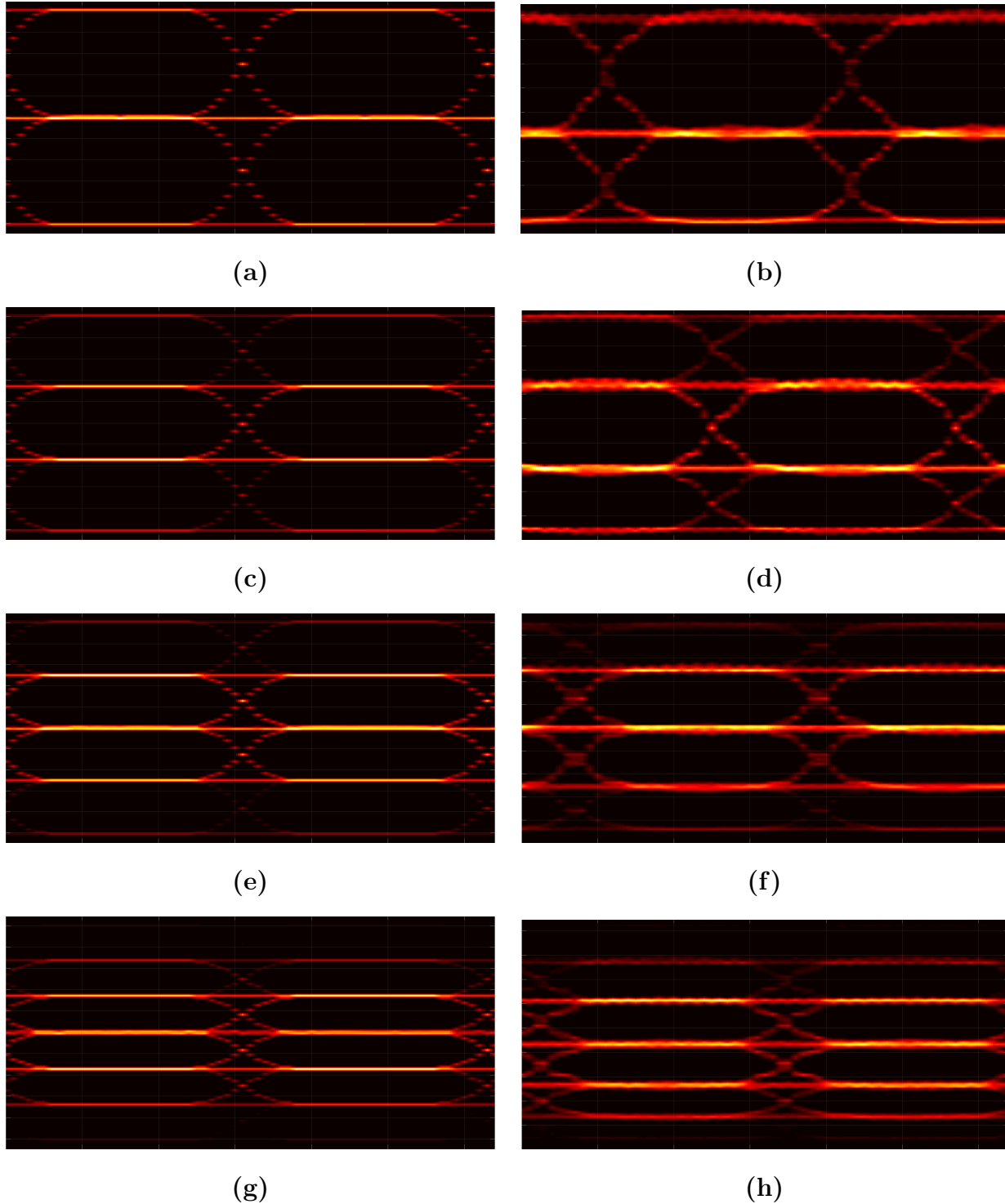


Figura 6.3: En estos diagramas de ojo se puede apreciar que el cambio del dominio eléctrico al óptico no está exento de cambios. Las muestras experimentales se tomaron a una tasa de $31.25[\text{Mbps}]$. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+6 \times 10^{-8}[\text{s}]$, donde caben ventanas de 32 muestras. (a) Duobinario, (b) Duobinario recibido *btb*, (c) Polibinario de 4 niveles, (d) Polibinario de 4 niveles recibido *btb*, (e) Polibinario de 5 niveles, (f) Polibinario de 5 niveles recibido *btb*, (g) Polibinario de 7 niveles, (h) Polibinario de 7 niveles recibido *btb*.

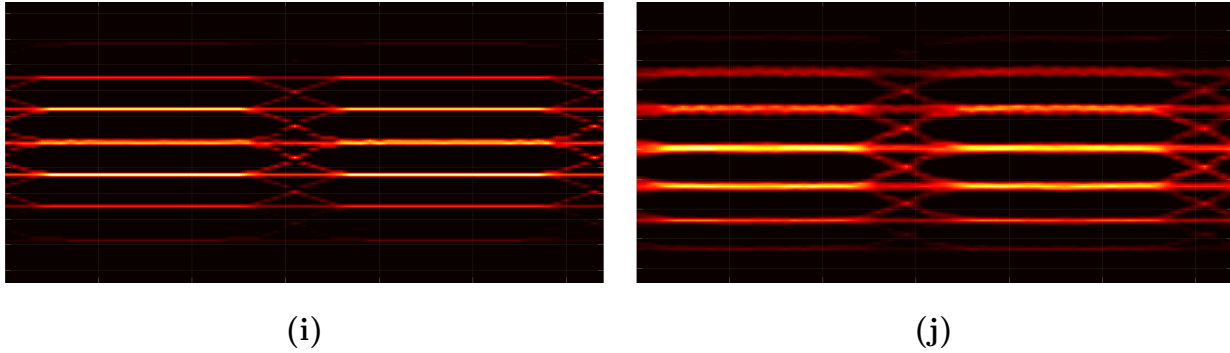


Figura 6.4: Continuación. (i) Polibinario de 9 niveles, (j) Polibinario de 9 niveles recibido *btt*.

6.3. Polibinario A Través de 5 km de Fibra Óptica y 31.25 Mbps

Se procedió entonces a enviar señales polibinarias a través de fibra óptica. En el Laboratorio de Telecomunicaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM se poseen un par de carretes de SMF desnuda que suman una distancia de $5.3[km]$. El arreglo experimental de la sección anterior no cambia mucho, salvo en la introducción de los carretes de fibra, junto con conectores mecánicos, entre el modulador y el receptor óptico. Los carretes de fibra desnuda se observan en la Figura 6.5.

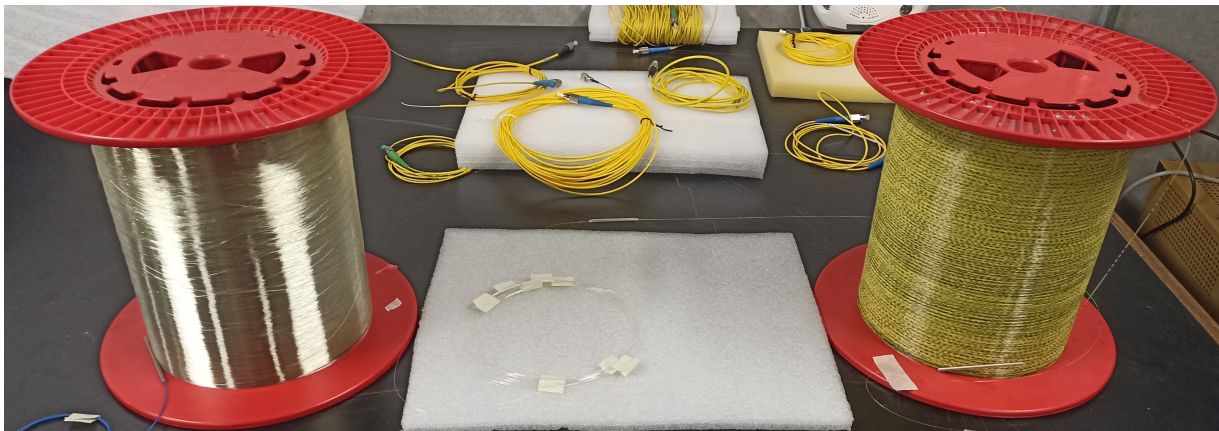
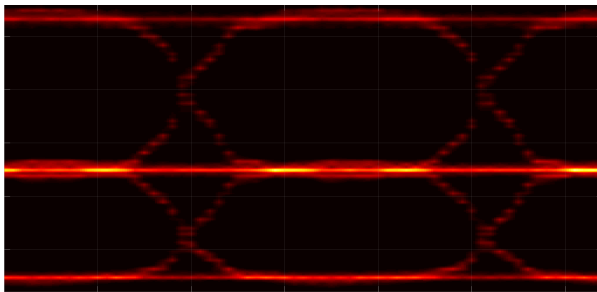


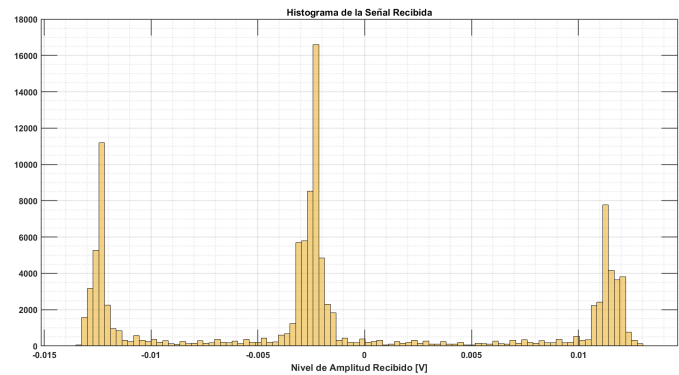
Figura 6.5: Arreglo experimental. Los carretes de SMF desnuda suman una distancia de recorrido de $5[km]$.

Para esta ronda de experimentos se trabajó con las mismas señales polibinarias del experimento anterior, recordando que se trabajó a una tasa de transmisión de $31.25[\text{Mbps}]$ o bien con bits de $\tau = 32[\text{ns}]$.

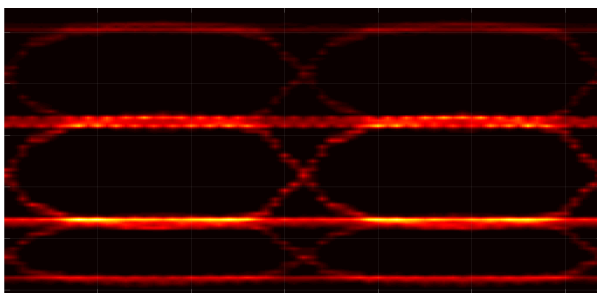
El MZM es un dispositivo que tiene un ancho de banda considerable, de hasta $10[\text{GHz}]$, de tal modo que trabajar a una tasa tan pequeña como lo son apenas $31.25[\text{Mbps}]$ no le causa problema alguno. El reto para el formato polibinario es aguantar los efectos de la fibra dispersiva y atenuante, así como el ruido de los aparatos. En las Figuras 6.6 y 6.7 se aprecian los resultados obtenidos para este primer experimento. En las siguientes figuras se muestran histogramas de las muestras obtenidas de cada nivel del polibinario y de manera complementaria el diagrama de ojo que dichas muestras genera.



