Análisis y diseño de un sistema centralizado de fuentes ópticas para la transmisión y recepción en red de acceso para soporte a 5G



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Manuel Romero Peña, Richar Javier Chia Jiménez

Director: Gustavo Adolfo Puerto Leguizamón

Facultad de Ingeniería
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Tesis para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Universidad Distrital Octubre 2019

"Nuestro sentido de lo maravilloso aumenta exponencialmente; cuanto mayor es el conocimiento y más profundo el misterio, más intentamos conocer y mayores enigmas acabamos por crear"

E. O. Wilson

Agradecimientos

Quiero agradecer principalmente a mis padres Luis Chia y Olga Jiménez, quienes con su apoyo y esfuerzo han sido participes de este largo proceso académico que alguna vez fue un sueño y ahora se convierte en una realidad, sin ellos todo esto habría sido muy difícil de lograr. Sinceramente no alcanzan las palabras en el papel para expresarles todos mis agradecimientos. Agradezco a mi hermana Zuly, quien siempre me dio ánimos en los momentos más difíciles, a mi sobrina Ximena quien ha sido una motivación constante con su alegría, y a la señora Ana Peña por ser una mujer muy atenta y carismática, quien siempre ha abierto las puertas de su hogar sin que falte la comida ni el calor necesario, para que junto con mi compañero Manuel Romero, lográramos llegar hasta este punto de nuestras vidas.

Richar Javier Chía Jiménez.

A las mujeres de mi hogar Ana Peña y Diana Acosta, quienes han creído en mi y he recibido todo su apoyo para lograr mis sueños y metas, me han acompañado en todo mi proceso de desarrollo como persona y mi vida académica ya que sin ellas no sería la persona que soy. A Richar Chía, mi amigo con el cual me he enfrentado a la mayoría de retos en mi vida universitaria y con quien he tenido el honor de compartir la mesa de mi hogar, por último a Emily Lopéz que ha pesar del poco tiempo de conocerla, ha representado una fuerza de impulso para culminar este capitulo de mi vida.

Manuel Romero Peña.

De forma conjunta, agradecemos a cada uno de nuestros docentes quienes muchas veces estuvieron atentos a nuestro proceso y nos facilitaron herramientas necesarias, igualmente agradecemos a nuestros compañeros, que estuvieron siempre presentes alegrando el día a día, con quienes trabajamos arduamente en cada proyecto y pasamos muchas noches en vela, superando cada reto y adversidad que se nos cruzó en nuestro camino. Finalmente, agradecemos al Ingeniero Gustavo Puerto, quien con sus conocimientos, paciencia y disposición, nos guió en el camino del conocimiento para desarrollar este trabajo de grado.

Índice general

Índice de figuras IX

Índice de tablas XIII

Nomenclatura XV

1. Generalidades **1**
1.1. Planteamiento del Problema 1
1.2. Justificación del Problema 2
1.2.1. Justificación Investigativa 2
1.2.2. Justificación Económica 2
1.2.3. Justificación Social 3
1.2.4. Justificación Ambiental 4
1.2.5. Justificación Personal 4
1.3. Objetivos 4
1.3.1. Objetivo General 4
1.3.2. Objetivos Específicos 4

2. Marco Teórico **5**
2.1. Desarrollo 5
2.1.1. Latencia 5
2.1.2. BER 5
2.1.3. Diagrama de ojo 6
2.1.4. Cálculo de BER y factor Q a partir de diagrama de ojo 9
2.1.5. 5G 10
2.2. Teoría de fibra óptica 12
2.2.1. Sistemas de comunicaciones ópticas 12
2.2.2. El espectro Electromagnético 13
2.2.3. Componentes de un sistema de comunicaciones con fibra óptica 14

2.2.4. Propagación en la fibra Óptica 19
2.2.5. Polarización de la luz 20
2.3. Modulación electro-óptica 22
2.3.1. Moduladores electro-ópticos 24

3. Estado del arte **29**
3.1. Volterra basado en una compensación no lineal sobre un enlace de fibra óptica 224 Gb/s PolMux-16QAM 29
3.2. Rendimiento de transmisión de la señal POLMUX QPSK de 112 Gb/s en el sistema WDM OOK/DPSK 31
3.3. Transmisión de doble portadora a 448 Gb/s con POLMUX-16QAM a más de 1230 km con pasos entre redes ROADM 34
3.4. Análisis y diseño de un sistema de centralización de fuentes ópticas . . 35

4. Desarrollo **39**
4.1. Componentes de simulación de la Red 39
4.1.1. Diodo emisor láser 39
4.1.2. Divisor de potencia o Splitter 41
4.1.3. Divisor de polarización 44
4.1.4. Generador de números aleatorios 44
4.1.5. Generador de pulsos NZR 45
4.1.6. Modulador FM 45
4.1.7. Filtro 46
4.1.8. Combinador de polarización 46
4.1.9. Combinador de potencia 46
4.1.10. Fibra óptica monomodo 46
4.1.11. Diodo fotodetector 47
4.1.12. Regenerador de información y analizador de BER 47
4.2. Simulación 48
4.2.1. Consideraciones para la simulación 48
4.2.2. Transmisión y recepción de la señal de bajada 49
4.2.3. Análisis de resultados para sistema con 1 ONU 61
4.2.4. Sistema con soporte para múltiples ONU's 65
4.2.5. Análisis de resultados de un sistema con 8 ONU 66
4.2.6. Análisis de resultados para sistemas con múltiples ONU's y amplificador de 28 dBm 74

5. Conclusiones **79**

Bibliografía **81**

A. Cosimulación **83**

A.1. Función para adquirir resultados de analizador de diagrama de ojo en OptiSystem 83

A.2. Algoritmo de detección para ángulos y distancias validas del sistema . . 85

A.3. Algoritmo de detección para número de ONU'S del sistema 88

A.4. Sistema utilizado para simulación cooperativa MatLab y Optysistem . . 92

Índice de figuras

1.1. Comportamiento de suscriptores a internet fijo dedicado y móvil 3
1.2. Comportamiento de suscriptores a internet móvil por generación móvil. 3

2.1. Concepto sobre el diagrama de ojo 7
2.2. Parámetros que constituyen un pulso en un patrón de ojo 8
2.3. Parámetros fundamentales del ojo 8
2.4. Concepto de máscara de diagrama de ojo 9
2.5. Efecto del Jitter en diagrama de ojo 10
2.6. Velocidades de generaciones de redes. 11
2.7. Servicios que se brindan en las actuales redes y 5G. 11
2.8. Espectro de frecuencias electromagnéticas 13
2.9. Enlace simplificado de comunicaciones con fibra óptica 15
2.10. Tipos de fibra óptica 16
2.11. Estructura física de una fibra óptica 18
2.12. Polarización de la luz 20
2.13. Estructura básica del funcionamiento de un modulador óptico de fase . 26
2.14. Geometría de un dispositivo MZ-EOM 26
2.15. Esquema de un modulador de amplitud Mach-Zehnder 27

3.1. Configuración de enlace para 224 Gb / s PolMux-16QAM más de 250 km ULAF 30
3.2. Resultados de la serie de volterra basado en una compensación no lineal sobre un enlace de fibra óptica 31
3.3. Espectro óptico de 112 Gb / s POLMUX QPSK y dos canales OOK de copropagación después de la multiplexación 33
3.4. Diagrama de constelación para canales OOK y DPSK 33
3.5. Magnitud del vector de error para canales DPSK y OOK 34

4.1. Diodo Láser 39

4.2. Curva de atenuación de una fibra óptica debida a absorción y dispersión. 41
4.3. Perdidas por división de potencia 42
4.4. Característica interna de un Splitter tipo FBT (splitter 1:4) 42
4.5. Estructura Interna de un splitter PLC 43
4.6. Divisor de potencia. 44
4.7. Divisor de polarización. 44
4.8. Generador de números aleatorios. 45
4.9. NZR. 45
4.10. Modulador FM. 45
4.11. Filtro Gaussiano. 46
4.12. Combinador de polarización. 46
4.13. Combinador de potencia. 47
4.14. Fibra óptica monomodo. 47
4.15. Fotodetector. 47
4.16. Regenerador de información. 48
4.17. Analizador de BER. 48
4.18. Transmisión desde 1 OLT a 1 ONU. 50
4.19. Señal Portadora generada por el láser 51
4.20. Polarización de la señal portadora en dos componentes ortogonales, transversal eléctrica TE (flecha roja) y transversal magnética TM (flecha azul). 51
4.21. Señal Pseudoaletoria (flecha azul) y su modulación en fm con portadora óptica (flecha roja). 52
4.22. Modulación antes (flecha roja) y después de aplicar filtro pasa banda bessel (flecha azul). 52
4.23. Combinación de polarización de las 2 componentes ortogonales (flecha verde), componente TM (flecha roja) y TE (flecha azul). 53
4.24. Combinación en potencia de los dos procesos de modulación. 54
4.25. Separación de las componentes TM (flecha roja) y TE (flecha azul) de la señal después de recorrer la linea de transmisión. 54
4.26. Demultiplexación de la componente transversal magnética en la señal del servicio 1 (flecha roja) y servicio 2 (flecha azul). 55
4.27. Comparación de la señal recibida y la señal transmitida 56
4.28. Diagrama de ojo para las señales A y B de bajada 56
4.29. Portadora polarizada y señales A, B de subida 57

4.30. Diagrama general de Transmisión y Recepción para A, B de bajada y de subida para 1 OLT y 1 ONU 58
4.31. A, B antes de ser lanzada por la fibra óptica vs A, B en el otro extremo de la linea de transmisión 59
4.32. Demultiplexión de A y B dentro de la OLT 59
4.33. Comparación de la señal Pseudoaleatorio generada en la ONU vs la recibida en la OLT 60
4.34. Diagrama de ojo de las señales A, B vista en la OLT 60
4.35. Factor Q en receptores de la ONU y OLT con filtros eléctricos de orden 1 y 3 61
4.36. BER en receptores de la ONU y OLT con filtros eléctricos de orden 1 y 3 62
4.37. Factor Q y BER en receptores 1 y 2 de la ONU con filtro de orden 1 . . 63
4.38. Diagramas de ojo para sistema a 28 km y 26° en el divisor de polarización 64
4.39. Factor Q y BER en receptores OLT 1 y 2 con filtro de orden 1 65
4.40. Apertura de ojo y umbral en receptores ONU 1 y 2 con filtro de orden 1 65
4.41. Apertura de ojo y umbral en receptores OLT 1 y 2 con filtro de orden 1 66
4.42. 1 OLT con 8 ONU 67
4.43. Bloque ONU 68
4.44. Diagrama interno de un bloque ONU 68
4.45. Factor Q de ojo y BER en los receptores 1 y 2 de una ONU, en sistema con 8 ONU's 70
4.46. Factor Q de ojo y BER en los receptores 1 y 2 de la OLT, en sistema con 8 ONU's 70
4.47. Apertura de ojo y umbral en los receptores 1 y 2 de una ONU, en sistema con 8 ONU's 71
4.48. Apertura de ojo y umbral en los receptores 1 y 2 de la OLT, en sistema con 8 ONU's 71
4.49. Diagramas de ojo para sistema con 8 ONU's a 28 km y 26° en el divisor de polarización 72
4.50. Rangos de ángulos del divisor de polarización sin amplificador con BER$<1\times10^{-9}$ 73
4.51. Rangos de ángulos del divisor de polarización sin amplificador con BER$<1\times10^{-7}$ 74
4.52. Rangos de ángulos del divisor de polarización con amplificador 77

A.1. Sistema en OptiSystem para simulación cooperativa 92

Índice de tablas

4.1. Longitudes de onda y potencias para láseres comerciales 40
4.2. Datos en receptores ONU 1-2 y OLT 1-2 de 27 km a 30 km 63
4.3. Datos en receptores ONU 1-2 y OLT 1-2 de 27 km a 30 km, sistema de 8 ONU's 68
4.4. Presupuesto de potencia de bajada para sistemas de 1 y 8 ONU´s a 28 km y 26° en el divisor de polarización 69
4.5. Presupuesto de potencia de subida para sistemas de 1 y 8 ONU´s a 28 km y 26° en el divisor de polarización 73
4.6. Número de ONU's por ángulo y distancia sin amplificador con BER$<1 \times 10^{-9}$ 74
4.7. Número de ONU's por ángulo y distancia sin amplificador con $BER < 1 \times 10^{-7}$ 75
4.8. Número de ONU's por ángulo y distancia con con $BER < 1 \times 10^{-9}$ y amplificador de 28 dB. 76
4.9. Número máximo de ONU's por kilometro en sistema con amplificador y $BER < 1 \times 10^{-7}$ 78

Nomenclatura

Acrónimos / Abreviaciones

BER Tasa de error de bit

CD Dispersión cromática

CMA Algoritmo de coeficiente constante

DBP Propagación posterior digital

DGO Distribuidor óptico general

DWDM Multiplexación densa por división de longitud de onda

EVM Magnitud del vector de error

FBT Cono bicónico fundido

FFT Transformada rápida de Fourier

HSPA Acceso a paquetes de alta velocidad

HSPA+ Acceso a paquetes de alta velocidad evolucionado

IoT Internet de las cosas

MINTIC Ministerio de tecnologías de la información y comunicaciones de Colombia

OLT Equipo de transmisión óptica

TE Transversal eléctrica

TM Transversal magnética

ONU Unidad de red óptica

OOK Modulación digital de amplitud

PBC Combinador de haz de polarización

PBS Divisor de haz de polarización

PLC Circuito de onda de luz plana

PMD Dispersión del modo de polarización

POLMUX Multiplexación por Polarización de Onda

QAM Modulación de amplitud en cuadratura

QPSK Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura

VSTF Función de Transferencia de la Serie Volterra

W-DBP Propagación posterior digital ponderada

WDM Multiplexación por división de longitud de onda

XPM Modulación de fase cruzada

XpolM Modulación de polarización cruzada

Capítulo 1

Generalidades

1.1. Planteamiento del Problema

Actualmente muchos de los servicios como internet, televisión y telefonía móvil, dentro de las cuales se encuentran tecnologías como 2G, 3G, HSPA, HSPA+ , 4G, 4G LTE, entre otras, han generado problemas de descentralización en las infraestructuras, mantenimiento y eficiencia en la prestación de dichos servicios [1]. Dicha descentralización consta que por cada tecnología existe una red de soporte no compatible con las demás, lo que lleva a pensar en la necesidad de optimizar todo este tipo de tecnologías mediante convergencia de las mismas en una red de acceso, la cual deberá soportar grandes cantidades de información con baja latencia y transportarlas a sus puntos de destino [1].

Para lograr centralizar este grupo de tecnologías, se pretende implementar una red acceso que contará con tres secciones fundamentales, equipo de transmisión óptica (OLT), distribuidor óptico general (DGO) y unidad de red óptica (ONU); donde el OLT y ONU´s contarán principalmente con fuentes ópticas láser, PBS's (Divisor de haz de polarización) , PBC's (Combinador de haz de polarización) y moduladores electro-ópticos [2]; este último se encargará de recibir la información de RF y convertirla al dominio óptico adoptando las características de la fuente láser, para poder ser enviada a través de una línea de transmisión óptica compartida entre los canales, de bajada con polarización transversal magnética(TM) y de subida con polarización transversal eléctrica (TE) [3].

Todo esto lleva a preguntar si ¿es posible implementar una red de acceso que permita la convergencia de todas estas tecnologías pasadas y en crecimiento como lo es IoT, mediante la combinación de técnicas de centralización y conversión electro óptica?

1.2. Justificación del Problema

1.2.1. Justificación Investigativa

La propuesta de converger las diferentes tecnologías de redes móviles y tratar grandes cantidades de información a través de redes ópticas, haciendo investigación sobre técnicas modernas como POLMUX (Multiplexación por Polarización de Onda), y modulación electro óptica, pretende mejorar la calidad del servicio solucionando problemas como el transporte de altas tasas de información por segundo, ancho de banda, tasa de error de Bit BER (Bit Error Rate) , latencia, y de esta manera poder establecer bases para dar soporte a las nuevas tecnologías como lo es 5G [4].