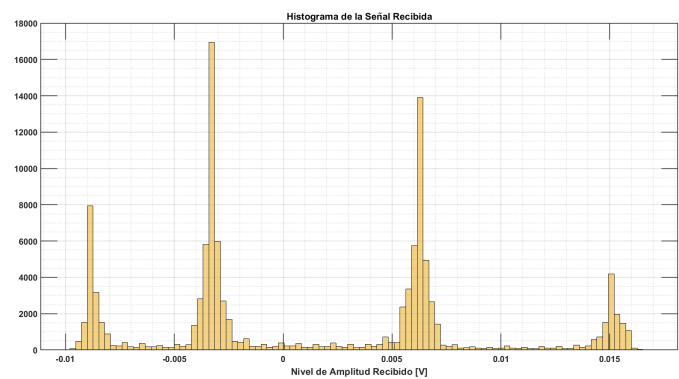
(a)



(b)

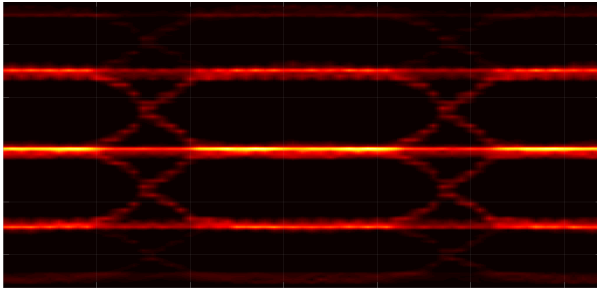


(c)

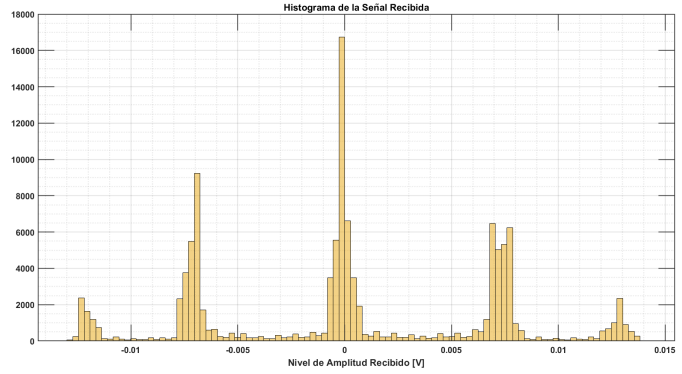


(d)

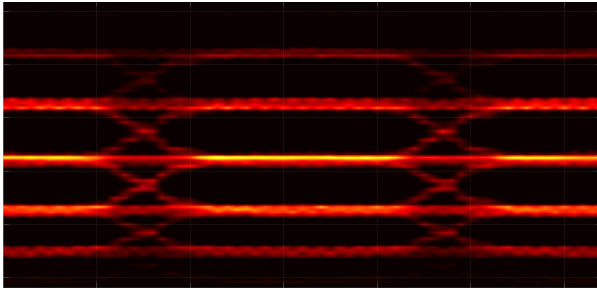
Figura 6.6: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 3, 4 y 5 del formato polibinario generados a partir de las muestras experimentales a $31.25[\text{Mbps}]$ cuando estas viajaron por $5[\text{km}]$ de fibra óptica. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+6 \times 10^{-8}[\text{s}]$, donde caben ventanas de 32 muestras. (a) Duobinario, (b) histograma del duobinario, (c) polibinario-4, (d) histograma del polibinario-4.



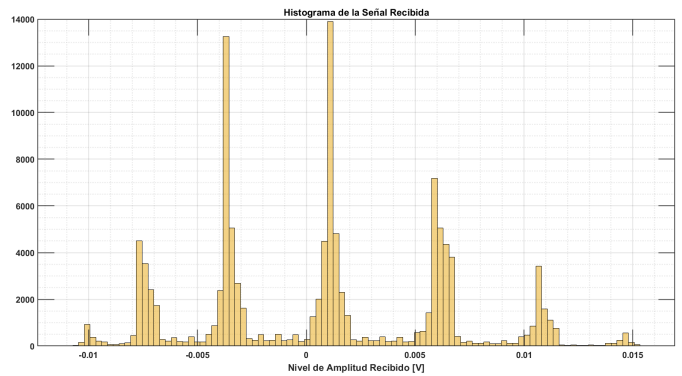
(e)



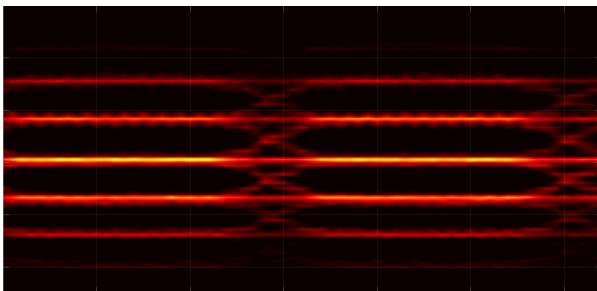
(f)



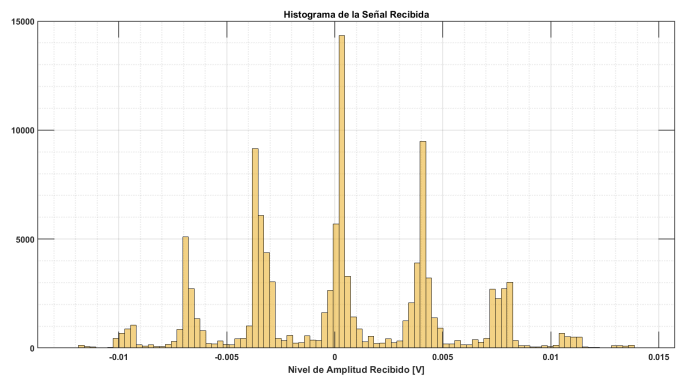
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 6.7: Continuación. (e) polibinario-5, (f) histograma del polibinario-5, (g) polibinario-7, (h) histograma del polibinario-7, (i) polibinario-9, (j) histograma del polibinario-9.

Los resultados de esta ronda de pruebas fueron bastante positivos. El polibinario de 3, 4, 5, 7 y 9 niveles fue recibido con considerable atenuación, pero pudo ser decodificado con 0 errores ($BER = 0$).

Tabla 6.2: Nivel de BER para 5[km] y a 31.25[Mbps]

Longitud de la Fibra Óptica: 5[km]					
Tasa de Transmisión: 31.25[Mbps]					
Niveles del Formato Polibinario	3	4	5	7	9
Número de Errores en 3584 Bits	0	0	0	0	0
Valor de BER	0	0	0	0	0

6.4. Polibinario A Través de 5 km de Fibra Óptica y 125 Mbps

En vista del éxito obtenido en previos experimentos, se propuso aumentar drásticamente la tasa de transmisión en un factor de 4 veces.

Se procedió entonces a enviar las señales polibinarias a través de la fibra una vez más. Para esta ronda de experimentos se trabajó con las mismas señales polibinarias del experimento anterior, recordando que se trabajó a una tasa de transmisión de 31.25[Mbps] o bien con bits de $\tau = 32[ns]$. La diferencia es que para estos experimentos se trabajó con una tasa de transmisión igual a 125[Mbps], con un *oversampling* de 8 muestras por cada bit enviado. Esta disminución de muestras con respecto al caso anterior (31,25[Mbps] a 32 muestras por cada bit) radica en, como se explicó anteriormente, se utiliza un generador de señales arbitrarias (AFG) para construir la señal polibinaria, pero este dispositivo tiene una frecuencia de muestreo fija a $S_f = 1[Gsample/s]$. La frecuencia de la señal de salida, y por extensión la tasa de bits, está ligada con la cantidad de muestras que conforma una señal y la frecuencia de muestreo. Dado que dicha frecuencia es fija, el AFG (o el usuario) se ve forzado a reducir las muestras que conformen una señal para tasas de salida superiores. Por ello, para aumentar la tasa de transmisión 4 veces, se redujeron el número

de muestras 4 veces.

En las siguientes figuras se muestran histogramas de las muestras obtenidas de cada nivel del polibinario y de manera complementaria el diagrama de ojo que dichas muestras genera.

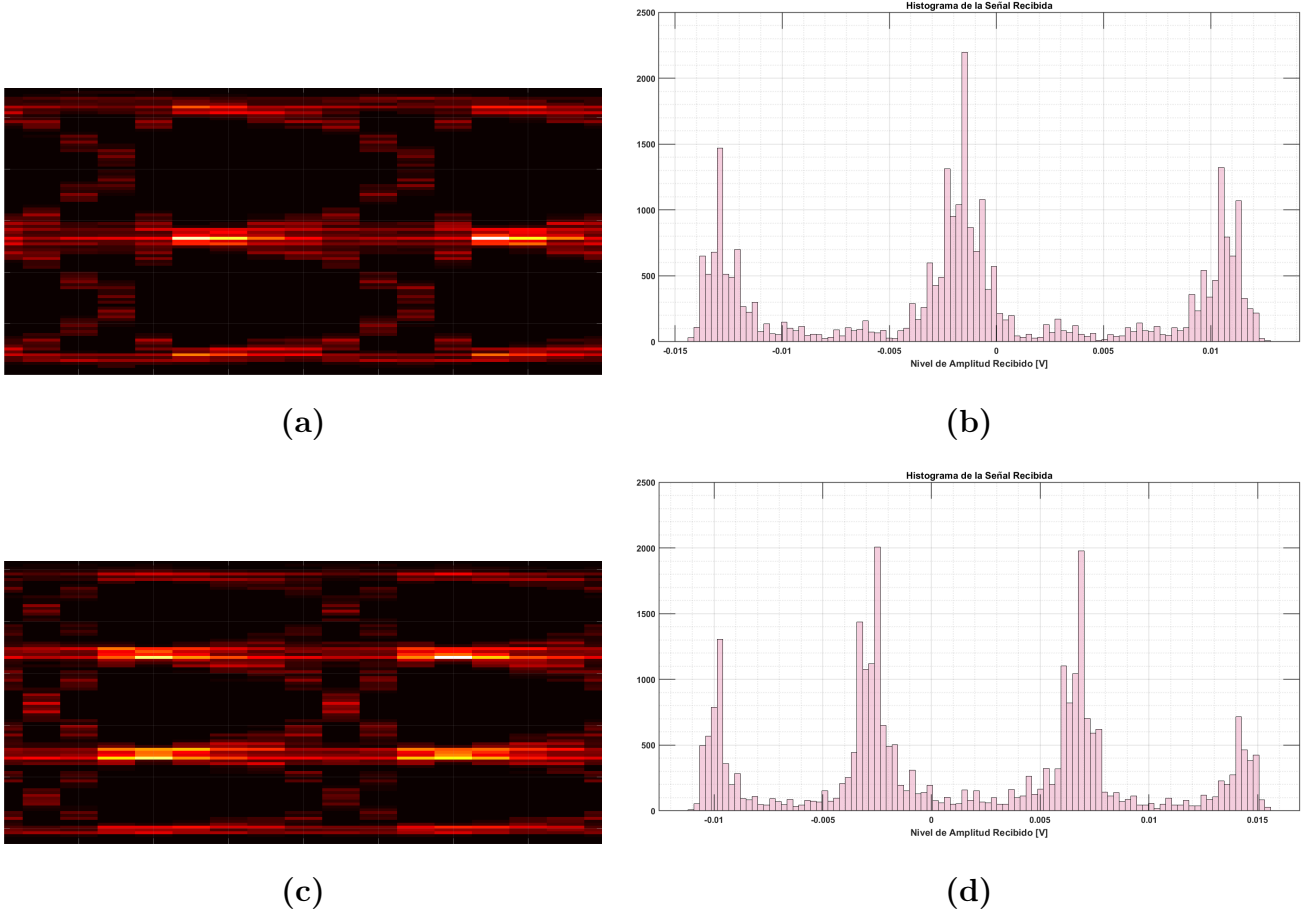
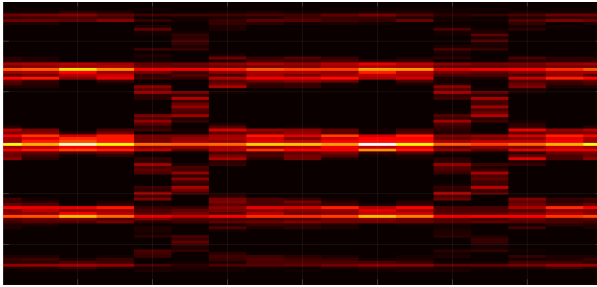
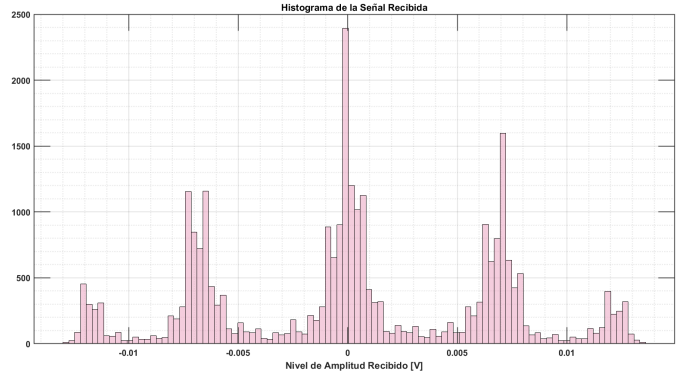


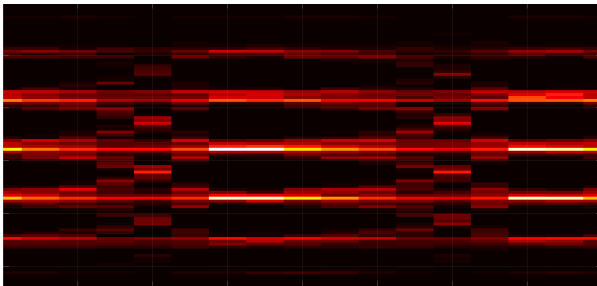
Figura 6.8: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 3 y 4 del formato polibinario generados a partir de las muestras experimentales a 125[Mbps] cuando estas viajaron por 5[km] de fibra óptica. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+1.6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 8 muestras. (a) Duobinario, (b) histograma del duobinario, (c) polibinario-4, (d) histograma del polibinario-4.



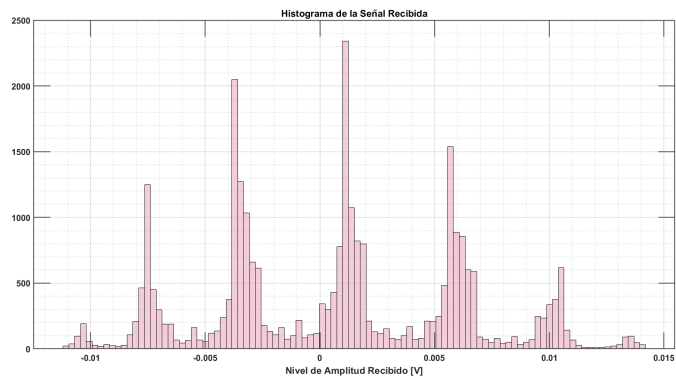
(e)



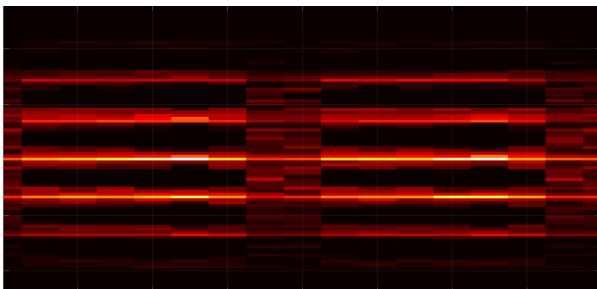
(f)



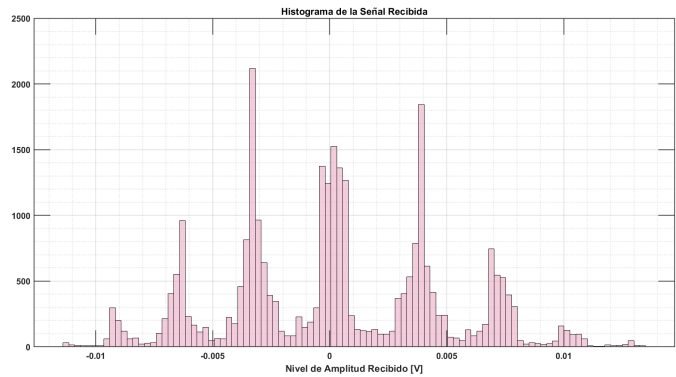
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 6.9: Continuación. Niveles 5, 7 y 9. (e) polibinario-5, (f) histograma del polibinario-5, (g) polibinario-7, (h) histograma del polibinario-7, (i) polibinario-9, (j) histograma del polibinario-9.

Sin importar la cantidad de ruido o dispersión, la señal con el formato polibinario mantiene en forma. En el diagrama de ojo las aberturas son claras y en los histogramas es clara la existencia de regiones delimitadas. De esta forma llegamos a la conclusión de que

los 5[km] de fibra óptica no afectan mucho a la señal, a pesar de aumentar la tasa 4 veces y disminuir el sobremuestreo por 4 veces.

Utilizando la mejor cadena recibida, se obtuvieron valores de BER iguales a 0 para los 5 niveles del polibinario. Lo anterior se resume en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Nivel de BER para 5[km] y a 125[Mbps]

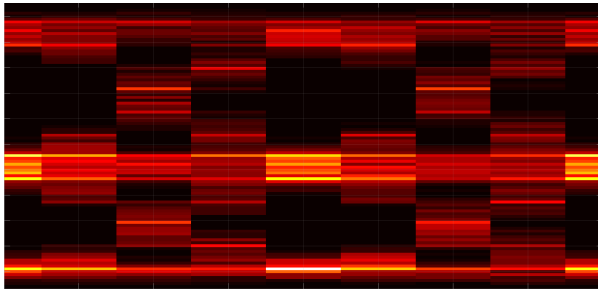
Longitud de la Fibra Óptica: 5[km]					
Tasa de Transmisión: 125[Mbps]					
Niveles del Formato Polibinario	3	4	5	7	9
Número de Errores en 3584 Bits	0	0	0	0	0
Valor de BER	0	0	0	0	0

Conociendo los resultados anteriores podemos seguir presionando más el enlace, esta vez subiendo la tasa de transmisión una vez más, al doble: 0.25[Gbps].

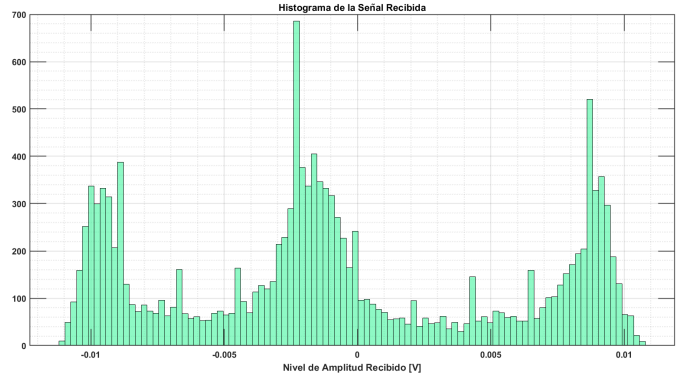
6.5. Polibinario A Través de 5 km de Fibra Óptica y 250 Mbps

Se propuso aumentar la tasa de transmisión una vez más, al doble con respecto al experimento anterior o bien en un factor de 8 veces con respecto a la tasa original de 31.25[Mbps], a un sobremuestreo de 4 muestras por cada bit.

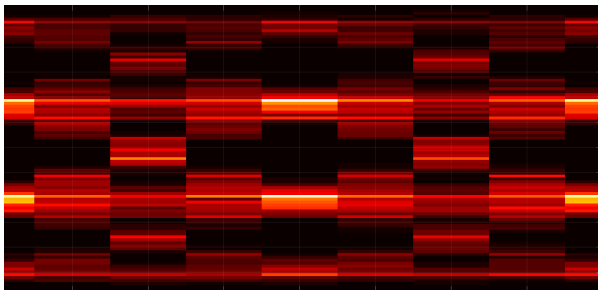
Una vez más se procedió entonces a enviar señales polibinarias a través del carrete de fibra óptica. Para esta ronda de experimentos se trabajó con señales polibinarias del con bits de $\tau = 4[ns]$. Una vez más, el arreglo experimental de la sección anterior no cambia mucho.



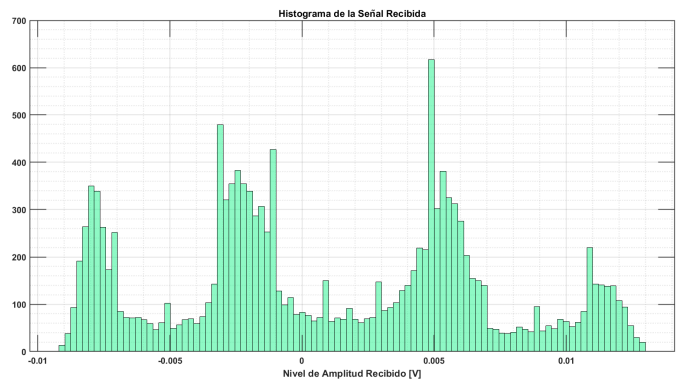
(a)



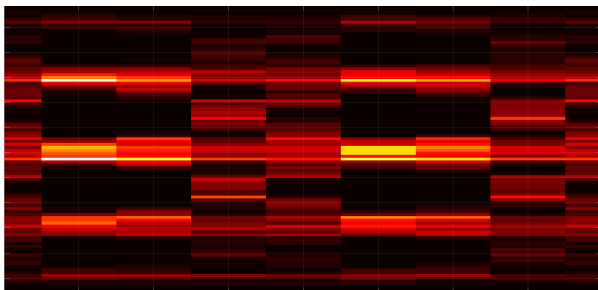
(b)



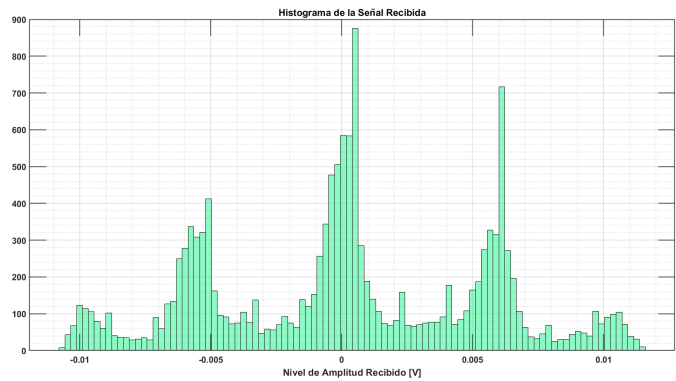
(c)



(d)

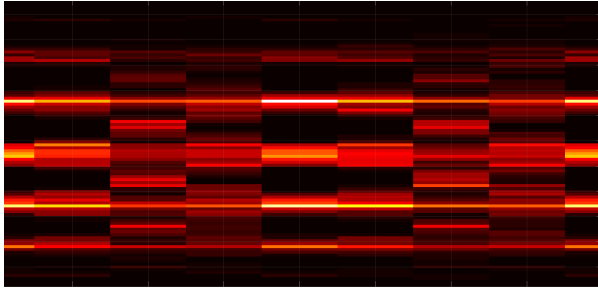


(e)

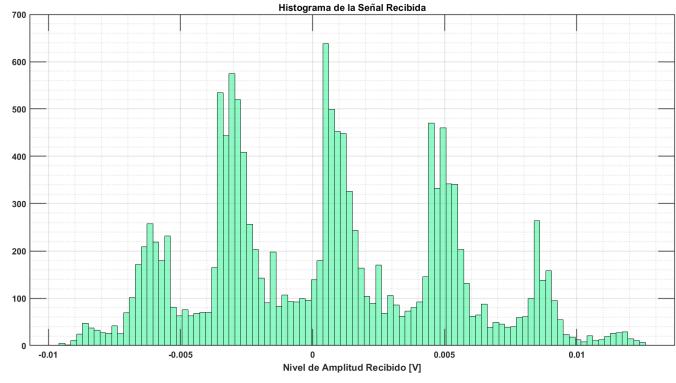


(f)

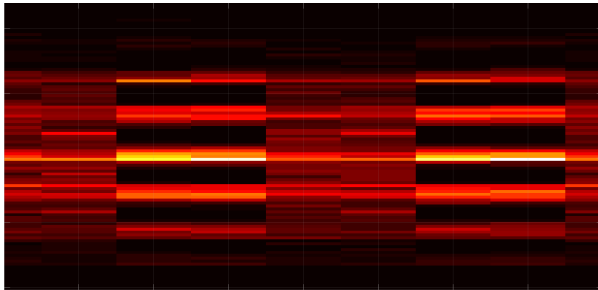
Figura 6.10: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 3, 4 y 5 del formato polibinario generados a partir de las muestras experimentales a 250[Mbps] cuando estas viajaron por 5[km] de fibra óptica. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+8 \times 10^{-9}$ [s], donde caben ventanas de 4 muestras. (a) Duobinario, (b) histograma del duobinario, (c) polibinario-4, (d) histograma del polibinario-4, (e) polibinario-5, (f) histograma del polibinario-5.



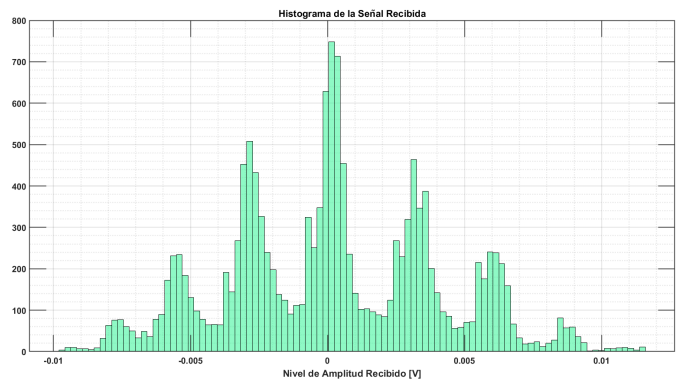
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 6.11: Continuación. Niveles 7 y 9. (g) polibinario-7, (h) histograma del polibinario-7, (i) polibinario-9, (j) histograma del polibinario-9.