1.2.2. Justificación Económica

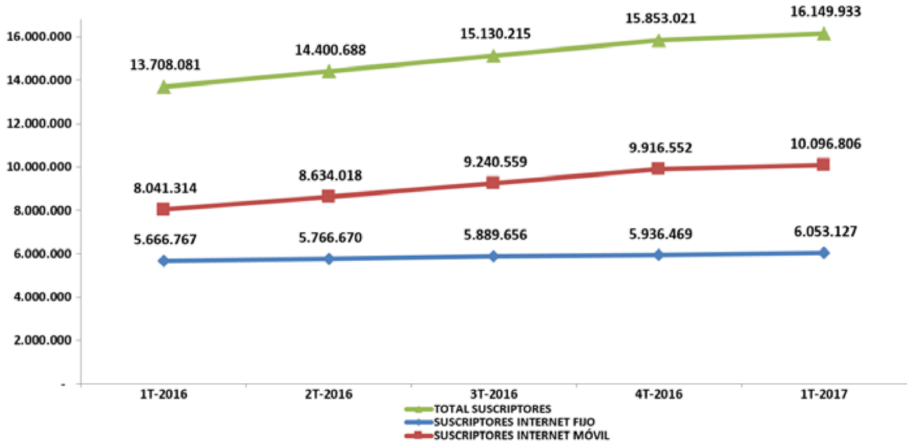
El mercado minorista de consumo está aumentando el IoT incluso más rápido que el sector industrial, con tendencias como los dispositivos domésticos inteligentes y los servicios que los monitorean y responden, servicios de transmisión y entretenimiento bajo demanda y por supuesto, el enorme y constante crecimiento de internet, aplicaciones y sector de servicios.

A medida que la red se vuelve más ocupada y la infraestructura de red se vuelve menos capaz de lidiar con el tráfico, la latencia aumenta.

Debido a lo anterior, se debe hacer modificaciones en la red e infraestructura para poder aumentar las capacidades de transmisión de información en los sistemas comerciales actuales, y su compatibilidad con las tecnologías emergentes.

En la siguientes gráficas 1.1 y 1.2, se puede observar cómo toman fuerza las telecomunicaciones móviles sobre las redes de acceso fijo, según el ministerio de tecnologías de la información y comunicaciones de Colombia (MINTIC).

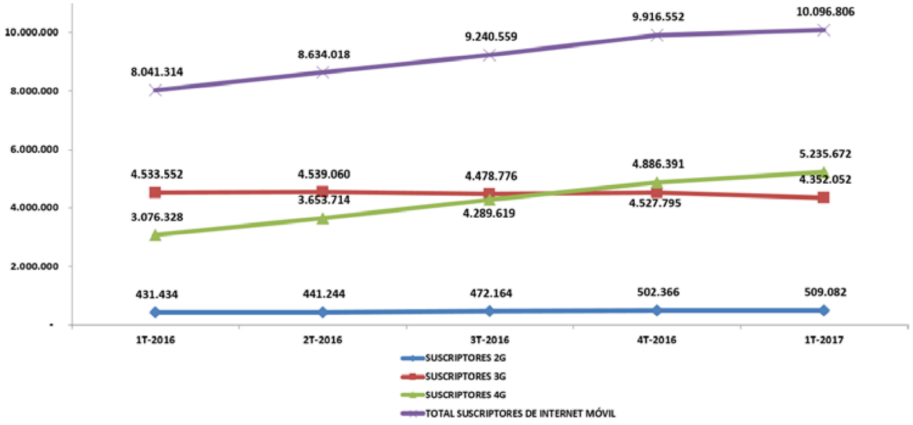
Evidenciando la evolución desde el primer trimestre del año 2016, hasta el primer trimestre del año 2017, también es preciso mencionar como a evolucionado el mercado en cuanto a las suscripciones de internet móvil por generación móvil figura 1.2, donde se aprecia cómo las nuevas tecnologías van teniendo mayor acogida que sus predecesoras,



Fuente: Datos reportados por los Proveedores de Redes y Servicios a Colombia TIC.
Fecha de consulta: 14 de julio del 2017.

Figura 1.1 Comportamiento de suscriptores a internet fijo dedicado y móvil [5].

y esto se debe a sus mejoras en calidad y velocidad [5].



Fuente: Datos reportados por los Proveedores de Redes y Servicios a Colombia TIC.
Fecha de consulta: 14 de julio del 2017.

Figura 1.2 Comportamiento de suscriptores a internet móvil por generación móvil [5]

1.2.3. Justificación Social

Debido al incremento en el uso de la tecnología, es fundamental brindar un mejor servicio a los usuarios con el fin de motivar a los consumidores como a las compañías al desarrollo de aplicaciones con mayor tráfico de datos como lo son realidad virtual, tele-medicina, procesos industriales, realidad argumentada y entretenimiento.

1.2.4. Justificación Ambiental

Dada el desarrollo del sistema, cabe la posibilidad que en estudios futuros se reestructuren y reutilicen los nodos o líneas de transmisión en fibra óptica, así como proponer la distancia óptima, para ubicar adecuadamente los nodos donde sea necesario evitando así la conglomeración innecesaria de equipos costosos y dar mal uso al espacio.

1.2.5. Justificación Personal

Este proyecto pretende mejorar la sociedad, brindando las herramientas claves para dar un salto tecnológico en nuestro país, ayudando a evolucionar el estilo de vida con el acceso a la información, por que el conocimiento es la base fundamental de las sociedades en progreso, porque de esta manera se motiva al desarrollo de todas las áreas del conocimiento.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Analizar y diseñar un sistema centralizado de fuentes ópticas mediante modulación electro-óptica y multiplexación de polarización en una red de acceso.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Identificar las características necesarias para centralizar las diferentes tecnologías móviles, incluyendo los requerimientos para el soporte de 5G, como tasas de transmisión, latencia, BER y distancia.

2. Estudiar el comportamiento y funcionamiento del modulador electro-óptico así como la densidad espectral de potencia de las portadoras y sub-portadoras ópticas generadas.

3. Determinar la posibilidad de relacionar la modulación electro-óptica y alguna de las estrategias de centralización para mejorar la capacidad de transporte de información dentro del sistema.

4. Modelar el sistema mediante simulación para evaluar los diseños propuestos de centralización de fuentes ópticas aplicando las diferentes técnicas estudiadas.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Desarrollo

2.1.1. Latencia

La latencia hace referencia al retardo que presenta la información entre un punto de envió y otro de llegada dentro de la red, siendo la suma de los retardos parciales que se puedan presentar durante el recorrido. Dicha característica se encuentra ligada a "la propagación de la señal en el medio de transmisión, del tiempo de procesamiento y conmutación en su paso por los diferentes nodos de red"[6].

Esta afecta directamente la calidad percibida de aplicaciones altamente interactivas, como vídeo llamadas, realidad virtual, sistemas de tele-medicina, etc. No obstante es poco probable que las diferencias en las latencias medias en todas las tecnologías, afecten las aplicaciones menos interactivas, como la navegación web y vídeo streaming [7].

2.1.2. BER

La tasa de error de bits (BER), es una forma de cuantificar la confiabilidad de todo el sistema desde los bits de entrada, a bits de salida, incluyendo la electrónica, antenas y el medio de propagación [8]. El BER es definido como:

$$BER = \frac{Errores}{\text{Número total de bits}} \tag{2.1}$$

Con una fuerte señal y bajas perturbaciones, el BER es muy pequeño y prácticamente insignificante. Este se vuelve significante cuando se desea mantener una suficiente

relación señal-a-ruido en presencia de una transmisión imperfecta mediante los circuitos electrónicos y la propagación en el medio [8]. El BER también puede ser definido en términos de la probabilidad de error como:

$$POE = \frac{1}{2}(1 - erf)\sqrt[2]{\frac{E_b}{N_o}} \tag{2.2}$$

Donde erf es la función de error, E_b es la energía en un bit y N_o es la densidad espectral de potencia de ruido (potencia de ruido en un ancho de banda de 1 Hz). La función de error es diferente para cada uno de los diferentes métodos de modulación. La energía por bit E_b, puede ser determinada al dividir la potencia de la portadora por la tasa de bit. Como una medida de energía, E_b tiene como unidades joules. N_o esta en potencia(joules por segundo) por Hz (segundo), entonces $\frac{E_b}{N_o}$ es simplemente una relación numérica [8].

En términos prácticos, el peor BER que se debe garantizar según la recomendación CTI (Common Telecommunications Infrastructure) es de 1×10^{-7}.

2.1.3. Diagrama de ojo

El diagrama de ojo, muy utilizado en el análisis de formas de ondas en telecomunicaciones digitales, corresponde esencialmente, a un diagrama que muestra la superposición de las distintas combinaciones posibles de unos y ceros en un rango de tiempo o cantidad de bits determinados. Dichas señales transmitidas por el enlace, permiten obtener las características de los pulsos que se propagan por el medio de comunicación [9].

En una secuencia de 3 bits tenemos una cantidad total de 8 combinaciones posibles, las que pueden ser observadas en la figura 2.1. Debido a la capacidad de los diagramas de ojo de representar la superposición de varias señales simultáneamente es que son conocidos como patrones multi-valores [9].

Análisis de Parámetros de Ojo

Principalmente existen dos tipos de análisis de los diagramas de ojo. El primero se refiere fundamentalmente al análisis de las distintas características de la forma de onda del pulso como son el Risetime, Falltime, overshoot, undershoot y el jitter, que están referidas a cuatro propiedades fundamentales del ojo, el nivel cero, nivel uno, cruce de amplitud y cruce en el tiempo. Mientras que el segundo método consiste en la comparación de la máscara medida directamente en el patrón de ojo con una máscara preestablecida [9].

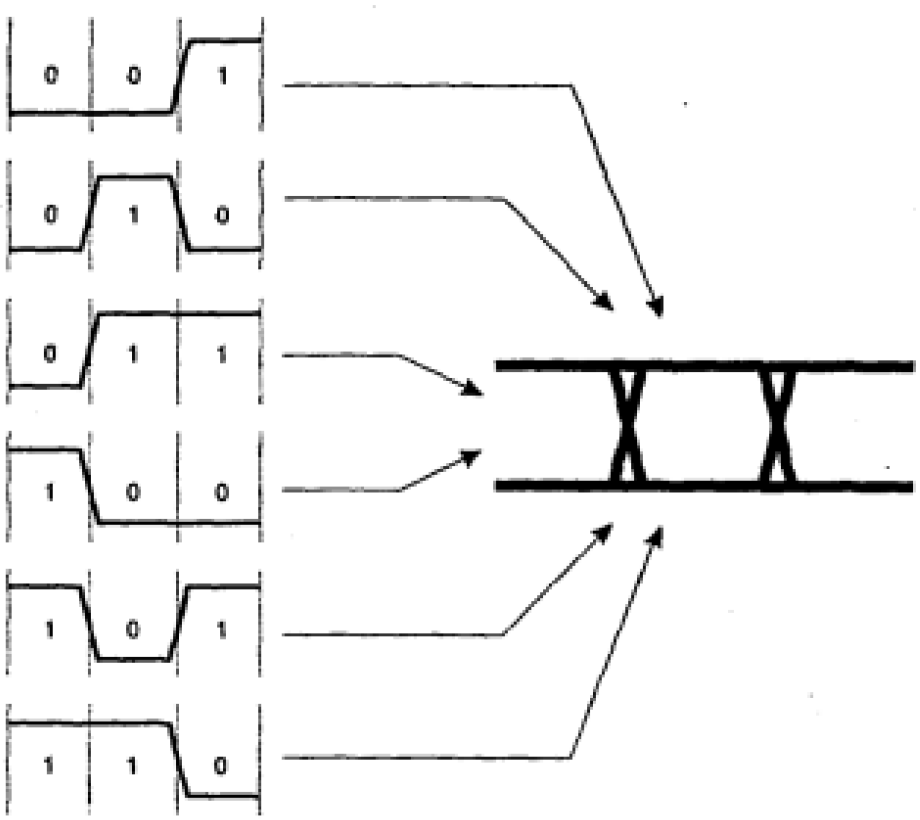


Figura 2.1 Concepto sobre el diagrama de ojo [9].

En la figura 2.2 es posible observar los diferentes parámetros que constituyen un pulso en un patrón de ojo. Es importante resaltar que el tiempo de subida (rise time) y de bajada (fall time) son tiempos entre el 10% y 90% del valor máximo de amplitud del pulso (nivel uno).

Propiedades fundamentales del ojo

- One Level: Corresponde a la medición del valor promedio del nivel de un uno lógico.Esto se debe a que el diagrama de ojo utiliza métodos estadísticos en la construcción del patrón, es decir, se genera un histograma con los distintos valores del pulso y luego se considera una angosta zona del ancho del pulso, con lo que se logra obtener el promedio del nivel uno de dicho pulso [9].

- Zero level: Corresponde a la medida del valor medio del nivel cero lógico. Al igual que en el caso del Nivel Uno las técnicas de medición del nivel cero son las mismas [9].

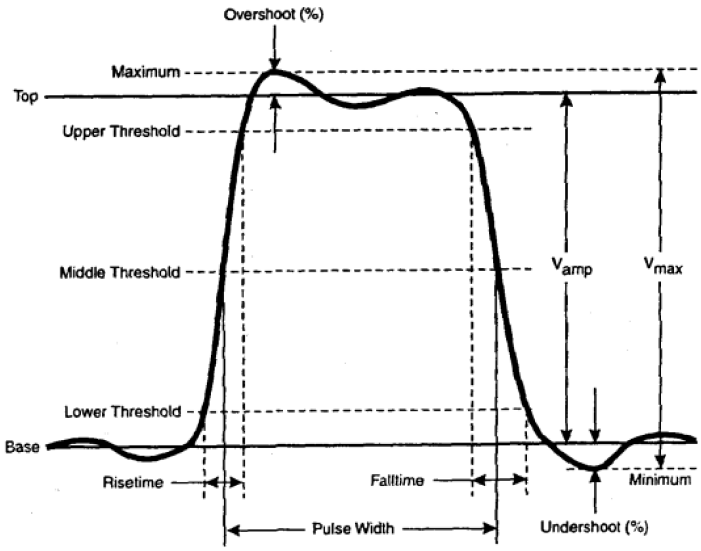


Figura 2.2 Parámetros que constituyen un pulso en un patrón de ojo [9].

- Eye crossing: Consiste de dos partes, Crossing Time y Crossing Amplitud. El Crossing Time se refiere al tiempo en el que se produce la apertura del ojo y su posterior cierre, mientras que el Crossing Amplitud, está referido al nivel de voltaje en el cual se produce la apertura del ojo y su posterior cierre. Considerando estos dos parámetros se define el Bit Period, que corresponde al período entre la apertura y cierre del ojo [9].

Estas definiciones se presentan en la figura 2.3, con sus respectivos parámetros.

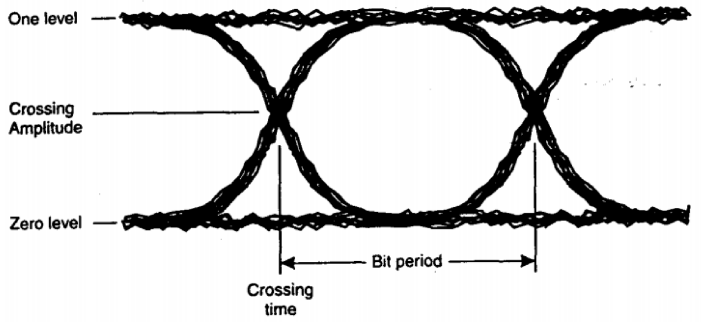


Figura 2.3 Parámetros fundamentales del ojo [9].

Definición de Máscaras

Permiten especificar zonas no permitidas para las señales dentro del diagrama figura 2.5, con ello se busca un diseño óptimo de enlaces que cumplan con ciertas características.

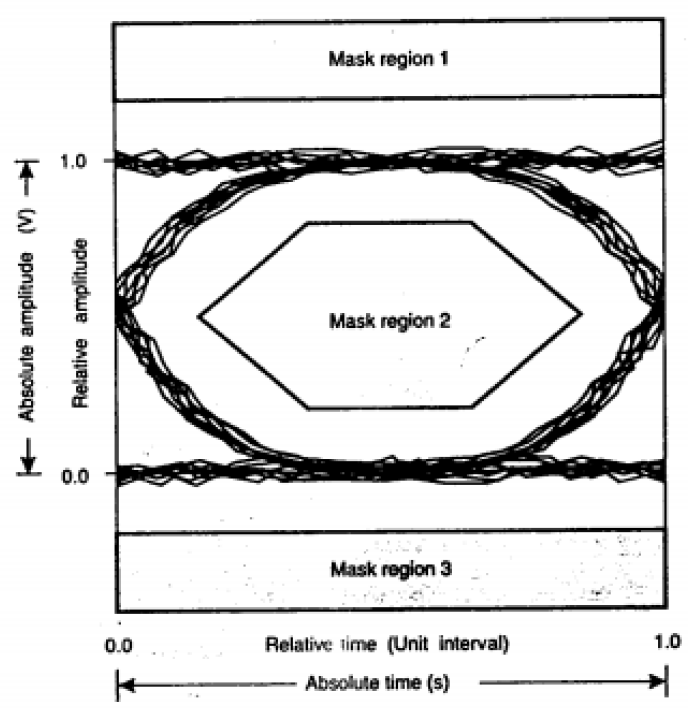


Figura 2.4 Concepto de máscara de diagrama de ojo, las señales no deben introducirse en las regiones definidas [9].

Jitter

Corresponde a una desviación de fase, esta se calcula como la desviación estándar experimentado por una serie de muestras de un histograma. Esté efecto es indeseable en los sistemas de comunicaciones, puede degradar por completo la calidad y desempeño del enlace.Este puede causar errores en la recepción de bits (degradar BER), además puede producir interferencia intersimbólica (ISI), ya que el jitter producirá un desplazamiento de las señales que componen el pulso y por ende se mezclarán figura, imposibilitando de esta manera el reconocimiento de los niveles respectivos de la señal en el receptor [9].

2.1.4. Cálculo de BER y factor Q a partir de diagrama de ojo

El factor Q mide la calidad de una señal de transmisión en términos de su relación señal a ruido (SNR). Como tal, tiene en cuenta las alteraciones físicas de la señal (por ejemplo, ruido, dispersión cromática y cualquier polarización o efectos no lineales) que pueden degradar la señal y finalmente causar errores de bits. En otras palabras, cuanto mayor sea el valor del factor Q, mejor será la SNR y, por lo tanto, menor será

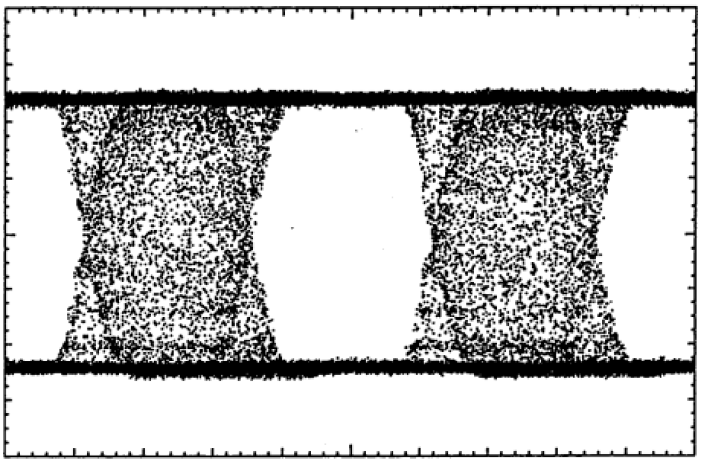


Figura 2.5 Jitter con 0,5 UI (Unit Interval), o en otras palabras, un desfase de 0,5 veces el Bit Period [9].

la probabilidad de errores de bit. Específicamente, el Factor Q representa la calidad de la SNR en el 'ojo' de una señal digital, siendo el 'ojo' el patrón en forma de ojo humano en un osciloscopio que indica el rendimiento del sistema de transmisión. El mejor lugar para determinar si un bit dado es un '1' o un '0' es la fase de muestreo con la mayor 'apertura del ojo'. Cuanto mayor es la apertura del ojo, mayor es la diferencia entre los valores medios de los niveles de señal para un '1' y un '0'. Cuanto mayor sea la diferencia, mayor será el factor Q y mejor será el rendimiento de BER. El factor Q es la diferencia entre los valores medios de los niveles de señal para un '1' y un '0' (μ_1 y μ_0), dividido por la suma de los valores de ruido (σ_1 y σ_0) en esos dos niveles de señal suponiendo ruido gaussiano y la probabilidad de que una transmisión '1' y '0' sea igual ($P(0) = P(1) = \frac{1}{2}$)

2.1.5. 5G

Las redes de quinta generación prometen no solo altas tasas de de velocidad de datos comparadas a las generaciones anteriores, también incluye la baja latencia que permite la interactividad en tiempo real, la clave fundamental para servicios como tele-medicina, el éxito de los vehículos autónomos entre otros[10].

La red 5G, presenta una mejora en la velocidad de datos en un factor de 10 con respecto a la generación anterior figura 2.6.

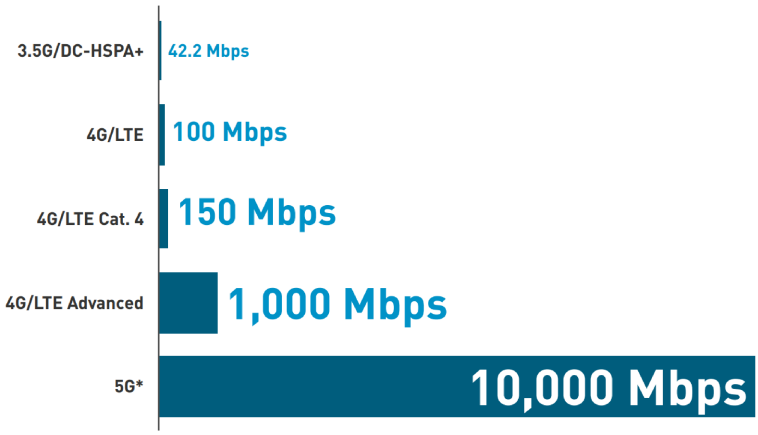


Figura 2.6 Velocidades de generaciones de redes [10].

Bajo la premisa de mejorar las tasas de transmisión, la latencia mejora hasta disminuir a 1 ms, lo cual permite incluir nuevos servicios que no se podían implementar antes con otras generaciones de redes figura 2.7, para alcanzar el objetivo de latencia de 1 ms, las redes 5G requieren que la conectividad para la estación base use fibra óptica.

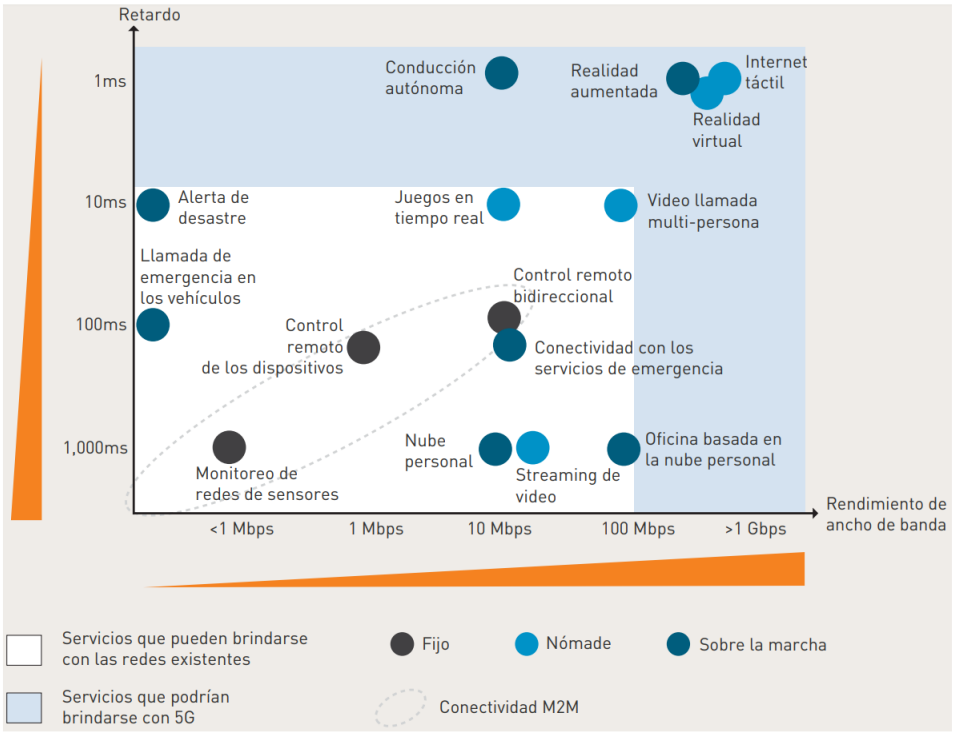


Figura 2.7 Servicios que se brindan en las actuales redes y 5G [10].

La implementación de las redes 5G, a la vez que se mantienen operativas las redes 3G y 4G, probablemente den lugar a un nuevo desafío para los operadores de redes móviles con respecto a la capacidad de las frecuencias en el espectro. Los operadores de redes móviles tendrán que requerir operar un nuevo espectro en el rango de 6 a 300 GHz, que implica inversiones masivas en la infraestructura de la red[10].

2.2. Teoría de fibra óptica

2.2.1. Sistemas de comunicaciones ópticas

En esencia, un sistema óptico de comunicaciones es un sistema electrónico de comunicaciones que usa la luz como portador de información. Sin embargo, es difícil y poco práctico propagar ondas luminosas por la atmósfera terrestre. En consecuencia, los sistemas de comunicaciones con fibra óptica usan fibras de vidrio o de plástico para "contener" las ondas luminosas y guiarlas en una forma similar a como las ondas electromagnéticas son guiadas en una guía de ondas. La opto-electrónica es la rama de la electrónica que estudia la transmisión de la luz a través de fibras ultra puras, que se suelen fabricar con vidrio o con plástico.

La capacidad de conducción de información de un sistema electrónico de comunicaciones es directamente proporcional a su amplitud de banda. Para fines de comparación, se acostumbra expresar el ancho de banda de un sistema analógico de comunicaciones como un porcentaje de la frecuencia de su portadora. A esto se le llama a veces relación de utilización del ancho de banda. Por ejemplo, un sistema de radiocomunicaciones de VHF trabajando a una frecuencia de portadora de 100 MHz con ancho de banda de 10 MHz tiene una relación de utilización de ancho de banda de 10 %. Un sistema de radio de microondas que funciona con una frecuencia de portadora, con una relación de utilización de ancho de banda igual a 10 % tendría disponible 1 GHz de ancho de banda. Es obvio que mientras mayor es la frecuencia de portadora, el ancho de banda es mayor y la capacidad de conducción de información es mayor. Las frecuencias luminosas que se usan en los sistemas de comunicaciones con fibra óptica están entre $1x10^{14}$ y $4x10^{14}$ Hz (100,000 a 400,000 GHz). Una relación de utilización de ancho de banda de 10 % significaría una banda de entre 10,000 y 40,000 GHz de ancho.

2.2.2. El espectro Electromagnético

El esfuerzo total de frecuencias electromagnéticas se muestra en la figura 2.8 Se puede ver que ese espectro de frecuencias va desde las subsónicas (unos cuantos hertz) hasta los rayos cósmicos (10^{22} Hz). El espectro de frecuencias luminosas se puede dividir en tres bandas generales:

- Infrarrojo: banda de longitudes de onda de luz demasiado grandes para que las vea el ojo humano.
- Visible: banda de longitudes de onda de luz a las que responde el ojo humano.
- Ultravioleta: banda de longitudes de onda de luz que son demasiado cortas para que las vea el ojo humano.

Cuando se manejan ondas electromagnéticas de mayor frecuencia, como las luminosas, se acostumbra usar unidades de longitud de onda y no de frecuencia. La longitud de onda es la distancia que ocupa en el espacio un ciclo de una onda electromagnética. La longitud de onda depende de la frecuencia de la onda y de la velocidad de la luz. La relación matemática correspondiente es

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2.3}$$

en donde:
λ= longitud de onda (metros/ciclo)
c = velocidad de la luz (300,000,000 metros por segundo)
f = frecuencia (hertz)

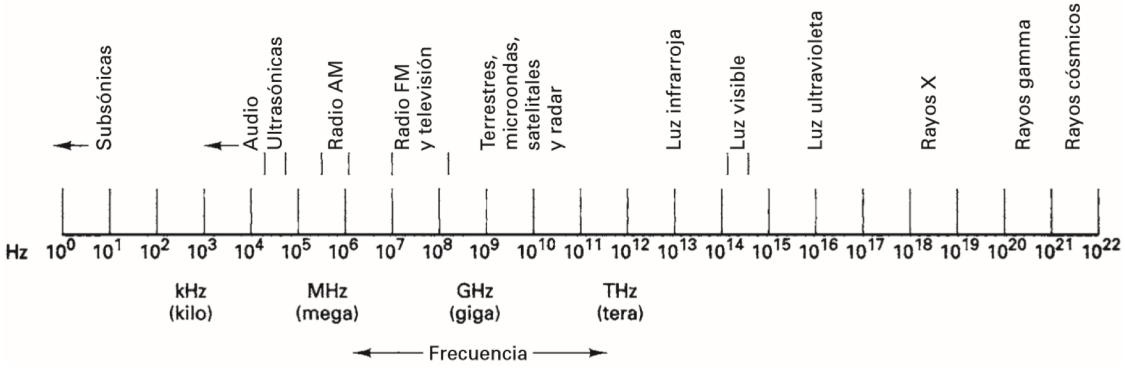


Figura 2.8 Espectro de frecuencias electromagnéticas [11].

2.2.3. Componentes de un sistema de comunicaciones con fibra óptica

La figura 2.9 muestra un diagrama de bloques simplificado de un enlace de comunicaciones con fibra óptica. Los tres bloques principales que lo forman son el transmisor, el receptor y la guía de fibra o fibra guía. El transmisor consiste en una interconexión o interfaz analógica o digital, un convertidor de voltaje a corriente, una fuente luminosa y un acoplador de luz de fuente a fibra. La guía de fibra es un cable de vidrio o plástico ultrapuro. El receptor comprende un dispositivo detector acoplador de fibra a luz, un detector fotoeléctrico, un convertidor de corriente a voltaje, un amplificador y una interfaz analógica o digital.

En un transmisor de fibra óptica, la fuente luminosa se puede modular mediante una señal digital o una analógica. Para la modulación analógica, la interfaz de entrada compensa las impedancias y limita la amplitud de la señal de entrada. Para la modulación digital, la fuente original puede tener ya la forma digital o bien, si está en forma analógica, debe convertirse a una corriente de pulsos digitales. En el último caso se debe agregar un convertidor de analógico a digital en la interfaz.

El convertidor de voltaje a corriente sirve como interconexión eléctrica entre los circuitos de entrada y la fuente luminosa. Esta fuente luminosa puede ser un diodo emisor de luz (LED, de light-emitting diode) o un diodo de inyección láser (ILD, por injection laser diode). La cantidad de luz emitida por un LED o un ILD es proporcional a la cantidad de la corriente de excitación. Así, el convertidor de voltaje a corriente convierte un voltaje de señal de entrada en una corriente que se usa para activar la fuente luminosa.

El acoplador entre fuente y fibra (como por ejemplo un lente) es una interfaz mecánica. Su función es acoplar la luz que emite la fuente e introducirla al cable de fibra óptica. La fibra óptica es un núcleo de vidrio o plástico, un revestimiento y una chaqueta protectora. El dispositivo de acoplamiento detector de fibra a luz también es un acoplador mecánico. Su función es sacar tanta luz del cable de fibra como sea posible y ponerlo en el detector de luz.

El detector de luz es, con mucha frecuencia, un diodo PIN (tipo p y tipo n intrínseco) o un fotodiodo de avalancha (APD, de avalanche photodiode). Tanto el diodo APD como el PIN convierten la energía luminosa en corriente. En consecuencia, se necesita

un convertidor de corriente a voltaje. El convertidor de corriente a voltaje transforma los cambios de la corriente del detector en cambios de voltaje de la señal de salida. La interfaz analógica o digital en la salida del receptor también es una interconexión eléctrica. Si se usa modulación analógica, la interfaz compensa las impedancias y los niveles de señal con los circuitos de salida. Si se usa modulación digital, la interfaz debe incluir un convertidor de digital a analógico.

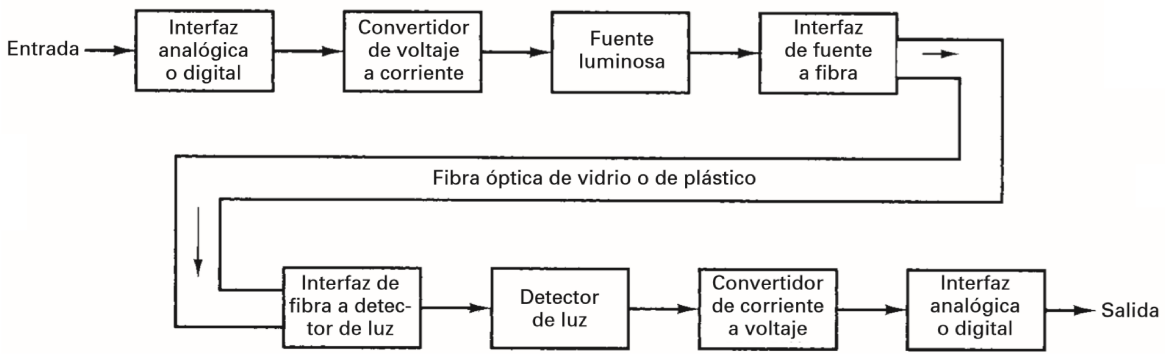


Figura 2.9 Enlace simplificado de comunicaciones con fibra óptica [11].