Para esta ronda de experimentos se volvió a obtener un valor de BER parejo igual a 0 para todos los niveles. Estos resultados se resumen en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4: Nivel de BER para 5[km] y a 250[Mbps]

Longitud de la Fibra Óptica: 5[km]					
Tasa de Transmisión: 250[Mbps]					
Niveles del Formato Polibinario	3	4	5	7	9
Número de Errores en 3584 Bits	0	0	0	0	0
Valor de BER	0	0	0	0	0

Estos buenos resultados de nivel de BER fueron prometedores para continuar presionando los límites del enlace polibinario. Sin embargo, desgraciadamente se llegó al límite de tasa de transmisión máximo que el equipo es capaz de enviar, debido a que aumentar una vez la tasa significaría que se tendría un sobremuestreo sumamente bajo.

6.6. Polibinario a través del *Front Haul*

Buscando llevar el formato polibinario a los extremos experimentales posibles, se buscó pasar las señales de respuesta parcial a través de la máxima longitud de fibra disponible, esto es a través de un enlace *front haul* de fibra óptica con una longitud máxima de 21[km], el cual posee un tramo instalado entre el edificio 12 ‘Bernardo Quintana’ del Instituto de Ingeniería y el edificio ‘Valdés Vallejo’ de la Facultad de Ingeniería, dentro de Ciudad Universitaria, Ciudad de México. Una considerable cantidad de información acerca del funcionamiento, propósito, diseño y conformación de este enlace de fibra óptica puede apreciarse en [8]. En resumidas cuentas, este enlace de fibra óptica está conformado por tres secciones de cable de fibra óptica que al sumarse alcanzan la longitud máxima de 21.73[km].

El enlace se encontraba conformado inicialmente por un cable de fibra monomodal

de 48 hilos de la marca YOFC (ITU-T G.652.D) utilizada para transmisión WDM con una longitud de 555[m], el cual conecta físicamente el II con la Facultad de Ingeniería. De esos se tomaron 6 hilos *full-duplex* (es decir 12) y se unieron en los extremos, a través de conectores mecánicos, para generar una distancia de 3.33[km] para así conformar el conjunto A. El conjunto B está conformado por los 18 hilos *full-duplex* restantes, los cuales fueron empalmados a través de fusión para así generar un enlace de 9.99[km]. Finalmente, dentro del II al final del enlace se empalmó un carrete más de fibra óptica de 350[m] de longitud. Este carrete de 48 hilos, o bien, 24 enlaces *full-duplex* se empalmó con el conjunto B del cable inicial. Con ello se anexaron 8.4[km] de longitud al enlace total. Uniendo todos los tramos de fibra se genera un enlace *full-duplex* de fibra óptica con una longitud de 21.73[km], el cual es perfecto para experimentaciones que requieran fibra óptica que esté en condiciones ‘instaladas’, más que de laboratorio.

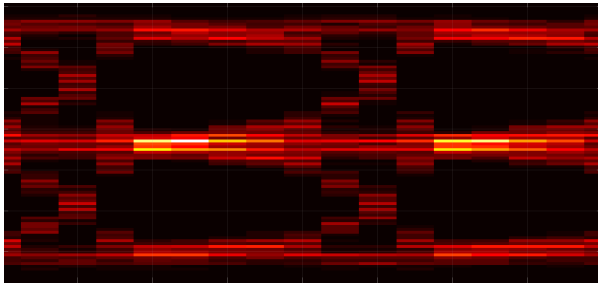
Se probó con la configuración del enlace que suma una longitud de 9.99[km] así como cuando mide 18[km], puesto que para la longitud máxima de 21[km] la señal se volvió irre recuperable.

6.6.1. Polibinario A Través de 10 km de Fibra Óptica y 125 Mbps

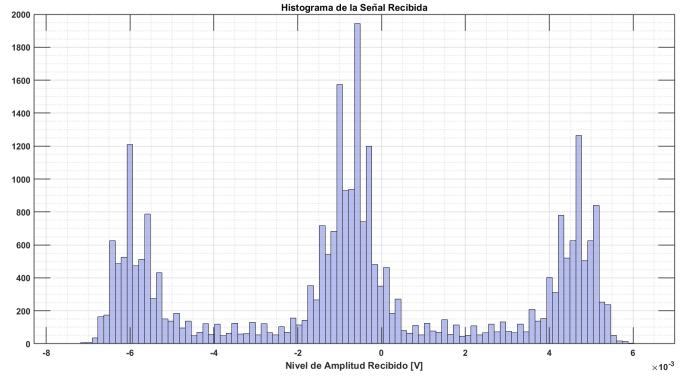
Para esta nueva ronda de experimentos, se regresó a la tasa de 125[Mbps], y se configuró el *front-haul* para que el camino óptico fuera de casi 10[km] de longitud.

El arreglo experimental cambia un poco. A la salida del MZM se conecta un *jumper* de fibra óptica que acaba en la entrada del *front-haul* y un *jumper* que viene de regreso se conecta al receptor óptico.

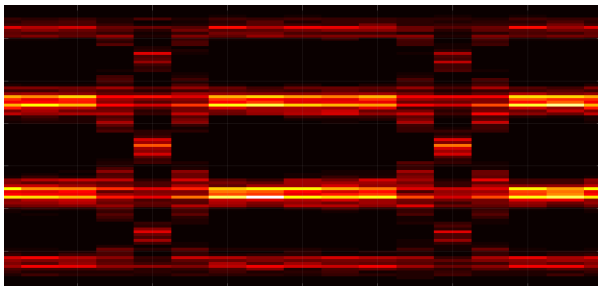
En las siguientes figuras se muestran histogramas de las muestras obtenidas de cada nivel del polibinario y de manera complementaria el diagrama de ojo que dichas muestras genera.



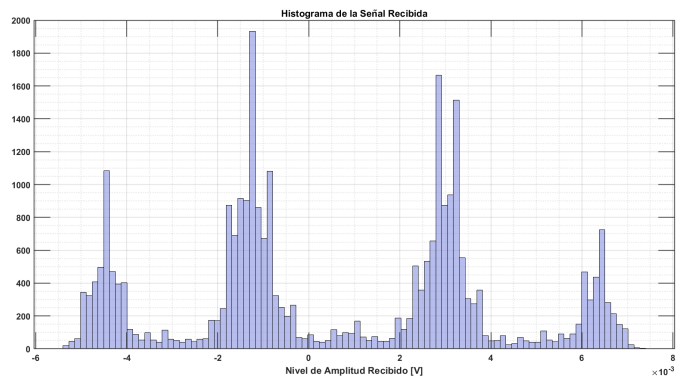
(a)



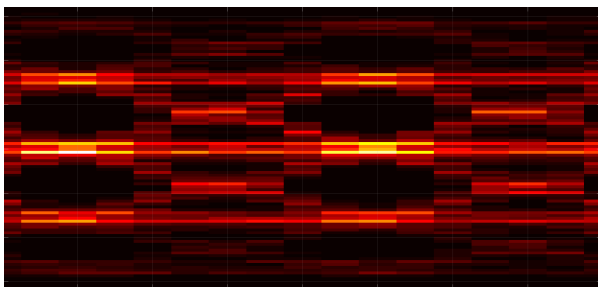
(b)



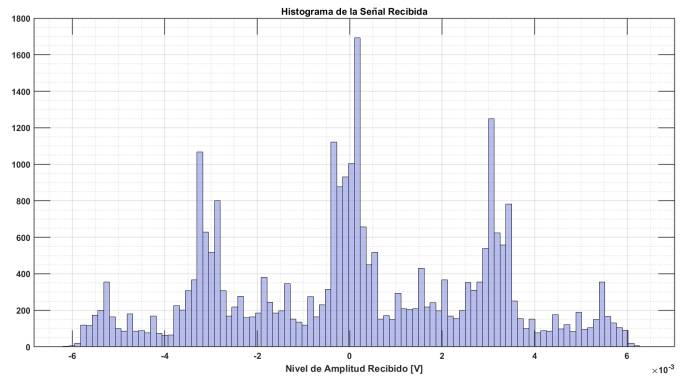
(c)



(d)

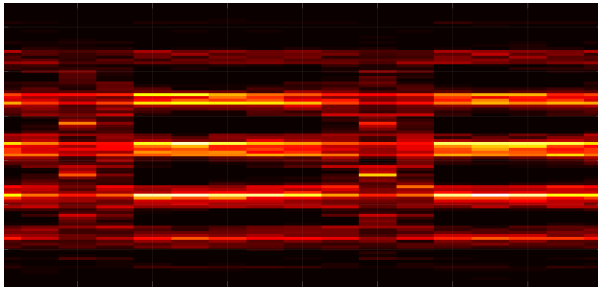


(e)

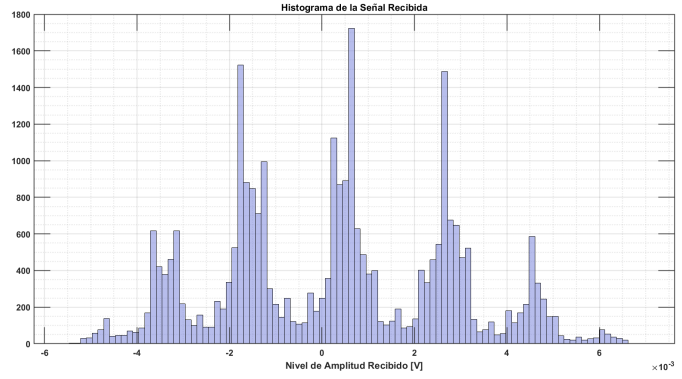


(f)

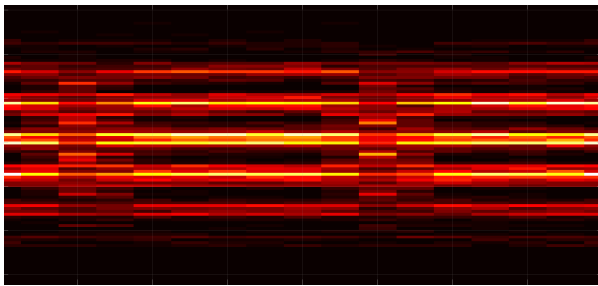
Figura 6.12: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 3, 4 y 5 del formato polibinario generados a partir de las muestras experimentales a 125[Mbps] cuando estas viajaron por 10[km] de fibra óptica. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+1.6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 8 muestras. (a) Duobinario, (b) histograma del duobinario, (c) polibinario-4, (d) histograma del polibinario-4, (e) polibinario-5, (f) histograma del polibinario-5.



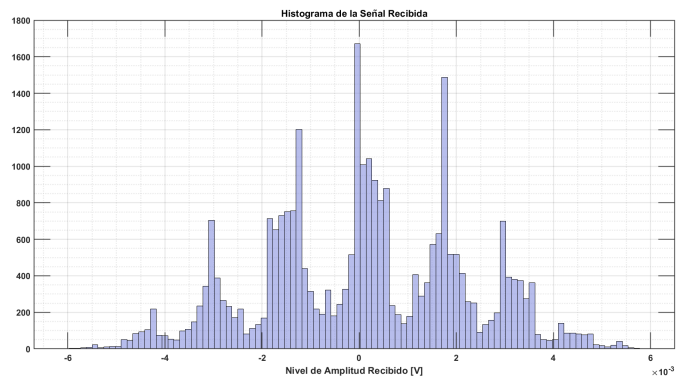
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 6.13: Continuación. (g) polibinario-7, (h) histograma del polibinario-7, (i) polibinario-9, (j) histograma del polibinario-9.

Para esta ronda de experimentos se obtuvo un valor de BER igual a 0 en 3, 4 y 5 niveles, de 8.3705×10^{-4} (3 errores) en 7 niveles y de 0.0084 (28 errores) en 9 niveles. Puede apreciarse en las Figuras 6.12 y 6.13 que la apertura de los diagramas de ojos comienza a cerrarse, especialmente para los niveles superiores. En el histograma se aprecia que comienzan a existir una cantidad decente de muestras en error, pues se hayan entre los picos altos que corresponden a cada nivel. Los resultados se condensan en la Tabla 6.5.