El transmisor acepta señales de entrada en forma analógica o digital y las convierte en señales ópticas, que irradia modulando a la salida de una fuente de luz(usualmente un diodo emisor de luz o rayo láser) mediante el recurso de variar la intensidad. La señal óptica se transmite por fibra óptica o canal de comunicación hasta un receptor, donde un fotodiodo la reconvierte en eléctrica.

El rendimiento de un enlace de fibra óptica depende de las características de apertura numérica (AN), atenuación y dispersión de la fibra, Atenuación y dispersión distorsionan la señal a su paso por aquella.

Tipos de fibra óptica

Las geometrías de cables más comunes utilizadas para la fibra óptica se presentan en la figura 2.10. Se clasifican como salto de índice multimodo, salto de índice gradual multimodo, y monomodo de salto de índice, de esta forma la fibra óptica puede ser clasificada como: monomodo y multimodo [12].

La fibra monomodo permite la propagación en un solo ángulo conocido, mientras que la fibra multimodo transmite ondas en diferentes ángulos dentro del núcleo de la

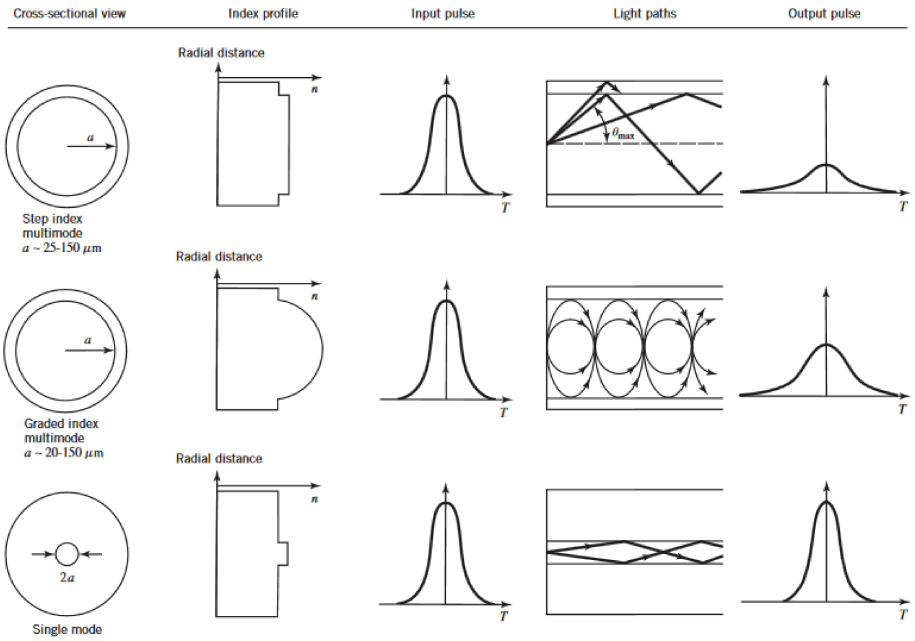


Figura 2.10 Tipos de fibra óptica [12].

fibra. Ambos tipos de fibra monomodo y multimodo, son fabricados con un núcleo central con un alto índice de refracción, rodeado por un revestimiento con un bajo indice de refracción. La fibra monomodo usualmente posee un diámetro muy pequeño en su núcleo (típicamente 2-16 μm), usualmente el índice de reflexión de el núcleo esta cerca de 1,471 y el del revestimiento es 1,457 [12].

La fibra multimodo de salto de índice exhibe un núcleo bien definido con un índice de refracción constante, rodeado por un revestimiento con bajo indice de refracción, en comparación con la fibra monomodo, la multimodo de salto de índice posee un núcleo cuyo diámetro se encuentra de 25-150 μm. Cuando la longitud de onda es del orden de 10 μm (cerca de la región infrarroja) y el diámetro del núcleo central es 100μm, dicha fibra es capaz de soportar 25,000 modos (usualmente hay cerca de 200 modos). La fibra multimodo de salto de índice es muy dispersiva y provee una gran distorsión a la forma de onda con un amplio contenido de frecuencia espectral. Típicamente el índice de refracción del núcleo central es cerca de 1,527 y en el revestimiento es cerca de 1,517 [12].

La fibra multimodo de índice gradual posee un núcleo central relativamente amplio (diámetro típicamente de 20-150 μm), cuyo índice de refracción decrece continuamente desde el centro del núcleo hacia la interfaz núcleo-revestimiento, punto en el cual los índices son idénticos. para esta fibra , las ondas aún están contenidas dentro del núcleo

y se reorientan hacia el eje central mediante su acción de lente continua. El número de modos soportados por esta fibra es cerca de 2000, y tal estructura multimodo proporciona distorsión en la forma de onda especialmente a señales transitorias [12].

Apertura Numérica

Este es el parámetro más importante de una fibra óptica. El valor de AN está determinado por el índice de refracción del núcleo y el revestimiento. Por definición, el índice de refracción n de un medio es

$$n = \frac{\text{Velocidad de la luz en el vacío}}{\text{Velocidad de la luz en el medio}} = \frac{c}{u_m} = \frac{\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}}{\frac{1}{\sqrt{\mu_m \epsilon_m}}} \tag{2.4}$$

Puesto que $\mu_m = \mu_0$ en la mayoría de los casos prácticos,

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon_m}{\epsilon 0}} = \sqrt{\epsilon_r} \tag{2.5}$$

lo que revela que el índice de refracción es en esencia la raíz cuadrada de la constante dieléctrica.

O en definición el índice de refracción es la cantidad de desviación o refracción que sucede en la interfaz de dos materiales de distintas densidades se puede predecir bastante bien, y depende del índice de refracción de los dos materiales. Este índice de refracción no es más que la relación de la velocidad de propagación de un rayo de luz en el espacio libre, entre la velocidad de propagación del rayo en determinado material [13].

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \tag{2.6}$$

donde θ_1 es el ángulo incidente en el medio 1 y θ_2 el ángulo de transmisión en el medio 2. La reflexión total ocurre cuando $\theta_2 = 90°$, lo que resulta en

$$\theta_1 = \theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \tag{2.7}$$

donde θ_c es el ángulo crítico para la reflexión interna total. La ecuación 2.7 sólo es válida si $n_1 > n_2$, ya que el valor de $\sin(\theta_c)$ debe ser menor o igual a 1.

Otra manera de analizar la capacidad de conducción de luz de una fibra consiste en medir el ángulo de aceptación θ_a el máximo ángulo en el cual los rayos de luz que entran en la fibra serán atrapados por el núcleo de ésta. Sabiendo que el ángulo máximo ocurre cuando θ_c es el ángulo crítico, lo que satisface la condición de reflexión interna total [13].

Con respecto a una fibra óptica de índice escalonado, la condición de reflexión interna total es

$$AN = \sin(\theta_a) = n_1 \sin(\theta_c) = \sqrt{(n_1)^2 - (n_2)^2} \tag{2.8}$$

donde n_1 es el índice de refracción del núcleo y n_2 el del revestimiento como se observa en la figura 2.11. EN virtud de que el núcleo suele ser de sílice, n_1. Los valores más frecuentes de AN fluctúan de 0.19 a 0.25. Cuando sea este valor, mayor será la energía óptica que la fibra puede tomar de la fuente.

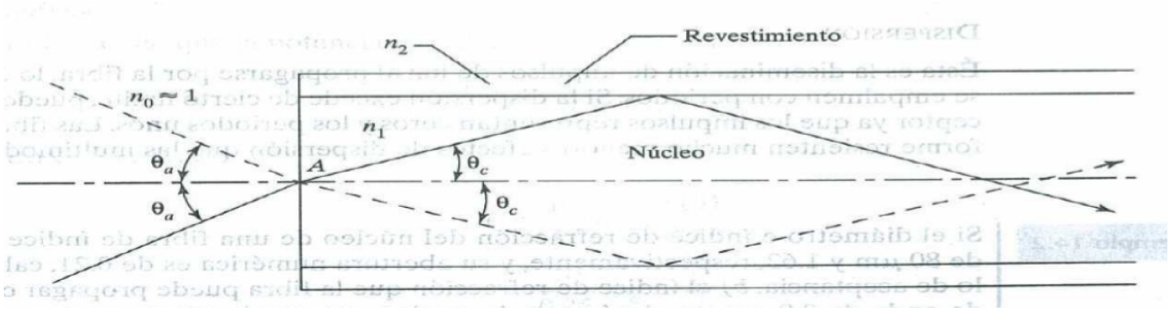


Figura 2.11 Estructura física de una fibra óptica [13].

Cuando una fibra puede tolerar numerosos modos se llama fibra multimodo. el número de modos esta dado por

$$V = \frac{\pi d}{\lambda}\sqrt{(n_1)^2 - (n_2)^2} \tag{2.9}$$

donde d es el diámetro del núcleo de la fibra y λ la longitud de onda de la fuente óptica. Con base en la ecuación 2.9, el número N de modos que se propagan por una fibra de índice escalonado puede estimarse como:

$$N = \frac{V^2}{2} \tag{2.10}$$

2.2.4. Propagación en la fibra Óptica

Es necesario considerar la propagación de la luz en la fibras ópticas usando las ecuaciones de Maxwell para ondas electromagnéticas.

Ecuaciones de Maxwell

Como todos los fenómenos electromagnéticos, la propagación en el campo óptico se rige con las ecuaciones de Maxwell, para un medio no conductor sin cargas libres, estas ecuaciones tienen la forma:

$$\nabla X E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{2.11}$$

$$\nabla X H = \frac{\partial D}{\partial t} \tag{2.12}$$

$$\nabla \cdot D = 0 \tag{2.13}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{2.14}$$

Donde E y H son los vectores de, campos eléctricos y magnéticos respectivamente, D y B son densidades de flujo correspondiente. Estas densidades esta constituidas por las relaciones

$$D = \epsilon_0 E \tag{2.15}$$

$$B = \mu_0 H \tag{2.16}$$

Donde $\epsilon_0$es la permitividad del vació y μ_0 es la permeabilidad del vació, P y M son las polarizaciones eléctrica y magnética inducidas.

$$\nabla x E = -\mu \frac{dH}{dt} \tag{2.17}$$

$$\nabla x H = \epsilon \frac{dE}{dt} \tag{2.18}$$

Estas ecuaciones son un formalismo general para el estudio de la propagación en las fibra óptica, pero en la practica es conveniente usar una sola variable de campo E, por lo que se aplica el rotacional a las ecuaciones

$$\nabla x(\nabla xE) = -\mu\frac{d}{dt}(\nabla xH) \tag{2.19}$$

$$-\mu\frac{d}{dt}(\nabla xH) = -\epsilon\mu\frac{d^2}{dt^2}E \tag{2.20}$$

$$\nabla^2 E = \epsilon\mu\frac{d^2}{dt^2}E \tag{2.21}$$

$$\nabla^2 H = \epsilon\mu\frac{d^2}{dt^2}H \tag{2.22}$$

2.2.5. Polarización de la luz

La luz es una forma de radiación electromagnética generada por un dipolo (una carga eléctrica) que vibra a cierta frecuencia y por lo tanto genera un campo eléctrico de rápida variación el cual es acompañado por un campo magnético, dando lugar a una onda electromagnética que se propaga siguiendo el vector de Poynting [14]. Los vectores E y H vibran en todos los planos perpendiculares respecto a la dirección de propagación, esto es conocido como luz no polarizada. Cuando dichos vectores de campo son restringidos a un único plano mediante un polarizador, se dice que la luz ha sido polarizada respecto a la dirección de propagación y todas las ondas vibran solamente sobre el plano de polarización figura 2.12 [15].

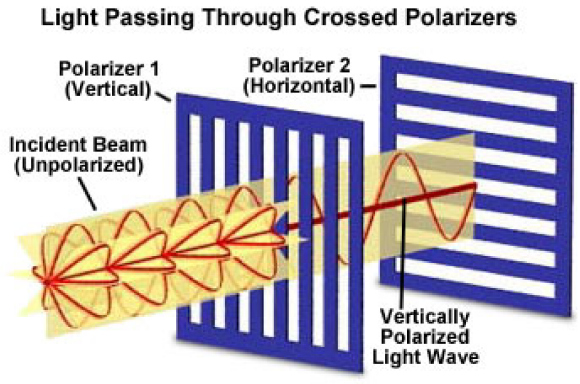


Figura 2.12 Polarización de la luz [15].

La luz que se propaga en estas condiciones se denomina luz polarizada plana, o linealmente polarizada. Es preciso resaltar como la suma de dos ondas polarizadas y en fase, logran dar como resultado una onda linealmente polarizada en fase con las anteriores[14].

$$E_z(x,t) = \vec{i}E_{0z}Cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T}+\frac{x}{\lambda}\right)\right] \tag{2.23}$$

$$E_y(x,t) = \vec{j}E_{0y}Cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T}+\frac{x}{\lambda}\right)\right] \tag{2.24}$$

Al sumar las ondas se obtiene:

$$E(x,t) = E_y(x,t) + E_z(x,t) \tag{2.25}$$

$$E(x,t) = \left(\vec{i}E_{0z}+\vec{j}E_{0y}\right)Cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T}+\frac{x}{\lambda}\right)\right] \tag{2.26}$$

Esta expresión, idéntica a las anteriores, también corresponde a una onda linealmente polarizada, de amplitud $\vec{i}E_{0z}+\vec{j}E_{0y}$, y en fase con las dos ondas que la componen. Igualmente es posible descomponer una onda linealmente polarizada en dos ondas ortogonales, también linealmente polarizadas[14].

Obtención de luz polarizada

Básicamente existen tres grandes grupos de procedimientos para producir luz linealmente polarizada: por reflexión, absorción y refracción [14], y dispersión.

Polarización por absorción selectiva

Este es de los métodos más usuales, consiste en usar material que transmita ondas cuyos campos eléctricos vibren en un plano paralelo a cierta dirección y que absorba las ondas cuyos campos eléctricos estén vibrando en todas las demás direcciones. Esto se consigue al alinear moléculas que componen cierto material (un buen ejemplo son las cadenas de hidrocarburos). Si la luz cuyo vector de campo eléctrico es paralelo a las cadenas incide en el material, el campo eléctrico acelera los electrones a lo largo de las cadenas y se absorbe energía a causa de la radiación. De esta forma únicamente puede salir del material luz polarizada perpendicular a las cadenas moleculares (eje de transmisión) [16].

Polarización por reflexión

La polarización por reflexión depende del ángulo con que incide la luz no polarizada sobre una superficie. Si tal ángulo incidente, logra que la diferencia entre el ángulo

reflejado y refractado sea de 90 grados, el rayo reflejado estará totalmente polarizado, mientras el refractado solo lo está parcialmente [16].

Polarización por refracción doble

En ciertos materiales cristalinos, como por ejemplo la calcita y el cuarzo, la rapidez de luz no es la misma en todas direcciones, pues depende de la dirección de propagación y del plano de polarización de la luz. Estos materiales se caracterizan por tener dos índices de refracción, por lo que a menudo se les llama materiales de doble refracción o birrefringentes. Cuando la luz no polarizada entra en un material birrefringente, puede dividirse en un rayo ordinario y un rayo extraordinario. Estos dos rayos tienen polarizaciones mutuamente perpendiculares y viajan con magnitudes de velocidades diferentes a través del material. Las dos magnitudes de velocidad corresponden a dos índices de refracción, n_0 para el rayo ordinario y n_E para el rayo extraordinario [16].

Polarización por dispersión

Además de los métodos anteriormente descritos, [16] describe un método más, el cual es la polarización por dispersión. El fenómeno es similar al de la creación de una luz totalmente polarizada al reflejarse de una superficie en el ángulo de Brewster. Un haz de luz solar no polarizado que viaja en dirección horizontal (paralelo a la Tierra) incide sobre una molécula de uno de los gases que conforman el aire, originando la vibración de sus electrones. Estas cargas en vibración actúan como las cargas vibratorias de una antena. La componente horizontal del vector del campo eléctrico de la onda incidente crea una componente horizontal de la vibración de las cargas, y la componente vertical del vector da como resultado una componente vertical de la vibración [16].

2.3. Modulación electro-óptica

La modulación electro-óptica se basa en alterar una señal portadora en el dominio óptico de forma proporcional a una señal moduladora en el dominio eléctrico. Existen dos tipos de modulación óptica, directa y externa, con las cuales, solo con la externa se puede realizar modulación electro-óptica.

En las comunicaciones ópticas digitales, al igual que en el resto de sistemas de transmisión digital, los formatos de modulación empleados en comunicaciones ópticas no difieren en esencia de los empleados en otros sistemas: usando la amplitud, la

frecuencia o la fase de la portadora en cuestión para codificar la información.

Modulación directa

Para la modulación directa se emplea usualmente un diodo láser como fuente de luz, el cual se encuentra ya modulado.

La modulación directa de los láseres es el camino más fácil para imprimir la información digital de la fuente sobre la portadora óptica. Los datos que se desean transmitir modulan la corriente de conducción del láser DML (Directtly Modulated Laser), y a través de ella se consigue generar una modulación de intensidad, de fase o de frecuencia.

La generación de una modulación de intensidad (IM - Intensity Modulation), mediante un DML (Directtly Modulated Laser), se basa en generar una corriente eléctrica que alimente al láser sincronizada con los datos digitales. Los bits "1" encienden el láser mientras que los bits "0" estarán sincronizados con un valor de la corriente por debajo de su corriente umbral, de manera que este no emita potencia óptica alguna. Sin embargo, la generación de una modulación de frecuencia a través de un DML se basa en modificar la densidad de portadores de carga en la cavidad resonante del láser. Por lo tanto, debemos generar una corriente con un valor de pico suficientemente elevado como para modificar la temperatura y la concentración de portadores de carga en la unión p-n. Ambos hechos inciden sobre el índice de refracción de la cavidad y consecuentemente sobre la longitud de onda de emisión. Así los cambios sobre la corriente del láser se traducen en variaciones en la frecuencia de emisión del láser.

El principal inconveniente de los DMLs es el elevado factor chirp que presentan (modulación de fase residual). El chirp expande el espectro óptico emitido e incrementa la distorsión de la señal causada por la iteración de la misma con la dispersión cromática y las no linealidades de la fibra. Por otro lado, los ruidos procedentes de la fuente láser como el ruido RIN o ruido de fase provocarán que obtengamos una señal de peor calidad que la que conseguiríamos con la modulación externa[2].

Modulación externa

Se emplea generalmente un diodo láser de semiconductor como fuente de luz, la cual mediante dispositivos externos al láser modula la luz radiada antes de su acoplo a fibra .

La modulación externa suele ser necesaria en los sistemas donde los DMLs se quedan cortos en prestaciones. Ninguno de los problemas derivados de la modulación directa, como el chirping o el derivado del comportamiento de los modos longitudinales de un láser, estarán aquí presentes

La modulación externa provee de una señal de mejor calidad [2].

A continuación se hablara de los principales métodos y tecnologías de modulación de la portadora óptica centrándose principalmente en la modulación externa, dentro de la cual se encuentran ubicados los moduladores Mach-Zenhder[2].

En este punto se realiza la modulación de la portadora óptica de forma externa al láser del transmisor. En esta situación, el láser genera una intensidad óptica constante en el tiempo (láser de onda continua) que pasa posteriormente por un dispositivo óptico externo al que se hace llegar la señal moduladora. A la salida, la radiación estará modulada con la forma deseada y se acoplará a la fibra.

Tipos de moduladores externos

Todos los moduladores empleados se basan en la variación que sufren las propiedades de un material con la aplicación de determinadas señales de distinta naturaleza. Los dos tipos más empleados son los electro-ópticos (EOM) y los de electro-absorción (EAM). En los primeros es una señal eléctrica la que origina un cambio en el índice de refracción del material. Los segundos están basados en la absorción de luz cuando ésta atraviesa un semiconductor y sobre éste actúa un campo eléctrico.

Los moduladores más extendidos tanto por sus prestaciones como por su economía de diseño son los de tipo electro-óptico. Es dentro de este grupo donde se ubica a los moduladores MachZehnder que se usan más habitualmente [2].

2.3.1. Moduladores electro-ópticos

Un cristal electro-óptico con la adecuada orientación puede modular la fase y la intensidad de una señal óptica con una tensión aplicada en la dirección correcta. El Niobato de Litio ($LiNbO_3$) es el cristal electro-óptico más común usado para fabricar moduladores externos de tipo electro-óptico. Para comprender mejor el funcionamiento de los moduladores de amplitud Mach-Zehnder se introduce previamente los moduladores electro-ópticos de fase [2].

Modulador electro-óptico de fase

La generación de una señal de fase modulada requiere un modulador externo capaz de cambiar la fase óptica cuando se aplique una tensión eléctrica al mismo. En un cristal de $LiNbO_3$, si se aplica un campo eléctrico a lo largo del eje x de la guía onda, según indica la figura 2.13, el índice de refracción del material cambia en un valor dado por la expresión [2]:

$$\Delta n = \frac{1}{2} n_0^3 r_{33} E_x \tag{2.27}$$

Donde r_{33} es el coeficiente electro-óptico del modulador con un valor de $328x10^{-6}\frac{\mu m}{v}$ para el $LiNbO_3$, n_0 es el índice de refracción material de la guía onda con tensión nula y E_x es el campo eléctrico aplicado a lo ancho de la guía (eje x). El desplazamiento de fase que sufre la señal óptica de entrada, tras recorrer una longitud L_i es [2]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta n L_i}{\lambda} = \pi n_r^3 r_{33} \frac{V_\pi L_i}{d\lambda_0}[rad] \tag{2.28}$$

Siendo λ_0 la longitud de onda de la señal óptica en el vacío. La tensión necesaria para provocar un desplazamiento de fase de 180^o se define como V_π y será un parámetro de diseño fundamental en el modulador de fase. Su expresión para el modulador de la figura 2.13 es:

$$V_\pi = \frac{d\lambda_0}{n_r^3 r_{33} L_i} \tag{2.29}$$

de la ecuación 2.29 se puede volver a hallar $\Delta\phi$, en términos de una tensión aplicada.

$$\Delta_\phi = \frac{\pi}{V_\pi} \tag{2.30}$$

En el diseño de un modulador de fase, uno de los principales objetivos es reducir el valor de la tensión V_π para consumir la menor potencia eléctrica posible durante la modulación. Esto lo conseguiríamos incrementando el coeficiente L_i/d lo que aumentaría a su vez la capacidad interna del modulador provocando una respuesta temporal más lenta a un estímulo en su entrada.

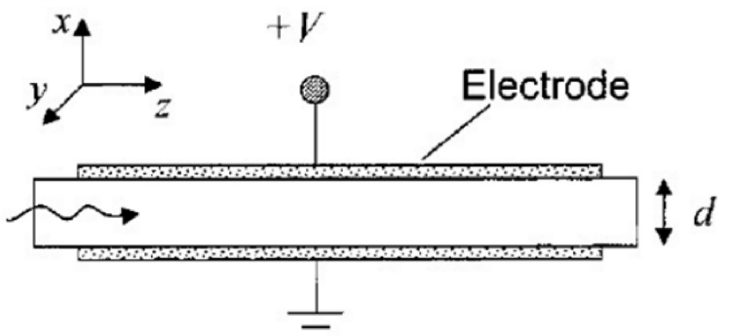


Figura 2.13 Estructura básica del funcionamiento de un modulador óptico de fase [2].

Modulador electro-óptico de amplitud MZ-EOM

Un modulador externo de amplitud generalmente provee de una mejor calidad a la señal generada y llega a velocidades de transmisión donde la modulación directa se queda corta, lo que convierte a estos dispositivos en elementos fundamentales en las redes ópticas de alta capacidad [11].

Este modulador se considera el mejor para trabajar en sistema ópticos de gran capacidad, dado al manejo de grandes anchos de banda. Es un dispositivo que modula externamente una señal de radio frecuencia sobre un haz de luz coherente.

El modulador presenta un configuración estándar de dos puertos de entrada figura 2.14 los cuales uno recibe una señal en el dominio óptico (Portadora) y en el otro puerto una señal en el dominio eléctrico que modulara la portadora óptica que sera entregada por el puerto de salida.

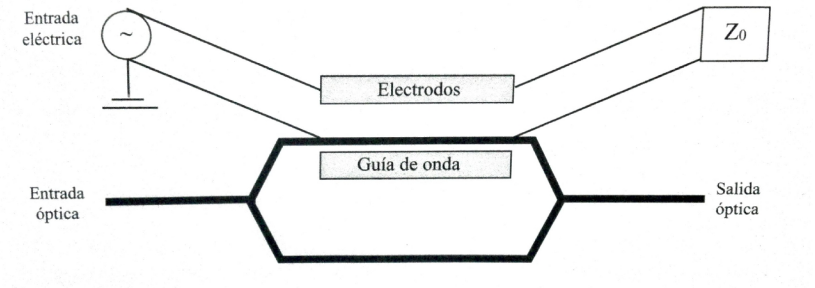


Figura 2.14 Geometría de un dispositivo MZ-EOM [17]

La guía de onda impresa en el $LiNbO_3$ figura 2.15, tiene una estructura interferométrica, con dos brazos conectados a la salida y la entrada del modulador mediante un

divisor y combinador óptico, la señal eléctrica se aplica en unos electrodos posicionados en alguno de los dos brazos. La señal eléctrica es la responsable de generar un desfase sobre la señal óptica proporcional al nivel de tensión aplicado por dicha moduladora.[17]

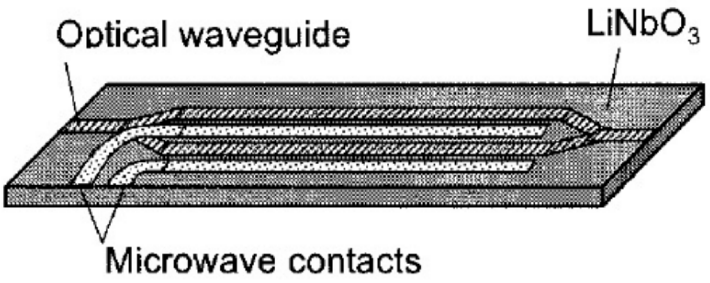


Figura 2.15 Esquema de un modulador de amplitud Mach-Zehnder [2].

Este efecto electro-óptico se debe a que la estructura interferométrica se encarga de convertir la razón de cambio de desfase en un razón de cambio en amplitud. Este comportamiento puede ser descrito mediante una función de transferencia ecuación 2.31 que involucra el el desface producido por la señal eléctrica y la estructura interferométrica sobre el campo eléctrico a la salida del modulador[17].

$$E_{out} = \frac{E_{in}}{\sqrt{L_E OM}} Cos\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \tag{2.31}$$

Donde:

- L_{EOM} son las perdidas de inserción del dispositivo.
- $\Delta\phi$ el desfase producido por la señal eléctrica aplicada

y dado que anteriormente se trato el funcionamiento del modulador por fase, se generó una desfase $\Delta\phi$ ecuación 2.30 como una ecuación dependiente de una tensión.

En un dispositivo MZ-OEM, el desfase provocado por una señal eléctrica de onda continua es de 180 ∘ al igual que en el modulador en fase anterior, describiéndose por una ecuación 2.32 muy parecida a la ecuación 2.30.

$$\Delta\phi(t) = -\pi => -\pi \cdot n_r^3 r_{33} \frac{V_\pi L_i}{d\lambda_0}[rad] \tag{2.32}$$

Llegando a que:

$$V_\pi(DC) = -\pi \frac{d\lambda_0}{n_r^3 r_{33} L_i} \tag{2.33}$$

El desfase en el modulador MZ, se da por el efecto electro-óptico del dispositivo interferométrico, con lo que se logra expresar el desfase como una variación de un vector de onda, ecuación 2.37.

$$\Delta\phi(t) = \Delta K_0 \int_0^L V(t,y) \cdot dy \tag{2.34}$$

donde:

- $\Delta K_0 = -\pi \frac{n_r^3 r_{33} L_i}{d\lambda_0}$ es la variación del vector onda por unidad de tensión

y con esta ecuación se puede determinar la tensión en el punto de desfase y mediante la transformada inversa de Fourier.

$$V(t,y) = \Delta K_0 \int_{-\infty}^{+\infty} V(f,y) e^{-2\pi j f t} \cdot df \tag{2.35}$$

Modelando en función de frecuencia y posición se obtiene

$$V(f,y) = V(f, y=0) \cdot H(f,y) \tag{2.36}$$

donde:

- $H(f,y)$ corresponde a la función de transferencia del electrodo

Finalmente a expresión para el desfase se obtiene combinando las ecuaciones 2.35 y 2.36.

$$\Delta\phi(t) = \Delta K_0 \int_{-\infty}^{\infty} V(f, y=0) \cdot H(f) \cdot e^{-2\pi j f t} \cdot df \tag{2.37}$$

finalmente, con la ecuación 2.33, que se sustituye sobre la ecuación 2.37, se obtiene que:

$$\Delta\phi = \frac{-\pi}{V_\pi(DC)} V(t) \tag{2.38}$$

Ahora remplazando la ecuación 2.30 en la ecuación 2.31, finalmente se obtiene la salida del dispositivo la cual varia su fase debido a la señal eléctrica modulada:[17]

$$E_{out} = \frac{E_{in}}{\sqrt{L_E OM}} \cdot Cos\left(\frac{-\pi}{2V_\pi} v(t)\right) \tag{2.39}$$

Capítulo 3

Estado del arte

3.1. Volterra basado en una compensación no lineal sobre un enlace de fibra óptica 224 Gb/s PolMux-16QAM

A continuación se presenta el trabajo de [18], se demuestra el funcionamiento del esquema de una compensación no lineal basado sobre serie Volterra en un sistema de fibra de mas de 250 km para 224 Gbs PolMux-16QAM y se evidencia su mejora en el rendimiento sobre la ecualización lineal.

Hoy en día es posible compensar la dispersión cromática en el dominio digital, junto con otras deficiencias como la dispersión por modos de polarización, las cuales impiden el desempeño de altas velocidades en el sistema. Actualmente está siendo considerada la modulación de amplitud en cuadratura de 16 niveles multiplexada por polarización (PolMux-16QAM), para incrementar la capacidad del canal y la eficiencia espectral. Este incremento en la complejidad de la constelación trae con ella un crecimiento de deficiencias no lineales. Un método para compensar estas deficiencias es la propagación posterior digital (Digital back propagation, DBP), con una adaptación propuesta recientemente denominada propagación posterior digital ponderada (weighted Digital back propagation, W-DBP). Otro método es basado sobre la función de transferencia de la serie volterra (VSTF).

Función de transferencia de la serie Volterra

La serie Volterra es un modelo basado en la perturbación que se describe mediante la ecuación 3.1 para un sistema no lineal inverso que permite la compensación de una fibra óptica. El núcleo de primer orden K_1, representa la parte lineal y los ordenes superiores representan no linealidades.

$$A(\omega_n,0) = K_1(\omega_n)A(\omega_n) + \sum_{i}^{1}\sum_{j}^{n} K_3(\omega_i,\omega_j,\omega_{n-i+j})A(\omega_i)A*(\omega_j)A(\omega_i,\omega_j,\omega_{n-i+j}) \tag{3.1}$$

Experimento

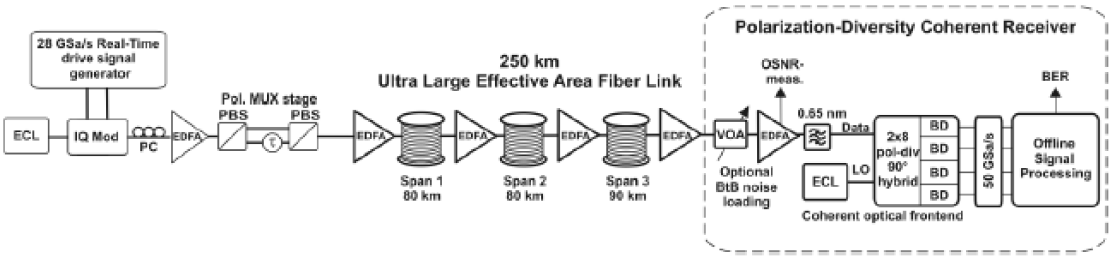


Figura 3.1 Configuración de enlace para 224 Gb / s PolMux-16QAM más de 250 km ULAF [18].

Se aplica el esquema de compensación no lineal basado en la Función de Transferencia de la Serie Volterra (VSTF), a datos generados experimentalmente por un sistema de transmisión óptica 28 Gbaud PolMux-16QAM (224 Gb / s) en más de 250 km de fibra de área ultralarga, ver figura 3.1.