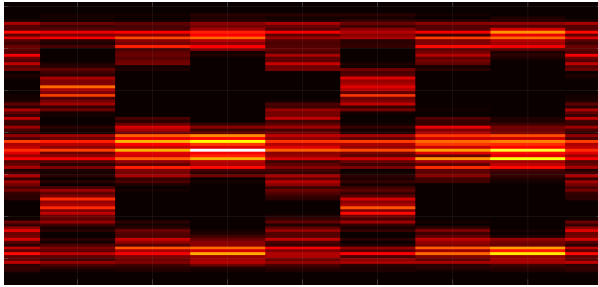
Tabla 6.5: Nivel de BER para 10[km] y a 125[Mbps]

Longitud de la Fibra Óptica: 10[km]					
Tasa de Transmisión: 125[Mbps]					
Niveles del Formato Polibinario	3	4	5	7	9
Número de Errores en 3584 Bits	0	0	0	3	28
Valor de BER	0	0	0	7.8125×10^{-3}	8.4×10^{-3}

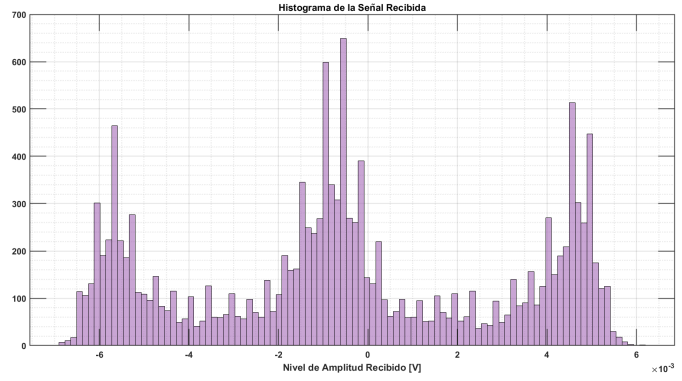
6.6.2. Polibinario A Través de 10 km de Fibra Óptica y 250 Mbps

Para esta nueva ronda de experimentos, se regresó a la tasa de 250[Mbps], y se mantuvo la configuración en el *front-haul* de 10[km] de longitud.

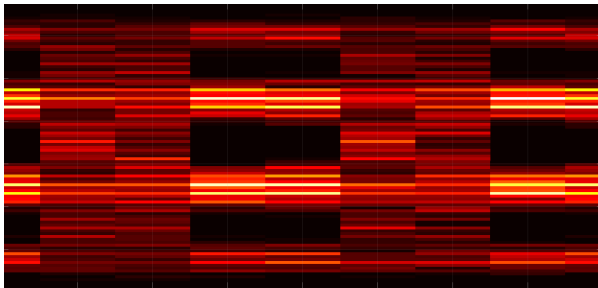
En las siguientes figuras se muestran histogramas de las muestras obtenidas de cada nivel del polibinario y de manera complementaria el diagrama de ojo que dichas muestras genera.



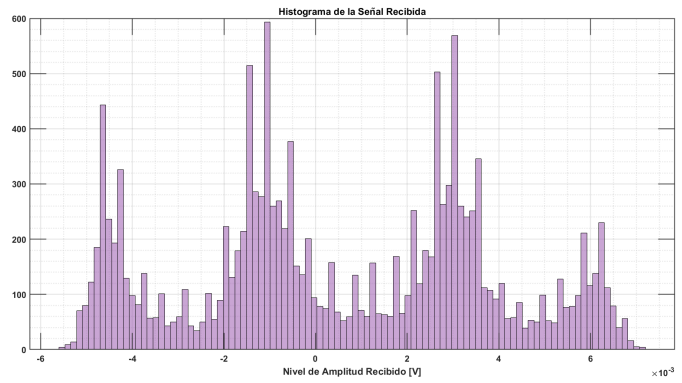
(a)



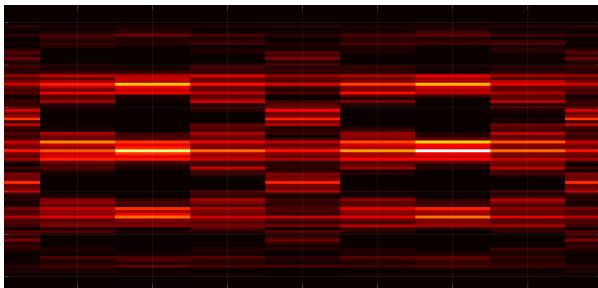
(b)



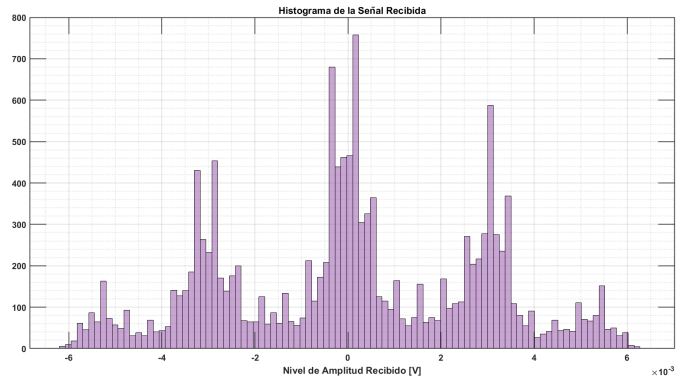
(c)



(d)

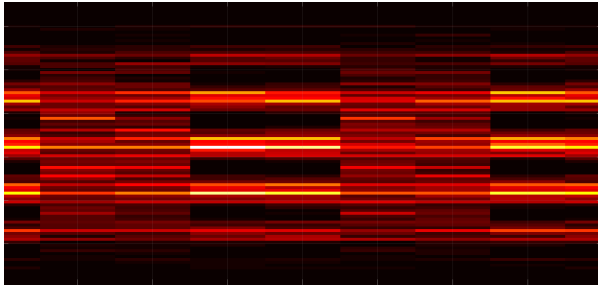


(e)

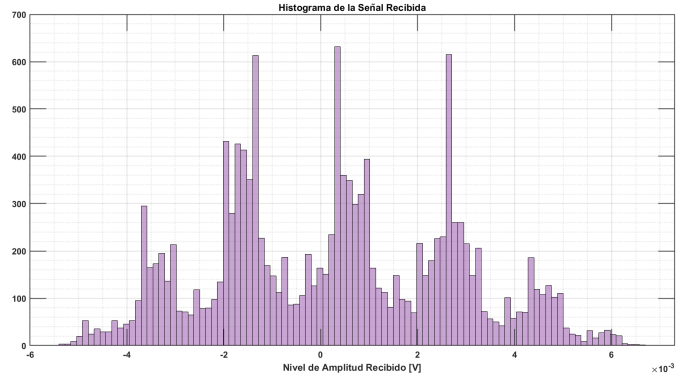


(f)

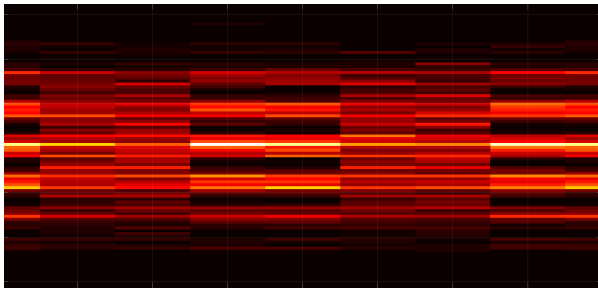
Figura 6.14: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 3 y 4 del formato polibinario generados a partir de las muestras experimentales a 250[Mbps] cuando estas viajaron por 10[km] de fibra óptica. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+8 \times 10^{-9}$ [s], donde caben ventanas de 4 muestras. (a) Duobinario, (b) histograma del duobinario, (c) polibinario-4, (d) histograma del polibinario-4, (e) polibinario-5, (f) histograma del polibinario-5.



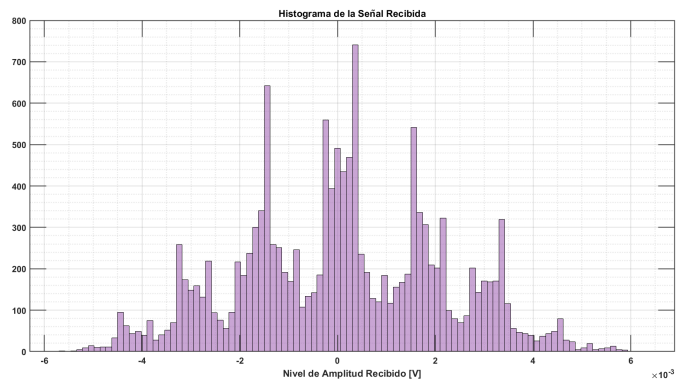
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 6.15: Continuación. (c) polibinario-7, (d) histograma del polibinario-7, (e) polibinario-9, (f) histograma del polibinario-9.

Para esta ronda de experimentos se obtuvo un valor de BER igual a 0 en 3, 4 y 5 niveles, pero continuaron los errores en los siguientes niveles, como se denota en la Tabla 6.6. Se tuvieron valores de 5.5804×10^{-4} (2 errores) en 7 niveles y de 0.0156 (56 errores) en 9 niveles.

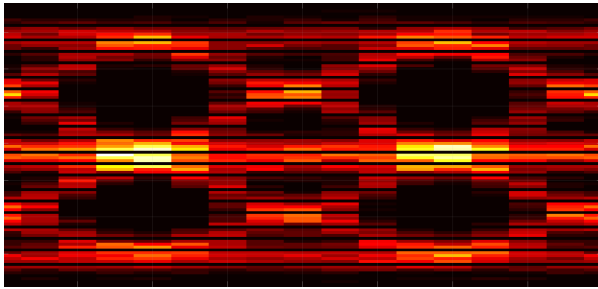
Tabla 6.6: Nivel de BER para 10[km] y a 250[Mbps]

Longitud de la Fibra Óptica: 10[km]					
Tasa de Transmisión: 250[Mbps]					
Niveles del Formato Polibinario	3	4	5	7	9
Número de Errores en 3584 Bits	0	0	0	2	56
Valor de BER	0	0	0	5.5804×10^{-4}	15.6×10^{-3}

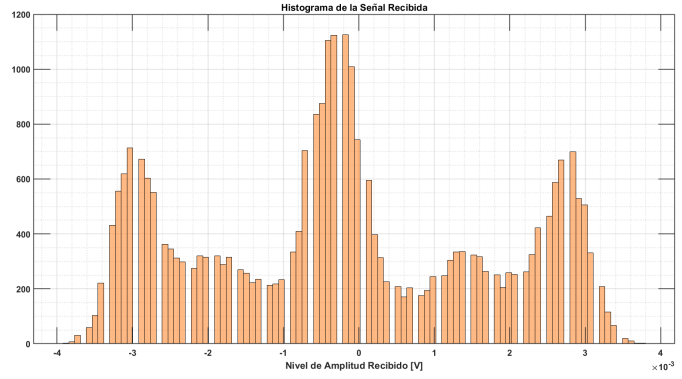
6.6.3. Polibinario A Través de 18 km de Fibra Óptica y 125 Mbps

Posteriormente, se regresó a la tasa de 125[Mbps], y se configuró el *front-haul* para que el camino óptico fuera de 18[km] de longitud.

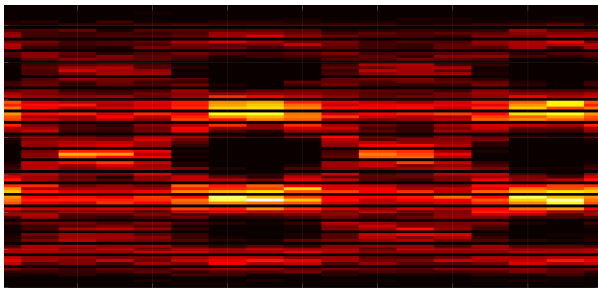
En las siguientes figuras se muestran histogramas de las muestras obtenidas de cada nivel del polibinario y de manera complementaria el diagrama de ojo que dichas muestras genera.



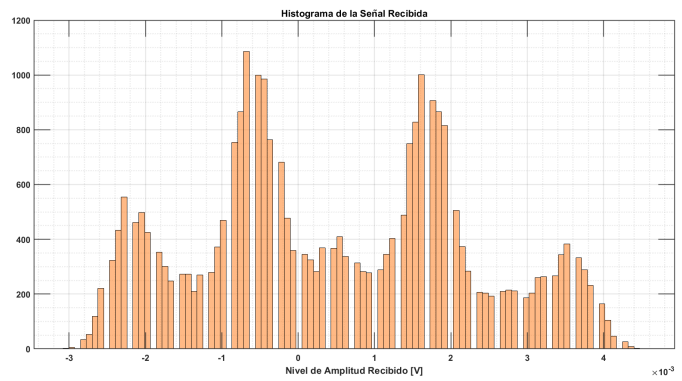
(a)



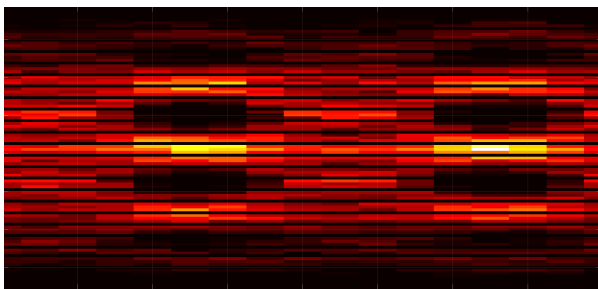
(b)



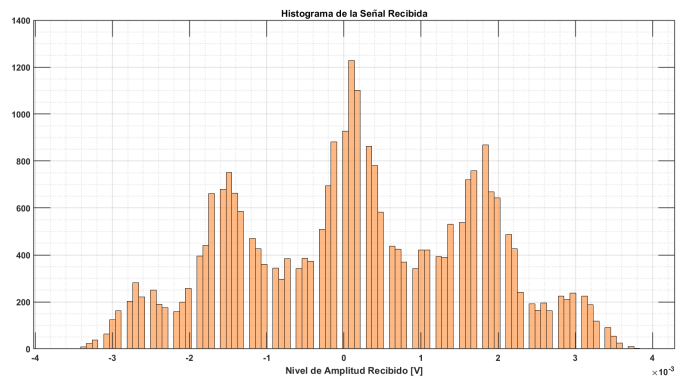
(c)



(d)

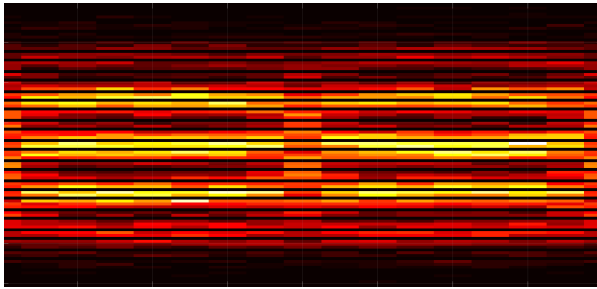


(e)

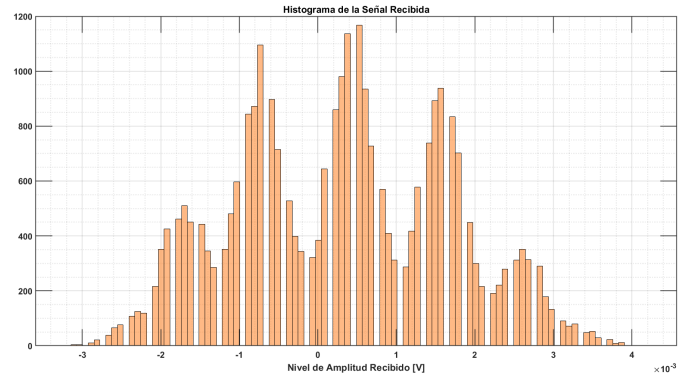


(f)

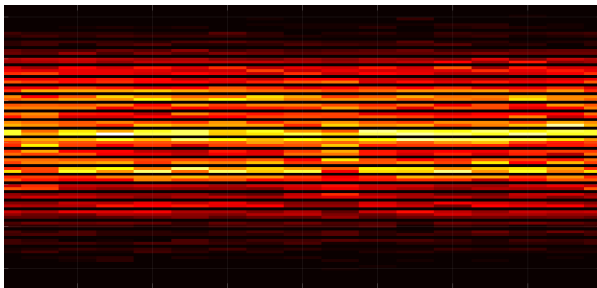
Figura 6.16: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 3, 4 y 5 del formato polibinario generados a partir de las muestras experimentales a 125[Mbps] cuando estas viajaron por 18[km] de fibra óptica. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+1.6 \times 10^{-8}$ [s], donde caben ventanas de 8 muestras. (a) Duobinario, (b) histograma del duobinario, (c) polibinario-4, (d) histograma del polibinario-4, (e) polibinario-5, (f) histograma del polibinario-5.



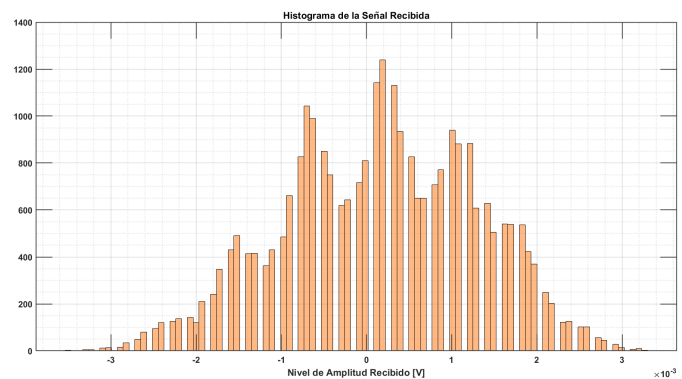
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 6.17: Continuación. (g) polibinario-7, (h) histograma del polibinario-7, (i) polibinario-9, (j) histograma del polibinario-9.

Para esta ronda de experimentos se obtuvo un valor de BER igual a 0 en 3 y 4 niveles, de 0.0033 (12 errores) en 5 niveles, de 0.0377 (135 errores) en 7 niveles y de 0.1099 (365 errores) en 9 niveles. Los resultados se resumen en la Tabla 6.7. Puede apreciarse en las Figuras 6.16 y 6.17 que la señal polibinaria está perdiendo la batalla contra el nivel de ruido. Se observa en los diagramas de ojo que las aberturas se cierran completamente e inclusive para el ojo del polibinario-9 desaparece. Esto cuadra con lo observado en los histogramas donde se aprecia alto nivel de muestras en error.

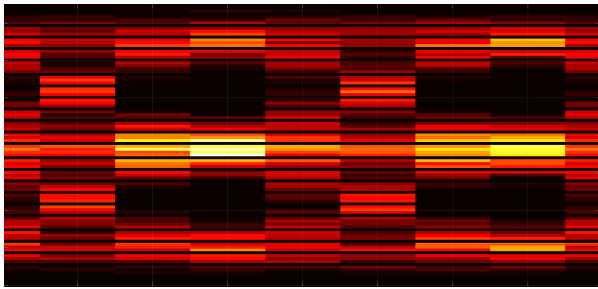
Tabla 6.7: Nivel de BER para 18[km] y a 125[Mbps]

Longitud de la Fibra Óptica: 18[km]					
Tasa de Transmisión: 125[Mbps]					
Niveles del Formato Polibinario	3	4	5	7	9
Número de Errores en 3584 Bits	0	0	12	135	365
Valor de BER	0	0	3.3482×10^{-3}	37.6674×10^{-3}	101.8415×10^{-3}

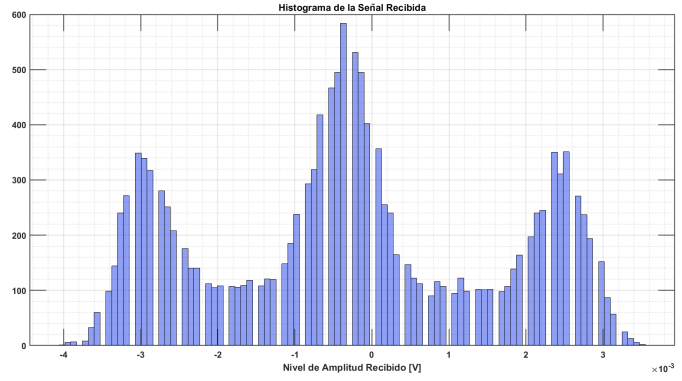
6.6.4. Polibinario A Través de 18 km de Fibra Óptica y 250 Mbps

Finalmente, se regresó a la tasa de 250[Mbps], y se mantuvo el *front-haul* en su configuración de 18[km] de longitud.

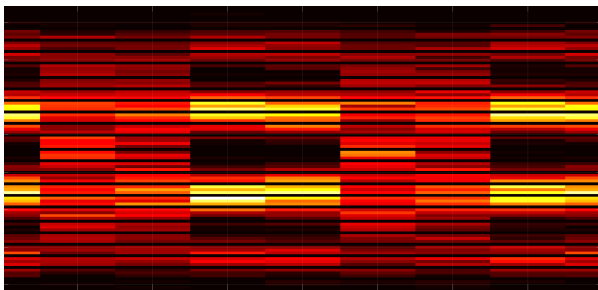
En las siguientes figuras se muestran histogramas de las muestras obtenidas de cada nivel del polibinario y de manera complementaria el diagrama de ojo que dichas muestras genera.



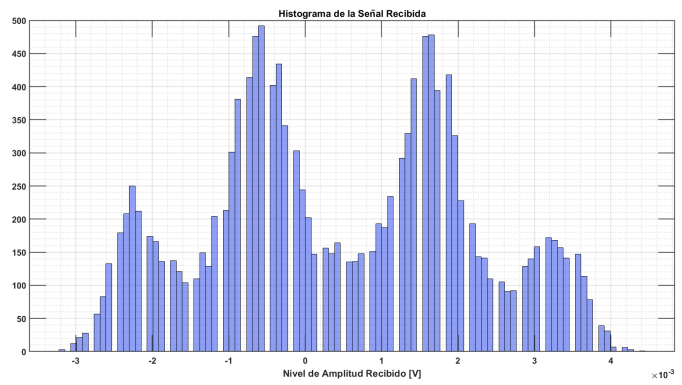
(a)



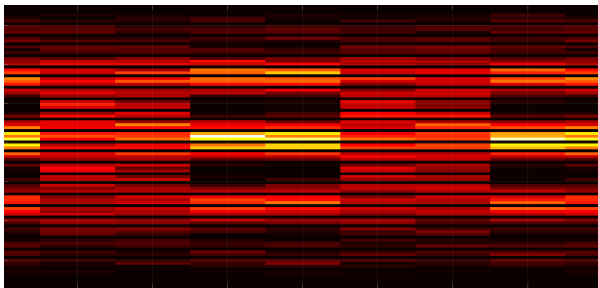
(b)



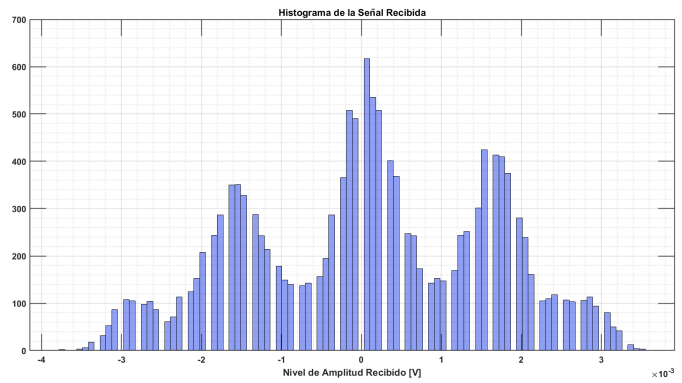
(c)



(d)

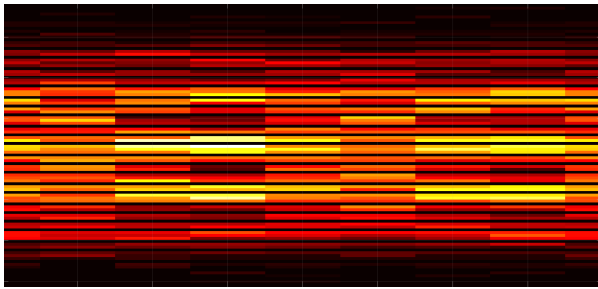


(e)

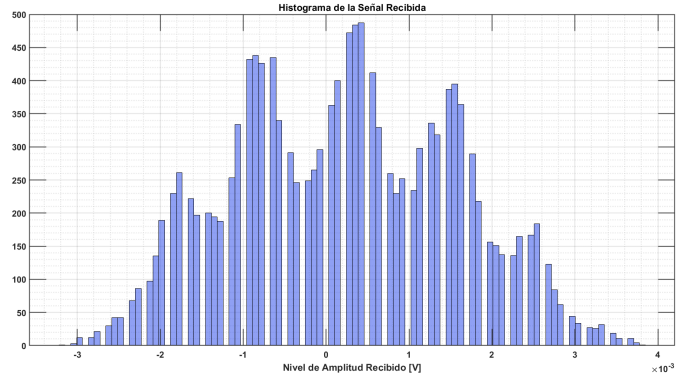


(f)

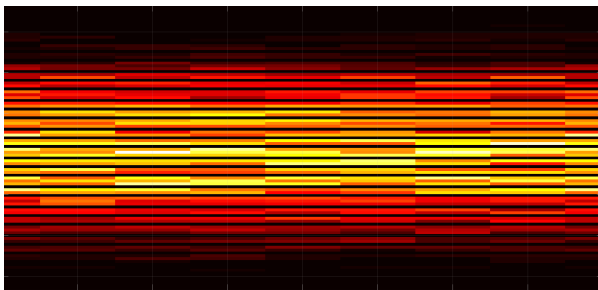
Figura 6.18: Diagramas de ojo e histogramas para los niveles 3, 4 y 5 del formato polibinario generados a partir de las muestras experimentales a 250[Mbps] cuando estas viajaron por 18[km] de fibra óptica. La escala temporal del diagrama de ojo va de 0 a $+8 \times 10^{-9}$ [s], donde caben ventanas de 4 muestras. (a) Duobinario, (b) histograma del duobinario, (c) polibinario-4, (d) histograma del polibinario-4, (e) polibinario-5, (f) histograma del polibinario-5.