Resultados

En la figura 3.2 se puede ver que la compensación basada en la serie Volterra proporciona un aumento de hasta 2 dB en la tolerancia de potencia que compara el rendimiento del método LC a 5 dBm con una BER equivalente proporcionada por VSTF a 7 dBm. Se ha demostrado que el VSTF puede proporcionar al menos resultados equivalentes al estándar DBP en simulaciones de polarización única. Una de las ventajas de VSTF es la opción de desactivar la compensación no lineal según sea necesario debido a la naturaleza de Volterra como modelo basado en perturbaciones, además es ventajoso que pueda proporcionar un rendimiento óptimo con 2 muestras por símbolo

en comparación con el requisito de DBP de 3 muestras por símbolo.

En conclusión en el trabajo de [18] mostraron que un algoritmo basado en el VSTF es comparable con el estándar DBP y el algoritmo W-DBP.

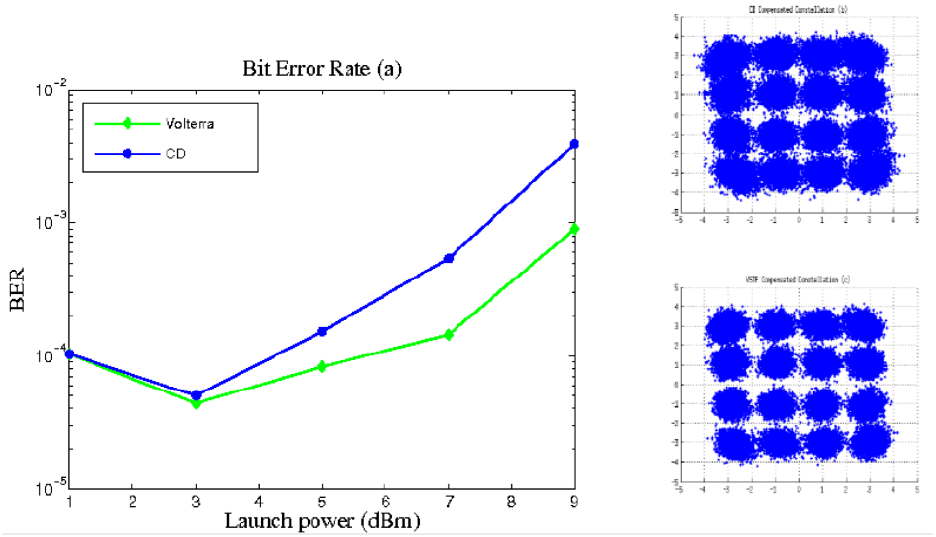


Figura 3.2 Rendimiento BER de varios algoritmos DSP en una escala logarítmica invertida en función de la potencia inicial en más de 250 km ULAF (a). Constelación Compensada por CD (b), Constelación Compensada por VSTF (c) [18].

3.2. Rendimiento de transmisión de la señal POLMUX QPSK de 112 Gb/s en el sistema WDM OOK/DPSK

En este articulo desarrollado por [19], se ha investigado el impacto de la modulación de fase cruzada (cross-phase modulation, XPM) y la modulación de polarización cruzada (XpolM) en la transmisión de la señal de desplazamiento de fase en cuadratura multiplexada por polarización de 112 Gb/s (POLMUX QPSK) en un sistema de multiplexación por división de longitud de onda (WDM). Este sistema WDM se compone de modulación digital de amplitud (keying on-off, OOK) o canales de modulación por desplazamiento diferencial de fase (DPSK). Se observa que los efectos de XPM y XpolM se reducen en gran medida en un sistema híbrido de copropagación de canales OOK y DPSK. Esto se debe al predominio de la modulación de fase de las señales DPSK en lugar de a las señales OOK moduladas por intensidad. La magnitud del vector de error

(EVM) de la señal óptica recibida se evalúa para determinar el aumento en el número de canales OOK y DPSK vecinos, respectivamente, dentro de un ancho de banda de 350 GHz. Además, el efecto del aumento en la tasa de bits para dos canales vecinos OOK y DPSK se ha observado individualmente en la señal POLMUX QPSK a 112 Gb/s. Se concluye que las señales DPSK muestran una mejora de -9.44 dB en EVM sobre señales OOK cuando hay ocho canales vecinos en el sistema de transmisión.

Actualmente los formatos de modulación que usan señales de multiplexación de polarización (POLMUX) parecen ser un buen candidato para sistemas de transmisión DWDM espectralmente eficientes con velocidades de bits altas de 40 Gb/s y 100 Gb/s. En comparación con los formatos convencionales que no son POLMUX, las señales POLMUX permiten grandes tolerancias a la dispersión del modo de polarización (PMD) y la dispersión cromática (CD) así como a la eficiencia espectral duplicada debido a su grado adicional de libertad en el dominio de polarización. espectralmente eficientes con velocidades de bits altas de 40 Gb/s y 100 Gb/s. En comparación con los formatos convencionales que no son POLMUX, las señales POLMUX permiten grandes tolerancias a la dispersión del modo de polarización (PMD) y la dispersión cromática (CD) así como a la eficiencia espectral duplicada debido a su grado adicional de libertad en el dominio de polarización.

En el trabajo de [20] demostraron que la penalización de QPSK debido a XPM se reduce con el aumento en la velocidad en baudios de QPSK por el proceso de estimación de fase. Y han concluido que a la misma velocidad en baudios, el DQPSK incoherente se ve menos afectado por XPM que el QPSK coherente cuando se realiza la estimación de avance.

Para las señales POLMUX QPSK, hay desvanecimiento y diafonía de canal debido a la despolarización de la señal transmitida causada por la rápida polarización-modulación de las señales, lo que resulta en XpolM.

La Figura 3.3 muestra los espectros ópticos individuales de 112 Gb / s de la señal POLMUX QPSK junto con los dos canales OOK de copropagación a 10 Gb / s con un espaciamiento de canal de 50 GHz entre los canales OOK, luego de la multiplexación de las señales en el lado del transmisor. La simulación proporciona la medición de la potencia óptica en función de la frecuencia con respecto a 193.325 THz. Para la señal POLMUX QPSK, el lóbulo principal es más amplio y los lóbulos laterales son clara-

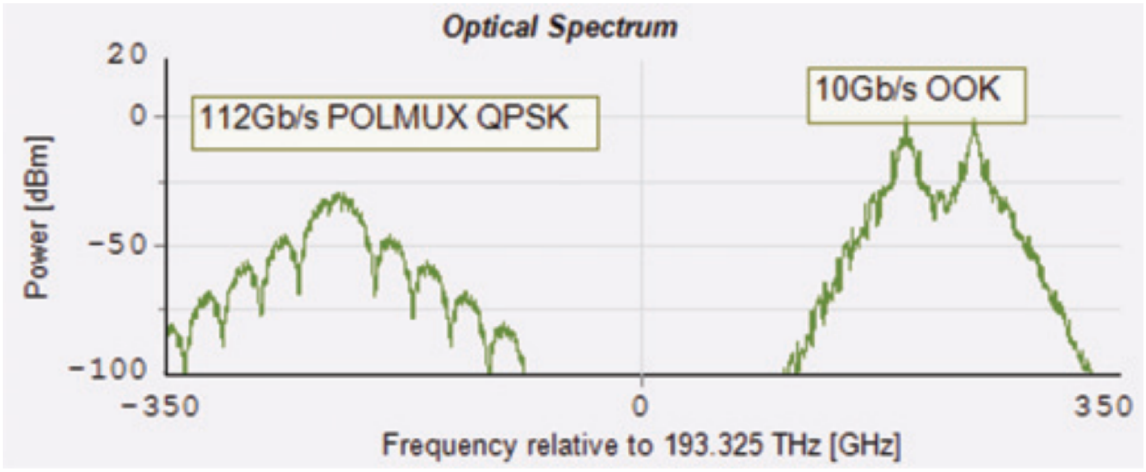


Figura 3.3 Espectro óptico de 112 Gb / s POLMUX QPSK y dos canales OOK de copropagación después de la multiplexación [19].

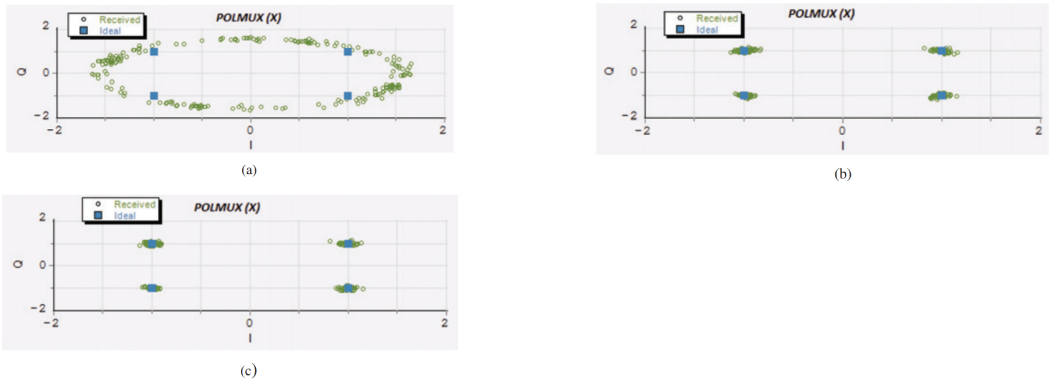


Figura 3.4 Diagrama de constelación ideal y recibido para a) Canales OOK b) Canales DPSK c) Sistema WDM híbrido OOK y DPSK a 10 Gb/s [19].

mente visibles incluso a una velocidad de bits de 112 Gb/s mientras que en el espectro óptico de las señales OOK, el lóbulo principal es mucho más estrecho y los lóbulos laterales no claramente definido a una tasa de bits de 10 Gb/s. Además, hay una ligera superposición de los lóbulos laterales en OOK debido a un menor espacio entre ellos. Es decir que en los datos recibidos por el receptor para la los canales OOK descritos exista un una gran dispersión, mientras que para canales DPSK y WDM híbridos DPSK-OOK se logre una muy buena aproximación en la constelación recibida figura 3.4.

EVM se utiliza como un parámetro de evaluación para comparar el efecto del aumento en el número de canales vecinos OOK/DPSK (Figura 3.5) respectivamente dentro de un ancho de banda de 350 GHz. Es mucho más grande cuando el número

de canales OOK se incrementa de dos a ocho, que el EVM para el mismo número de canales DPSK. Para ocho números de canales que se propagan conjuntamente, las señales DPSK muestran una mejora de -9,44 dB en EVM con respecto a las señales OOK. Se ha estudiado el impacto del aumento de la velocidad de bits para dos canales vecinos OOK y DPSK en señales de 112 Gb/s POLMUX QPSK (Figura 3.5). Muestra una tendencia creciente para los canales OOK y DPSK cuando la velocidad de bits se mejora de 10 Gb/s a 100 GB/s, pero se encuentra que EVM para OOK es mayor que los canales DPSK. Hay una mejora de -26.9 dB en EVM para canales DPSK a través de canales OOK a 100 Gb/s . Además, proponemos un sistema WDM híbrido de canales vecinos OOK y DPSK alternativos en el que los efectos de XPM y XpolM se reducen en gran medida. Sin embargo, aún se requieren mejoras en las tolerancias de transmisión de las señales POLMUX, lo que representa un gran desafío.

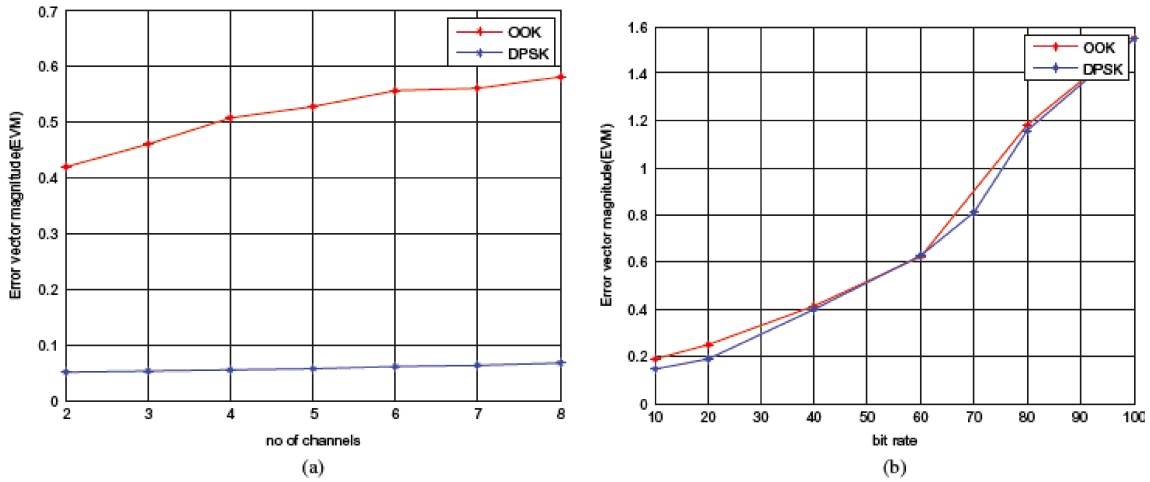


Figura 3.5 a) EVM de señal recibida usando QPSK POLMUX de 112 Gb/s vs nÚmero de canales y b) EVM de señal recibida usando QPSK POLMUX de 112 Gb/s vs tasa de bit [19].

3.3. Transmisión de doble portadora a 448 Gb/s con POLMUX-16QAM a más de 1230 km con pasos entre redes ROADM

Uno de los inconvenientes de los sistemas de comunicaciones son las distancias de los enlaces, por ello el articulo que trabaja [21] establece que las soluciones de transporte 100G bien establecidas, existe la necesidad de comprender cómo las redes

ópticas de malla pueden evolucionar a tasas de línea de 400G y más. Aumentando la eficiencia espectral a través del uso más denso de los formatos de modulación, históricamente el método más efectivo para lograr mayores capacidades de transmisión a costo comparable o menor por bit transmitido. Por ejemplo, escalando desde la cuadratura multiplexada por polarización modulación de cambio de fase (POLMUX-QPSK) a modulación de amplitud en cuadratura de 16 niveles (POLMUX-16QAM) Figura 3.6, incluso constelaciones QAM más densas, varios experimentos de transmisión con velocidades de línea de 400G y más allá han sido reportados con eficiencias espectrales tan altas como 8.37 $b/s/Hz$. Sin embargo, la mayoría de estos experimentos de transmisión consideran enlaces punto a punto sin adición óptica en línea configurable de forma remota (ROADM), que permite el uso de todo el espectro óptico disponible (Redes desplegadas), por otro lado, típicamente tienen una arquitectura de red mallada donde la señal necesita pasar múltiples ROADM a lo largo del enlace, que requiere filtrado óptico en línea.

Un enfoque particularmente prometedor para realizar las tasas de línea 400G de forma más rentable es el uso de dos operadores Modulación POLMUX-16QAM Figura 3.6, ya que esto requiere la modulación de solo dos portadoras ópticas y reutiliza la óptica y componentes eléctricos desarrollados para la modulación 100G POLMUX-QPSK. En este trabajo se demuestra la transmisión de 448-Gb / s de doble portadora POLMUX-16QAM en una red de 87,5 GHz a lo largo de 1230 km y 5 Nodos en cascada ROADM. Esto permite una eficiencia espectral de 4.8 b / s / Hz y demuestra la viabilidad de la próxima generación de transporte utilizando tecnología de velocidad flexible en una infraestructura optimizada de fibra [21]

3.4. Análisis y diseño de un sistema de centralización de fuentes ópticas

En esta monografía [22], tratan sobre el diseño de una red, en la cual se quiere eliminar una de las fuentes ópticas que se tienen en el lugar del usuario, lo cual hizo pensar que era necesario utilizar las propiedades de la polarización de la luz para poder descomponerla en onda transversal Eléctrica(TE) y transversal Magnética(TM). La red propuesta se fundamenta en la arquitectura típica de una PON actual teniendo en cuenta que el objetivo principal es aprovechar de la forma más eficiente la potencia suministrada por la fuente óptica garantizando un BER aproximado de $1x10^9$; ya que el peor BER que se debe garantizar según la recomendación CTI (Common Telecom-

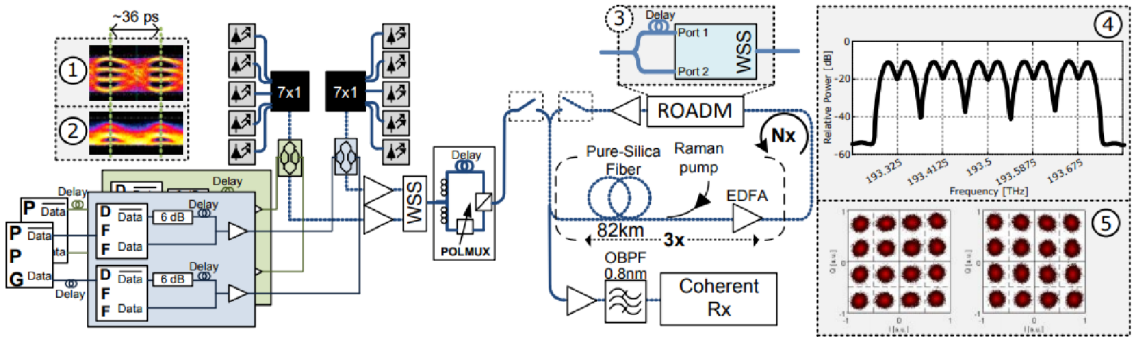


Figura 3.6 Configuración Experimental. 1: 4-PAM Eléctrico después de amplificar (2.6 Vpp). 2: Diagrama de ojo 16-QAM. 3: 'ROADM', configuración flexi-grid WSS para emular un multiplexor óptico remoto. 4: Espectro óptico y Transmisor después de (POLMUX). 5: Constelación completa OSNR para una portadora (Polarización 'x' y 'y') [21].

munications Infrastructure) es de $1x10^7$.