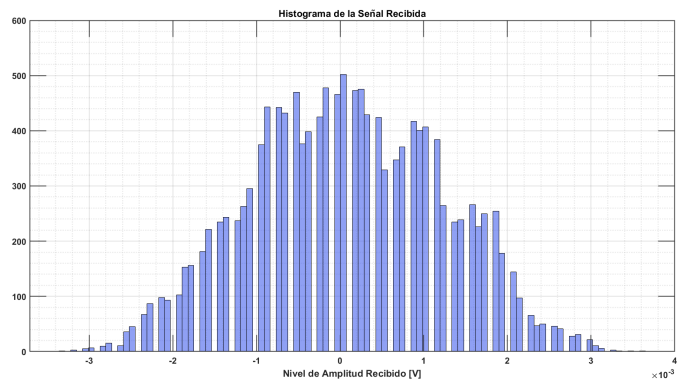
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 6.19: Continuación. Niveles 7 y 9. (g) polibinario-7, (h) histograma del polibinario-7, (i) polibinario-9, (j) histograma del polibinario-9.

Para esta ronda de experimentos se obtuvo un valor de BER igual a 0 en 3, de 0.0045 (16 errores) en 4 niveles, 0.0137 (49 errores) en 5 niveles, de 0.0452 (162 errores) en 7 niveles y de 0.1348 (483 errores) en 9 niveles. Los resultados se resumen en la Tabla 6.8. Se tienen resultados semejantes a los obtenidos en el experimento anterior. El nivel de ruido es capaz de destruir casi completamente los niveles más altos del formato polibinario. Se puede apreciar en los diagramas de ojo de las Figuras 6.18 y 6.19 que las aperturas son muy bajas en los niveles del 3, 4 y 5, mientras que para los niveles 7 y 9 son básicamente inexistentes. Los histogramas corroboran la existencia de demasiadas muestras en error. El histograma de polibinario 9 es prácticamente una campana.

Tabla 6.8: Nivel de BER para 18[km] y a 250[Mbps]

Longitud de la Fibra Óptica: 18[km]					
Tasa de Transmisión: 125[Mbps]					
Niveles del Formato Polibinario	3	4	5	7	9
Número de Errores en 3584 Bits	0	16	49	162	483
Valor de BER	0	4.4642×10^{-3}	13.6718×10^{-3}	45.2×10^{-3}	134.7656×10^{-3}

6.7. Resumen de la Eficiencia del Formato Polibinario y Conclusiones Preeliminarias

En la Tabla 6.9 se resumen los valores de BER obtenidos para cada prueba del formato polibinario, dividido por nivel, tasa de transmisión y longitud de la fibra óptica por donde se propagó la señal.

En la Tabla 6.10 se plasman algunos valores de potencia óptica tomados a la salida de ciertos puntos del sistema. Se trabajó con el formato polibinario de 9 niveles a 250[Mbps] y con el láser proveyendo una potencia continua de 10[dBm] y luego de 13[dBm]. Se reporta: la potencia a la salida del MZM, al final de la fibra óptica, las pérdidas del enlace y las pérdidas totales (enlace + MZM).

Una serie de conclusiones se pueden obtener acerca de los resultados obtenidos. Cuando se trabajó con el *front-haul* en la configuración de 18[km] se obtuvieron datos con los que se estima que el enlace genera 11[dB] de pérdidas; lo cual contrasta con la pérdida que 18[km] de SMF continua otorgarían, es decir 3.6[dB].

El enlace utilizado está lejos de ser perfecto. Una considerable cantidad de potencia óptica se pierde debido al *front-haul* y otra parte debido al modulador. A pesar de ello,

Tabla 6.9: Resumen del formato polibinario visto a través del nivel de BER.

Niveles del Formato Polibinario	Valor de BER por nivel del Formato				
	3	4	5	7	9
Longitud de la Fibra Óptica: 5 [km]	Tasa de Transmisión = 31.25[MBps]				
	0	0	0	0	0
	Tasa de Transmisión = 125[MBps]				
	0	0	0	0	0
	Tasa de Transmisión = 250[MBps]				
	0	0	0	0	0
Longitud de la Fibra Óptica: 10 [km]	Tasa de Transmisión = 125[MBps]				
	0	0	0	8.3705e-04	0.0084
	Tasa de Transmisión = 250[MBps]				
	0	0	0	5.5804e-04	0.0156
Longitud de la Fibra Óptica: 18 [km]	Tasa de Transmisión = 125[MBps]				
	0	0	0.0033	0.0377	0.1099
	Tasa de Transmisión = 250[MBps]				
	0	0.0045	0.0137	0.0452	0.1348

Tabla 6.10: Potencia óptica a la salida de ciertos puntos del sistema. Polibinario de 9 niveles a 250[Mbps]

Longitud [km]	Potencia Óptica en [dBm] a la salida del:			Pérdida por el Enlace [dB]	Pérdida Estimada Total [dB]
	Láser	MZM	Fibra Óptica		
0 (<i>Back-to-back</i>)	10	1.4 ~1.6	-	-	~8.5
10	13	4.35	-4.78	9.13	~18
18	13	4.09	-7.08	11.17	~20

la OSNR antes de llegar al fotoreceptor es buena y el diodo PIN fue capaz de recibir las señales polibinarias. Sin embargo, cuando la señal cambia del dominio óptico al dominio eléctrico existe ahora una significativa cantidad de ruido. Este exceso de ruido afecta la señal de tal forma que para ciertos niveles del formato se ve completamente distorsionada y la información no es recuperable.

Durante la totalidad de los experimentos, el formato duobinario se mantuvo impertérrito ante el ruido del receptor. Este formato de respuesta parcial posee una robustez que le permitió ser transmitido sin error sin importar tasa o longitud de fibra por la que fuera propagado. El polibinario-4 se mantuvo muy cerca de este desempeño.

Desgraciadamente los demás niveles del formato presentaron fallas, especialmente cuando se propagaron a través de los enlaces de fibra óptica de mayores longitudes. El formato polibinario de 9 niveles fue el más afectado. Presenta fallas desde los 10[km] y éstas solo aumentan al subir longitud y tasa.

6.7.1. Simulaciones vs. Resultados Experimentales

Habiendo observado el resumen de los resultados experimentales, es natural comparar lo obtenido con los resultados en las simulaciones anteriores, para así observar que diferencias hubo y dar algunas razones por las cuales se obtuvieron dichos resultados.

Por un lado se tienen el número de errores resumidos en la Tabla 6.9 y por otro se tiene que el total de errores en todas las simulaciones fue igual a 0. Inmediatamente uno puede llegar a la conclusión de que las simulaciones y los resultados experimentales contrastan demasiado. Los resultados de las simulaciones pueden resumirse en que no existió ningún error nacido de la transmisión mientras que en los resultados experimentales abundan los errores, especialmente conforme se elevan los niveles del formato polibinario y la longitud de la fibra óptica.

La principal razón de esta diferencia radica en las condiciones entre la simulación y el banco experimental físico. En las simulaciones se trabajó con enlaces de fibra óptica

puros y el cambio del dominio óptico al eléctrico se realizó sin algún esquema generador de ruido. Esta característica no es un error, pues se configuró de esa forma con el objetivo de observar si la dispersión afectaría gravemente el enlace, sin considerar otros factores. En las simulaciones lo que se obtuvo fue que la dispersión no es un elemento nocivo para el formato polibinario. Por otra parte, el banco experimental es un sistema no ideal, con pérdidas a lo largo del sistema, y con una transformación óptica a eléctrica muy ruidosa lo que ocasionó una SNR muy baja. Todos estos factores no fueron simulados.

Lo que puede concluirse al contrastar las simulaciones vs. los resultados reales es que la dispersión no es un factor decisivo en contra del formato polibinario a las tasas en las que se trabajó. El verdadero enemigo de la modulación polibinaria es el nivel de ruido eléctrico presente en el receptor óptico y el nivel de potencia de la señal, pues esta llega sumamente atenuada debido a las pérdidas. Esto explica porqué en los experimentos realizados se generaron una cantidad significativa de errores, pues se trató de un sistema de fibra donde la dispersión realmente no afecta tanto y con una recepción ruidosa. Todo lo anterior contrasta con las simulaciones donde solo se analizaba el comportamiento contra la dispersión.

El *front-haul* utilizado en las últimas etapas experimentales es un sistema alto en pérdidas. Si aunamos esto a la potencia baja a la salida del modulador, se genera un sistema en el que rápidamente el nivel de ruido en el receptor (que siempre es el mismo) comienza a dominar por encima de la potencia de la señal polibinaria, la cual disminuye para enlaces más largos.

Estos factores afectan especialmente los niveles más altos del formato, es decir aproximadamente a partir polibinario-5. La amplitud total de un pulso polibinario es la misma para cualquier nivel de complejidad, es decir mide lo mismo en amplitud una cadena duobinaria que una cadena en formato polibinario-9. Conforme aumentamos la complejidad del formato, la diferencia en amplitud (voltaje o potencia óptica) entre un escalón de la señal y otro va disminuyendo. Por ejemplo, la amplitud total de la cadena duobinaria está dividida en tres regiones donde podemos diferenciar tres diferentes niveles de amplitud (ni-

vel 0, 1 y 2). Sin embargo la misma exacta amplitud total se ve dividida en nueve regiones para el polibinario-9 (niveles del 0 al 8). Esto significa que la diferencia de amplitud entre un nivel y otro disminuye conforme subimos en complejidad, lo cual lo vuelve el enemigo perfecto de una baja SNR. Y encima de eso, para los formatos de más complejidad, la amplitud entre los niveles se vuelve dispareja, debido a la forma intrínseca de la función de transferencia del modulador, la cual no puede separar de manera equidistante las regiones del polibinario. Esto causa que la baja SNR afecte especialmente a las regiones más alejadas.

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajo a Futuro

Este trabajo de tesis está conformado por trabajo experimental y simulaciones utilizando el formato de modulación polibinaria como objeto de estudio principal cuando se envía a través de fibra óptica y es construido a través de un modulador de amplitud Mach-Zehnder. De manera particular:

- Se construyó un banco experimental conformado principalmente por un modulador Mach-Zehnder, un láser a 1550[nm], un generador de funciones arbitrarias, un osciloscopio, un receptor óptico, una computadora personal, entre otros elementos.
- Se realizaron una serie de simulaciones donde se puso a prueba el comportamiento del formato polibinario en contra de la dispersión que genera la fibra óptica. En estas simulaciones se combinaron distintas longitudes de fibra óptica, tasas de transmisión y niveles del formato polibinario. El resultado general de todas estas simulaciones es que la dispersión no es un factor que afecte el comportamiento del formato, al menos a las tasas con que se trabajó en este análisis.
- Utilizando el banco experimental se observó el desempeño, medido en el nivel de BER, del formato polibinario a través de una serie de pruebas donde se combinaron tres parámetros principales: longitud de la fibra óptica, tasa de transmisión y nivel del formato polibinario.

A través del trabajo experimental con el formato se encontraron una serie de comportamientos interesantes; los cuales nos permitieron entender mejor las ventajas y desventajas del formato polibinario.

- Se demostró que la señal polibinaria puede construirse utilizando un modulador de amplitud basado en el interferómetro Mach-Zehnder para haces láser y un generador de funciones arbitrarias como fuente de la señal moduladora.
- Se probó que es posible construir una cadena polibinaria desde 3 y hasta 9 niveles.
- También se demostró que es posible enviar estas señales a través de distintas longitudes de fibra óptica y que sean demoduladas con un cierto nivel de éxito.
- Se corroboró que el generador de señales arbitrarias utilizado para crear el mensaje polibinario no puede alcanzar tasas superiores sin sacrificar muestras para generar una señal, lo cual viene de su característica inherente de frecuencia de muestreo fija a $S_f = 1[Gsample/s]$. Con ello la máxima tasa alcanzable fue de a penas un cuarto de gigabyte, lo cual es sumamente bajo en términos de transmisión óptica. Para poner en contexto, recordemos que el modulador Mach-Zehnder utilizado en este trabajo tiene un ancho de banda de 20[GHz], es decir puede manejar una tasa de 0.25[Gbps] sin mayor problema.
- Se observó, a través de la simulaciones, que la dispersión no es un factor que afecte severamente la transmisión del formato polibinario.
- Se observó que el principal factor que afecta al formato polibinario no se encuentra en el dominio óptico, si no en la transformación al dominio eléctrico. El ruido que se observa en el receptor óptico al momento de la transformación distorsiona la señal polibinaria. El ruido presente en el receptor se mantiene constante, y afecta mucho más a las señales que llegan con más atenuación, es decir las que viajaron por una mayor cantidad de fibra óptica.
- Se observó que una baja SNR en la recepción afecta especialmente a las cadenas polibinarias de mayor complejidad, es decir las del polibinario-5, -7 y especialmente

al polibinario-9; lo cual es debido a que el aumento de complejidad no significa un aumento en la amplitud total de la señal. Esto a su vez significa que la amplitud entre cada escalón del formato disminuye conforme aumenta el nivel del formato. Una baja SNR afecta especialmente estos escalones por que a pesar de que el nivel del ruido se mantenga constante, desde el punto de vista de los niveles de la señal, aumenta más conforme disminuye la amplitud entre niveles.