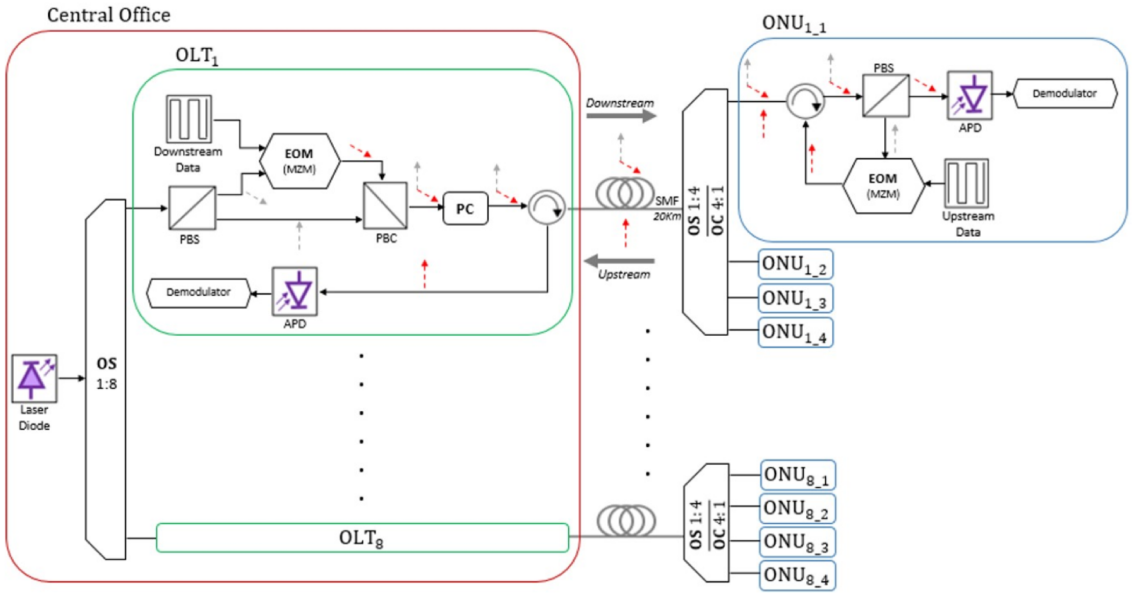


Figura 3.7 Esquema general de la PON propuesta [22].

Como se observa en la figura 3.7 la red consta de una OLT capaz de suministrar información en condiciones adecuadas de calidad de servicio a 8 ONUs distintas haciendo uso de un único diodo láser. La OLT consta de un láser para la generación de la longitud de onda (λ) con que se está realizando el proceso de comunicación, una etapa de división de las componentes ortogonales de polarización de la λ y modulación

para una de las mismas, y una etapa de recepción con un demodulador. Cada ONU consta de una etapa de división de las componentes ortogonales de polarización y una etapa de demodulación para una de las mismas, además de una etapa de modulación para la componente de polarización que sea utilizada para enviar la información de upstream. Vale la pena mencionar que cada ONU se conecta con la OLT mediante un solo hilo de fibra que se encarga de hacer la comunicación bidireccional.

Escogieron un diodo láser DFB como fuente óptica ya que requieren un nivel de potencia estable y un haz de luz con alta directividad dado que se utilizó fibra óptica monomodo con una longitud de 20 km. Este láser esta sintonizado a una λ=1550 nm y suministra 10 dBm de potencia ya que este valor se encuentra dentro de los parámetros comerciales usados para PONs actualmente; el haz de luz se dirige a un PBS (Polarization Beam Splitter) de donde salen dos componentes polarizadas ortogonales y separadas. La componente λ_{down} es utilizada como portadora de información de downstream, por lo que el PBS la dirige a un EOM (Electro-Optical Modulator) para que sea cargada con dicha información (Downstream Data). El modulador utilizado es un MZM (Mach-Zehnder Modulator), el cual realiza una modulación en amplitud y se encarga de cargar la portadora down para que esta posteriormente se dirija a un PBC (Polarization Beam Combiner) y sea combinada con la portadora λ_{up} sin información, ya que viene directamente del PBS. Cuando se combinan las portadoras (λ_{up} sin información y λ_{down} cargada con información) estas pasan a un PC (Polarization Controler) para garantizar una PER (Polarization Extinction Ratio) minima de 30 dB entre ellas. El circulador se utiliza para controlar el sentido de viaje de las portadoras combinadas (downstream) o de la única portadora proveniente de la ONU up (upstream). Las portadoras combinadas viajan a traves de de 20 Km de fibra óptica monomodo (SMF) hasta llegar a un OS 1:8/OC 8:1 (Optical Splitter 1:8 / Optical Combiner 8:1) Figura 3.7, el cual actua como divisor 1:8 en downstream. Por medio de TDM se envían las portadoras combinadas a la ONU que corresponda [22].

Una vez las portadoras combinadas llegan a la ONU correspondiente, atraviesan un circulador que determina si el sentido de la comunicación es downstream o upstream; en downstream, se dirigen a un PBS para que sean separadas y λ_{down} se dirija a un APD para que la portadora sea demodulada y se obtenga la información de downstream. Por el contrario, λ_{up} se dirige a un MZM para que sea cargada con la información de upstream. La portadora de upstream λ_{up} luego de ser cargada se dirige al circulador de la ONU para luego ir al OS 1:8/OC 8:1 que en upstream funciona como combinador

8:1. La portadora λ_{up} viaja por los 20 km de SMF desde la ONU hasta la OLT, donde luego el circulador la envía hacia el APD para que la información de upstream pueda ser obtenida luego de demodular la señal. Vale la pena aclarar que por medio de TDM se envían las portadoras de upstream cargadas de cada ONU hacia la OLT en diferentes instantes de tiempo [22].

Capítulo 4

Desarrollo

4.1. Componentes de simulación de la Red

Para la simulación en OptiSystem se implementaron una serie de componentes definidos como bloques dentro del software, esenciales para el funcionamiento de la red planteada. dichos bloques son:

4.1.1. Diodo emisor láser

Como se aprecia en la figura 4.1, este elemento es la fuente emisora de luz, la cual se encarga de generar la señal portadora fundamental para todo el sistema.

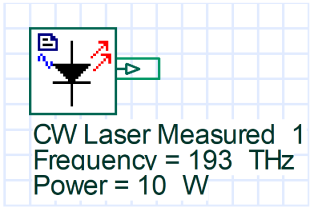


Figura 4.1 Diodo Láser

A nivel comercial se pueden encontrar láseres para sistemas ópticos con diferentes especificaciones, de las cuales las más relevantes a tener en cuenta son la potencia y longitud de onda, en la tabla 4.1 se encuentran estas características.

La frecuencia de la onda electromagnética utilizada como portadora en sistemas ópticos de telecomunicaciones es alrededor de 193 THz, por ende la longitud de onda es aproximadamente 1550 nm (ecuación 4.1).

$$\lambda = \frac{3x10^{8}m/s}{193x10^{12}Hz} \approx 1550nm \tag{4.1}$$

Especificaciones para láseres comerciales	
λ (nm)	Potencia (mW)
375	20, 70
395	120
405	60, 120, 300
415	120
425	120
445	50, 100
457	100
460	100
473	20, 80, 100, 300
488	20, 60, 80, 100, 150, 200
505	80
515	25, 50, 80, 100, 150
532	50, 80, 100, 150
552	20, 60, 80, 100, 150
561	20, 50, 80, 100, 150
594	60, 100
633	100
638	40, 100, 150, 200
642	140
647	140
660	130
685	50
705	40
730	40
785	120, 200
808	140
830	140
850	100
945	200
980	100
1030	150
1060	150
1080	80
1310	50
1550	100

Tabla 4.1 Longitudes de onda y potencias para láseres comerciales [23].

La elección de esta longitud de onda se debe a los procesos de fabricación de la fibra óptica, en la figura 4.2, se puede evidenciar la atenuación de potencia de fibra ante las diferentes perdidas de absorción y dispersión, quedando ventanas de baja atenuación en 1310 nm y 1550 nm.

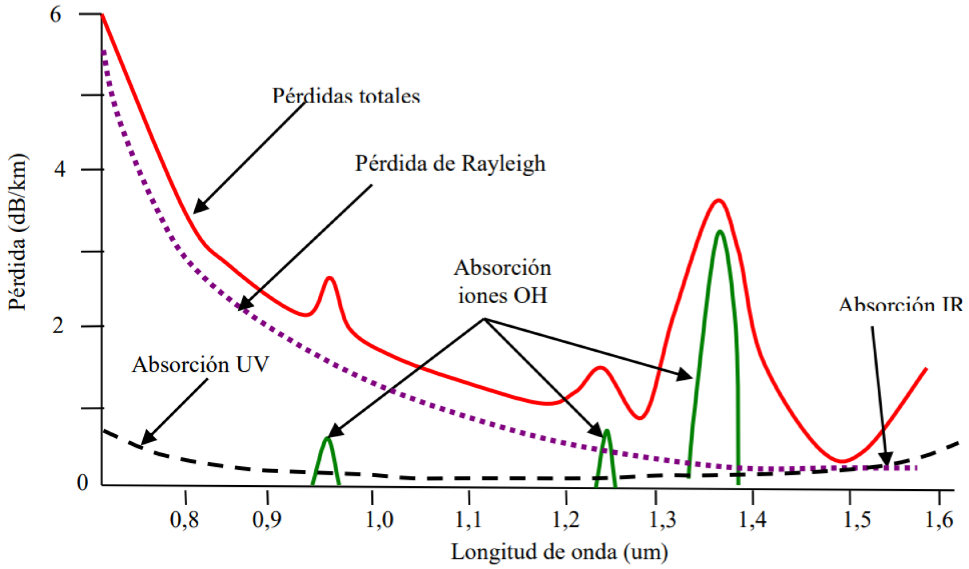


Figura 4.2 Curva de atenuación de una fibra óptica debida a absorción y dispersión.

4.1.2. Divisor de potencia o Splitter

Un splitter hace la división de la señal que entra por su fibra, de forma que en cada fibra de salida se distribuye un nivel de señal proporcional a la cantidad de divisiones. Por cada división que ocurre la potencia de la señal a la salida cae en 3 dB como se muestra en la figura 4.3 o exactamente las perdidas 'L' se determinan por la ecuación 4.2, para un número 'n' de salidas.

$$L = 10 \times log(1/n) \tag{4.2}$$

Conforme a las técnicas de fabricación, los splitters utilizados en fibra óptica se pueden clasificar en dos tipos [24]:

- FBT (Fused Biconical Taper) splitter
- PLC (Planar Lightwave Circuit) splitter

Etapas de División (n)	Tasa de Splitting	Pérdidas por división
1	1:2	3 dB
2	1:4	6 dB
3	1:8	9 dB
4	1:16	12 dB

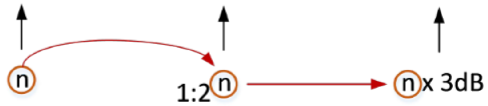


Figura 4.3 Perdidas por división de potencia [24].

FBT (Fused Biconical Taper) splitter

Está hecho de materiales que están fácilmente disponibles, y de bajo precio, que determina el bajo coste del propio dispositivo. La tecnología de fabricación es relativamente simple, lo cual tiene un impacto en su precio final. La Figura 4.4 muestra como es internamente este tipo de splitter [24].

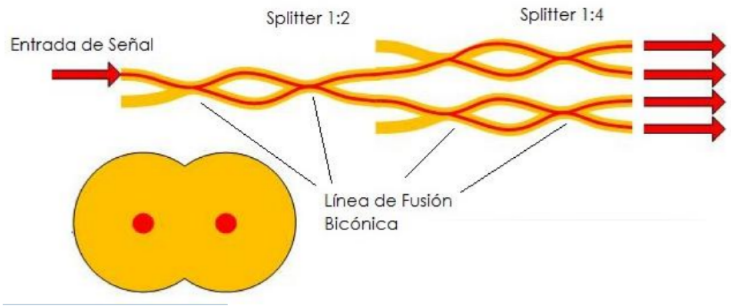


Figura 4.4 Característica interna de un Splitter tipo FBT (splitter 1:4) [24].

Este producto es especialmente adecuado para casos en los que la configuración de división es asimétrica (por ejemplo, para un splitter 1:2 tendremos en una de las salidas un 90 % de la señal y en la otra el 10 %), o en tasas de división del tipo 1:3 o 1:7 (del tipo customizable), y también en configuraciones de división más pequeñas, como 1:2 o 1:4 (sin embargo, se fabrican hasta 1:32), ya que, en escenarios de despliegue en campo donde se requieren múltiples divisiones, el tamaño del dispositivo puede ser un problema (en armarios, cámaras de registro o cajas CTO).Los splitters FBT sólo admiten, con relativa eficiencia, tres longitudes de onda: 850nm,1310nm y 1550 nm, limitando su operación en escenarios donde se requiere operar en otras longitudes de onda. Generalmente poseen un rango de trabajo estable entre -5 y 75º C [24].

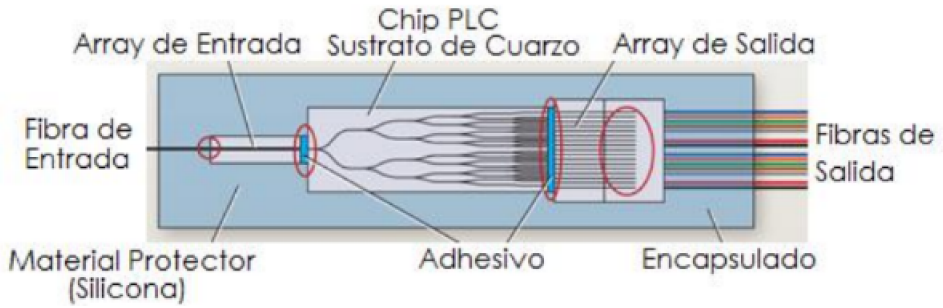
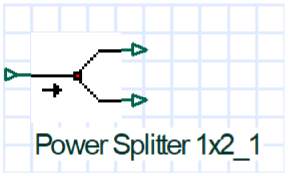


Figura 4.5 Estructura Interna de un splitter PLC [24].

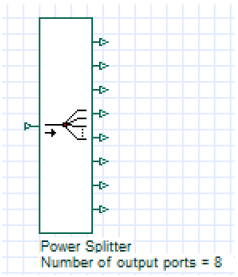
PLC (Planar Lightwave Circuit) splitter

La tecnología de fabricación de un splitter PLC es más compleja. Es un dispositivo de guía de ondas que utiliza la tecnología de producción de semiconductores (litografía), basado en sustratos de cuarzo, silicona y otros materiales, que se utilizan para el acoplamiento de la señal, su división y conducción hacia las diferentes salidas. Por lo tanto, el precio del dispositivo es mayor. El splitter PLC cuenta con una baja sensibilidad a la longitud de onda (lo cual le permite una amplia gama de longitudes de onda), tamaño reducido (en comparación con divisores FBT), alta con fiabilidad, y uniformidad en el proceso de división. El splitter PLC opera en un más amplio rango de temperaturas(-40 a 85 C), lo que permite su despliegue en áreas de clima extremo. La relación de división es mayor (1:64 o 1:128), con una alta fiabilidad. Este tipo de splitters son no customizables (sus salidas son siempre una potencia de dos, 1:2, 1:4, 1:8....1:128), y son simétricos (la señal es dividida en partes iguales) debido a la tecnología implementada. En este aspecto, los PLC no serían la elección cuando se trata de customizar u obtener salidas asimétricas. La figura 4.5 muestra la estructura interna de un splitter PLC, en la cual se observa como se efectúa la división de la señal (en potencias de 2). Los splitters PLC pueden operar entre 1260nm y 1650 nm, por lo que las longitudes de onda son ajustables en una amplia gama [24].