Es posible observar virtudes aún no exploradas del formato polibinario. Como trabajo a futuro se propone llevar el formato polibinario de un esquema de creación experimental a un esquema industrial, específicamente hablando del sistema electrónico utilizado para generar la cadena polibinaria. En este trabajo de investigación se generaron señales polibinarias a partir del software de análisis numérico MATLAB conectado a un generador de señales arbitrarias de bajo ancho espectral. Tal equipo no es el utilizado en la industria de las comunicaciones ópticas para generar señales. Por tanto se propone la implementación de la señal polibinaria a través de equipo que realmente se utilice en redes ópticas reales. Esto permitiría observar como se comporta el formato cuando se trabaja a las velocidades de transmisión que se utilizan en la industria. Recordando también que el formato polibinario no es un esquema de modulación de alta complejidad, por tanto equipo diseñado para la creación de pulsos NRZ debe ser capaz de generar la señal polibinaria.

Códigos

Para la realización de este trabajo de tesis se crearon una multitud de programas con diversos propósitos: simular, controlar el MZM, demodular, etc.

En esta sección se muestran algunas porciones de ciertos códigos utilizados en este trabajo de tesis.

Programa de Control

A continuación se muestra una porción del código utilizado para controlar el MZM (*driving signal*) cuando se busca generar una señal duobinaria. La salida de este programa es el vector llamado **FilteredSignal** el cual es enviado al AFG através de otro programa dedicado a la conexión PC-AFG.

```
1
2 BitRate = (31.25e6)*1;    % 31.25 Mb/s
3 NBits = 2^12;
4 SamplesPerBit = 32/8;    % Sobremuestreo
5 BitsPerSymbol = 1;
6 RiseFallTimePerCent = 25;
7
8 %% Calculo de parametros basicos de simulacion
9
10 NSamples = NBits*SamplesPerBit;
11 TimeWindow = NBits/BitRate;
12 SampleRate = SamplesPerBit * BitRate;
13 SamplePeriod =1/SampleRate;
14 SampleFreqPeriod = 1/(NSamples*SamplePeriod);
```

```

15 NBS = BitsPerSymbol;
16 NSymbols = ceil(NBits/NBS);
17 NBitsCeil = NSymbols*NBS;
18 BaudRate = BitRate/(NBS);
19 SamplesPerSymbol = NBS*SamplesPerBit;
20 TimeVec = (1:NSamples)'*SamplePeriod;
21
22 %% Generacion de Bits
23 rng(7); % Cualquier semilla sirve
24 Bits = randi([0 1],1,NBitsCeil-2^(log2(NBits)-3));
25
26 % Encabezado de ceros
27 ceros = zeros(1,2^(log2(NBits)-3));
28 Bits = cat(2,ceros,Bits);
29 b = zeros(1,length(Bits)+1); % Inicializa el vector b en ceros
30
31 % Precodificacion. Derecha a izquierda.
32 % XOR entre el ultimo bit de b con el ultimo de a.
33 for i = length(Bits):-1:1
34     b(i) = mod(Bits(i)+b(i+1),2);
35 end
36
37 for i = 1:1:length(Bits) % Polibinario.
38     c(i) = b(i)+b(i+1); % Suma del bit con el bit anterior.
39 end
40
41 %% Generacion del vector electrico polibinaria para un sobremuestreo
    dado
42
43 ElecSignal = ones(NSymbols*SamplesPerSymbol,1);
44 for kk = 1:NSymbols
45     LimInf = 1+SamplesPerSymbol*(kk-1);
46     LimSup = SamplesPerSymbol*kk;
47     ElecSignal(LimInf:LimSup)= c(kk)*aux;
48 end
49 FilteredSignal=GaussianRTAdjuster(SamplePeriod,ElecSignal,

```

```

50 (0.01*RiseFallTimePerCent/BaudRate));
51 % Suavizado a traves de filtrado de Gauss
52 FilteredSignal = FilteredSignal(1:NSamples,1);
53
54 % Configuramos que el vector este entre -1 y 1, y no entre 0 y 1
55 FilteredSignal = 2*(FilteredSignal-0.5);

```

Programa de Demodulación

A continuación se muestra una porción del código utilizado para demodular el vector de muestras obtenido del osciloscopio. Este es exclusivo para el formato duobinario.

```

1
2 %% Obtencion de los datos obtenidos de la USB
3
4 M = readmatrix();
5
6 SampleIndex = M(:,1);
7 ReceivedSignal = M(:,2);
8
9 %% Seccion de demodulacion
10
11 % Normalizacion. De entre maximo y manimo a entre 1 y 0
12 % Vector recibido
13 ReceivedSignal_norm = (ReceivedSignal-min(ReceivedSignal))
14 /(max(ReceivedSignal)-min(ReceivedSignal));
15 % Vector enviado (original)
16 FilteredSignal_norm = (FilteredSignal-min(FilteredSignal))
17 /(max(FilteredSignal)-min(FilteredSignal));
18 FilteredSignal_norm_noHeader =
19 FilteredSignal_norm(SamplesPerBit*(2^(log2(NBits)-3))+1:end);
20
21 % Inicializa el vector b en ceros
22 % Slicer. Dos umbrales, tres regiones
23 for i = length(ReceivedSignal_norm):-1:1
24     if ReceivedSignal_norm(i) <= 0.3
25         Demod(i) = 0;

```



```
26     elseif ReceivedSignal_norm(i) >0.3 && ReceivedSignal_norm(i) <= 0.7
27         Demod(i) = 1;
28     elseif ReceivedSignal_norm(i) > 0.7
29         Demod(i) = 2;
30     end
31 end
32
33 % Hallando el inicio de la cadena.
34
35 % Encontrando la correlacion cruzada
36 [c,lags] = xcorr(ReceivedSignal_norm,FilteredSignal_norm_noHeader);
37
38 % Indice del punto de correlacion maxima
39 Inicio = find(c==max(c))-1e6;
40
41 % Alocando
42 Extract = zeros(1,length(NSamples));
43
44 % Extraccion de un solo ciclo
45 j=1;
46 for i = Inicio-SamplesPerBit*(2^(log2(NBits)-3))+1:1:
47 Inicio-512*SamplesPerBit+NSamples
48     Extract(j) = Demod(i);
49     j=j+1;
50 end
51
52 % Muestreo, una muestra por bit, es decir una cada SamplesPerBit,
53 % a la mitad, osea SamplesPerBit/2
54 for i = length(Extract):-1:1
55     if rem(i,SamplesPerBit)==0
56         Sampled(i/SamplesPerBit) = Extract(i-SamplesPerBit/2);
57     end
58 end
59
60
61
```

```
62 % Proceso de Demodulacion
63 signal=Sampled;
64 for i = 1:1:length(Sampled)
65     signal(i) = mod(Sampled(i),2); % Residuo modulo 2.
66 end
67
68 %% Retirando encabezado y calculos de BER
69
70 % Cadena de bits originales, sin encabezado
71 Bits_noHeader = Bits(2^(log2(NBits)-3)+1:end);
72
73 % Cadena de bits demodulados, sin encabezado
74 signal_noHeader = signal(2^(log2(NBits)-3)+1:end);
75
76 % Comparacion. Si el vector a y el demodulado son iguales
77 % (sin errores) al restarse uno con otro, se tendra un vector de ceros
78 for i = length(Bits_noHeader):-1:1
79     prueba(i) = Bits_noHeader(i)-signal_noHeader(i);
80 end
81
82 % Valor de BER
83 [number,ratio] = biterr(signal_noHeader,Bits_noHeader)
```

Referencias

- [1] Cisco annual internet report - cisco annual internet report (2018–2023) white paper, Mar 2020.
- [2] Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, 6 edition, 2019.
- [3] Govind P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems*. Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Wiley, 5 edition, 2021.
- [4] Asem Aji, Katarína Sabo, and Priyanka Priyadarshini. External optical modulator (eom), 05 2017.
- [5] Pabitra Kumar Ray Bernard Sklar. *Digital Communications. Fundamentals and Applications*. Pearson, 2 edition, 2014.
- [6] Sai Chen, Chongjin Xie, and Jie Zhang. Advanced detection of super-nyquist wdm qpsk signals with 5-bit/s/hz spectral efficiency. In *2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pages 1–3, 2015.
- [7] Julian Gamboa González. Design and characterization of a high capacity optical link using direct detection orthogonal frequency division multiplexing. Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico Y De Estudios Superiores De Monterrey, Calle Puente 222, Coapa, Arboledas del Sur, Tlalpan, 14380, Ciudad de México, 2017.
- [8] Ramón Gutiérrez Castrejón. Informe técnico de la implementación y funcionamiento del enlace de fibra óptica con tecnología wdm operando correctamente. Technical Report Convenio SECTEI/200/2019 y CM-SECTEI/285/2020, Instituto de Ingeniería, Ciudad de México, México, 2021.

- [9] Koji Igarashi, Takehiro Tsuritani, and Itsuro Morita. Experimental study on polybinary-pulse-shaped qam signals for highly-spectral-efficient super-nyquist-wdm systems. In *2015 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, pages 1–3, 2015.
- [10] Koji Igarashi, Takehiro Tsuritani, and Itsuro Morita. Polybinary shaping for highly-spectral-efficient super-nyquist wdm qam signals. *Journal of Lightwave Technology*, 34(8):1724–1731, 2016.
- [11] Adam Lender. The duobinary technique for high-speed data transmission. *IEEE Transactions on Communication and Electronics*, 82(2):214–218, 1963.
- [12] Adam Lender. The duobinary technique for high-speed data transmission. *IEEE Transactions on Communication and Electronics*, 82(2):214–218, 1963.
- [13] López-Higuera; José Miguel(eds.). *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*. John Wiley Sons, 2002.
- [14] Rafael Monzón. Impacto del ancho de banda optoelectrónico en un sistema de comunicaciones Ópticas con base en modulación polibinaria. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Av Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, 2020.
- [15] Denis Penninckx, L. Pierre, J.-P Thiery, Bertrand Clesca, M. Chbat, and J.L. Beylat. Relation between spectrum bandwidth and the effects of chromatic dispersion in optical transmissions. *Electronics Letters*, 32:1023 – 1024, 06 1996.
- [16] Kunimasa Saitoh. Multicore fiber technology. In *2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2015.
- [17] Matthias Seimetz. *High-order modulation for optical fiber transmission*. Springer Series in Optical Sciences 143. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1 edition, 2009.
- [18] M. Jamal Deen Shiva Kumar. *Fiber Optic Communications: Fundamentals and Applications*. Wiley, 2014.

- [19] L.F. Suhr, J.J. Vegas Olmos, C. Peucheret, and I. Tafur Monroy. Direct modulation and detection link using polybinary signaling. In *2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology*, pages 950–951, 2014.
- [20] ThorLabs. Lithium niobate electro-optic modulators, fiber-coupled. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3918.
- [21] Siddharth Varughese, Justin Lavrencik, Johan S. Gustavsson, Erik Haglund, Anders Larsson, and Stephen E. Ralph. Polybinary coding for low complexity high speed error-free vcsel-mmf links. In *2017 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, pages 1–3, 2017.
- [22] S. Walklin and J. Conradi. Multilevel signaling for increasing the reach of 10 gb/s lightwave systems. *Journal of Lightwave Technology*, 17(11):2235–2248, 1999.
- [23] Shuai Yuan, Koji Igarashi, Takehiro Tsuritani, and Itsuro Morita. Bit-error ratio performance improvement using iterative decoding for polybinary-shaped super-nyquist wavelength division multiplexed signals. *Journal of Lightwave Technology*, 35(21):4605–4612, 2017.