Los splitter implementados a nivel de simulación se muestran en la figura 4.6 y corresponden a splitters PLC, debido a que sus salidas son balanceadas, igualmente es importante saber que se cuentan con perdidas de 3 dB denominadas perdidas de inserción y corresponden a un consumo del dispositivo al ser un componente pasivo. Por otra parte, en la figura 4.6 el splitter de salidas variables que se muestra, será determinante en la simulación del sistema dada su facilidad para configurar el número de canales.



(a) Salidas fijas



(b) Salidas variables

Figura 4.6 Divisor de potencia.

4.1.3. Divisor de polarización

En la figura 4.7 se observa el modulo que se encarga de separar las componentes transversal eléctrica (TE) y transversal magnética (TM) de la señal entrante.

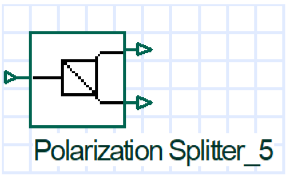


Figura 4.7 Divisor de polarización.

La potencia entregada a las componentes separadas TE y TM, se da por la ecuación 4.3, y dependerá del ángulo configurado en este componente

$$P_{TM} = P_T \cdot Cos^2(\Phi), \qquad P_{TE} = P_T \cdot Sen^2(\Phi) \tag{4.3}$$

donde :

- P_T= Potencia Total
- P_{TM}= Potencia de la componente transversal magnética.
- P_{TE}= Potencia de la componente transversal eléctrica.
- Φ = Ángulo del componente.

4.1.4. Generador de números aleatorios

El bloque de la figura 4.8, es el encargado de generar señales digitales o pulsos binarios de manera aleatoria, en este dispositivo se considera la tasa de bits que serán

transmitidos, para el caso de 5G, se puede considerar una tasa de transmisión de 20 GHz, ya que el generador permite esta magnitud de valores.

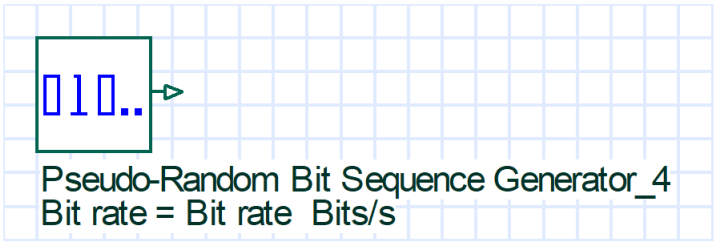


Figura 4.8 Generador de números aleatorios.

4.1.5. Generador de pulsos NZR

En la figura 4.9 se muestra el generador de pulsos NRZ, este se encarga de tomar la señal pseudo-aleatoria proveniente del generador de secuencia de bits figura4.8 y convierte la señal digital a señal eléctrica donde el voltaje no vuelve a cero entre bits consecutivos de valor uno. La naturaleza eléctrica de la señal generad será suministrada modulador FM figura 4.10.

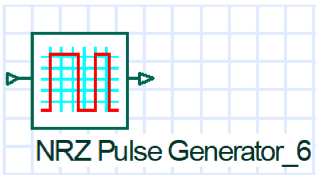


Figura 4.9 NZR.

4.1.6. Modulador FM

El bloque de la figura 4.10, es el modulador FM empleado, con entradas de señales ópticas para la señal portadora y la señal moduladora. Para la simulación se ha asumido

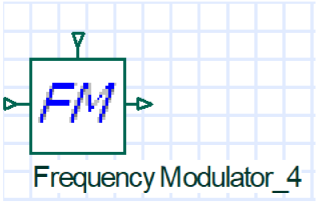


Figura 4.10 Modulador FM.

4.1.7. Filtro

El modelo de filtro observado en la figura 4.11, actúa como un pasabanda óptico el cual permite el paso de longitudes de ondas especificas rechazando las demás y llega a contar con perdidas de inserción de 3 dBm.

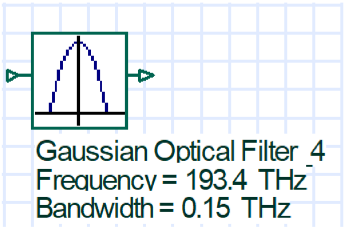


Figura 4.11 Filtro Gaussiano.

4.1.8. Combinador de polarización

La figura 4.12, es el bloque encargado de tomar las componentes transversales eléctricas y magnéticas ópticas para combinarlas en una única señal óptica.

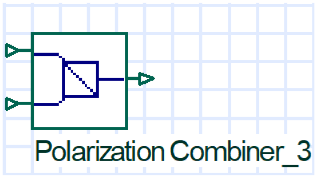


Figura 4.12 Combinador de polarización.

4.1.9. Combinador de potencia

El bloque mostrado en la figura 4.24, es el encargado de combinar dos señales de diferentes frecuencias en una única señal para se enviada en una linea de transmisión. Su principio es el inverso al del divisor de potencia presentado en la subsección 4.1.2, e implica el uso invertido de este, consiguiendo la suma de las potencias de entrada en su terminal de salida.

4.1.10. Fibra óptica monomodo

En la figura 4.14, se muestra el bloque que emula fibra del tipo monomodo, en un solo sentido de flujo de información. Este componente ha sido expuesto en la sección 2.2.3.

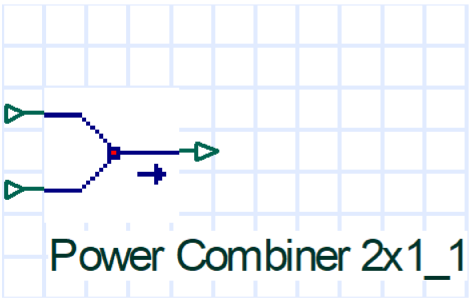


Figura 4.13 Combinador de potencia.

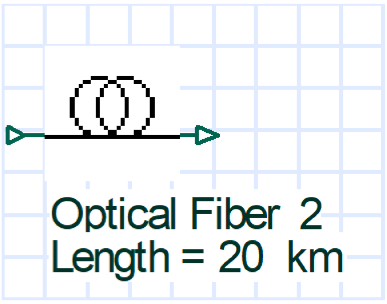


Figura 4.14 Fibra óptica monomodo.

4.1.11. Diodo fotodetector

Este bloque observado en la figura 4.15, es el receptor óptico, el cual al recibir una señal óptica modulada este la demodula y la convierte en una señal eléctrica, se caracteriza por su responsibidad y corriente de oscuridad.

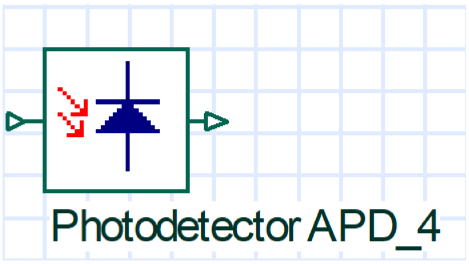


Figura 4.15 Fotodetector.

4.1.12. Regenerador de información y analizador de BER

El regenerador de la figura4.16 se encarga de procesar y reconstruir una señal eléctrica deformada por el transporte y manipulación de esta. Este dispositivo brinda tres señales, la secuencia de bits, y dos señales eléctricas, la recuperada y la recibida,

las cuales son utilizadas por el analizador de BER figura 4.17, el cual estima la tasa de error de bits recibida y muestra su diagrama de ojo.

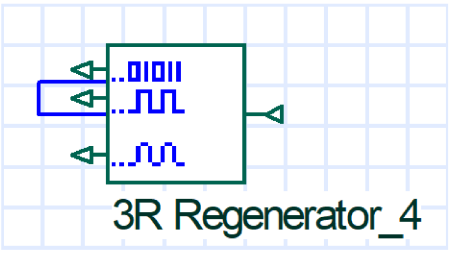


Figura 4.16 Regenerador de información.

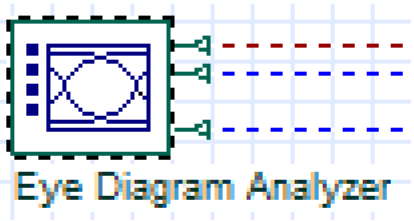


Figura 4.17 Analizador de BER.

4.2. Simulación

4.2.1. Consideraciones para la simulación

En las pruebas que se realizarán sobre las ONU's, se consideran únicamente los receptores de la primer ONU, debido a que la potencia sobre cada una es distribuida de forma similar y se obtienen resultados semejantes. El DSP para la recuperación de la señal es ideal, no obstante brinda la información correcta al analizador de diagrama de ojo, donde se evidenciará el comportamiento de la señal en los receptores. No se utiliza la fibra bidireccional, y esta es reemplazada por dos fibras monomodo, una para la subida y otra para la bajada, con el fin de evitar problemas en la simulación debido a posibles colisiones de las señales, y al no implementar la fibra bidireccional no es necesario el uso de los circuladores. La razón principal para obviar la fibra bidireccional, es la implementación de un algoritmo de MatLab el cual posteriormente se utilizará para la ejecución de múltiples configuraciones del sistema, y los errores ocasionales sobre la fibra bidireccional no permiten la finalización de la simulación cooperativa.

Para que los receptores APD tuvieran características similares a un APD real, fue necesario considerar una responsibidad de 0.65, debido a que el sistema no permite la

configuración de la sensibilidad que es de -50 dBm, sin embargo la responsividad de 0.65 permite que este elemento se comporte con una capacidad de respuesta limitada, afectando la señal recibida, como lo haría un APD en la realidad.

En las simulaciones sobre el diseño propuesto se tomó como factor determinante el BER de las señales de subida, debido a que la señal debe recorrer el doble de la distancia configurada en la fibra.

4.2.2. Transmisión y recepción de la señal de bajada

En la figura 4.18 se aprecia la estructura base de la conexión entre una OLT y una ONU, dicha estructura se encarga de solo transmitir la información de bajada hasta la ONU por medio de una linea de transmisión óptica. A continuación se detallara que ocurre en el proceso de transmitir la información hasta la ONU desde la OLT.

Partiendo de que se opera en el dominio óptico, se usa un láser figura 4.19, para generar una portadora a 193 THz o 1550 nm, tercera ventana. Dicha portadora tiene como valor nominal de potencia 20 dBm o 100 mW , potencia usualmente entregada por este tipo de dispositivos a esta frecuencia tabla 4.1.

Con esta portadora se realiza todo el proceso de modulación en transmisión en la OLT y retransmisión en la ONU. Ahora que se ha generado la portadora óptica, se realiza una división en potencia para modular paralelamente dos señales información de bajada. La división en potencia se realiza con un divisor de potencia, el cual divide proporcionalmente la potencia de la señal según el número de canales de salida, para el caso será dos canales de salida, con perdidas dependientes al numero de canales de salida, las perdidas son dadas por la ecuación 4.2 .

Una vez se fracciona la potencia de la portadora en 2, se lleva hasta el divisor de polarización, el cuál toma la onda de luz de la señal portadora y se encarga en sacar sus dos componentes ortogonales, adicionalmente se configura un ángulo de incidencia sobre el dispositivo, el cual permite distribuir la potencia en las componentes TM y TE, mediante la ecuación 4.3. Para el sistema se buscará entregar más potencia a la portadora TM que a la portadora TE figura 4.20.

Obteniendo las dos componentes ortogonales, se toma una señal eléctrica y se modula con la componente transversal magnética la cual tiene mayor potencia mediante un modulador FM, la señal resultante corresponde a la información de bajada.

El resultado de la modulación se puede apreciar en la figura 4.21, ya que gracias al modulador FM, se hace un desplazamiento en frecuencia con respecto a la señal portadora (Δf de $\pm 0{,}4 THz$), dado a que solo se tiene dos bandas laterales.

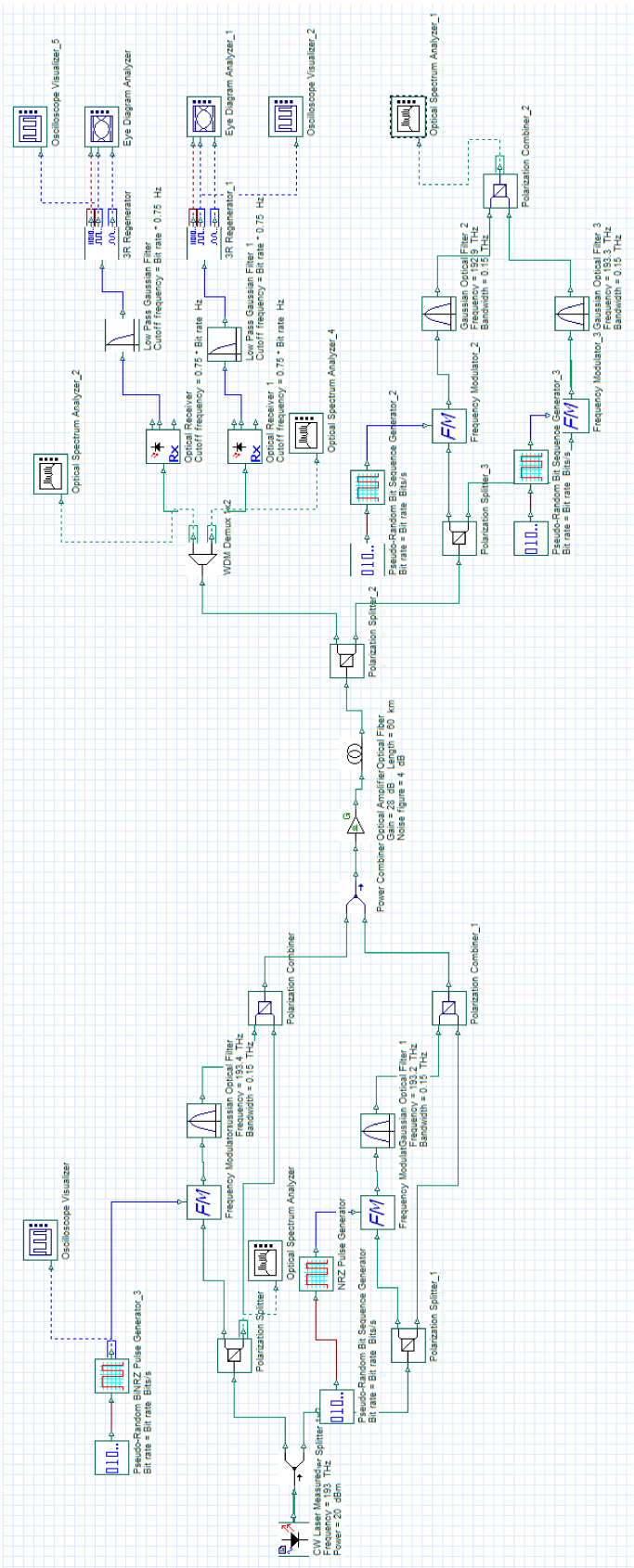


Figura 4.18 Transmisión desde 1 OLT a 1 ONU.

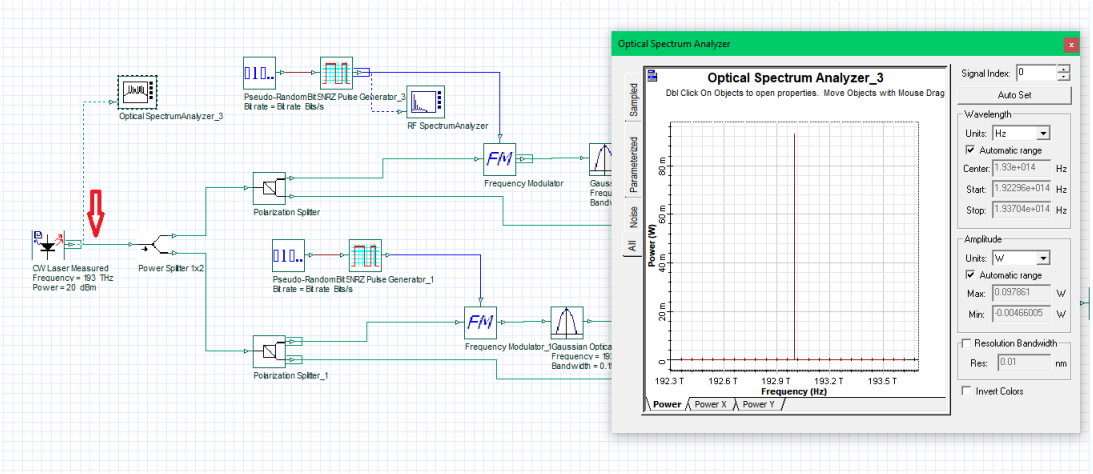


Figura 4.19 Señal Portadora generada por el láser

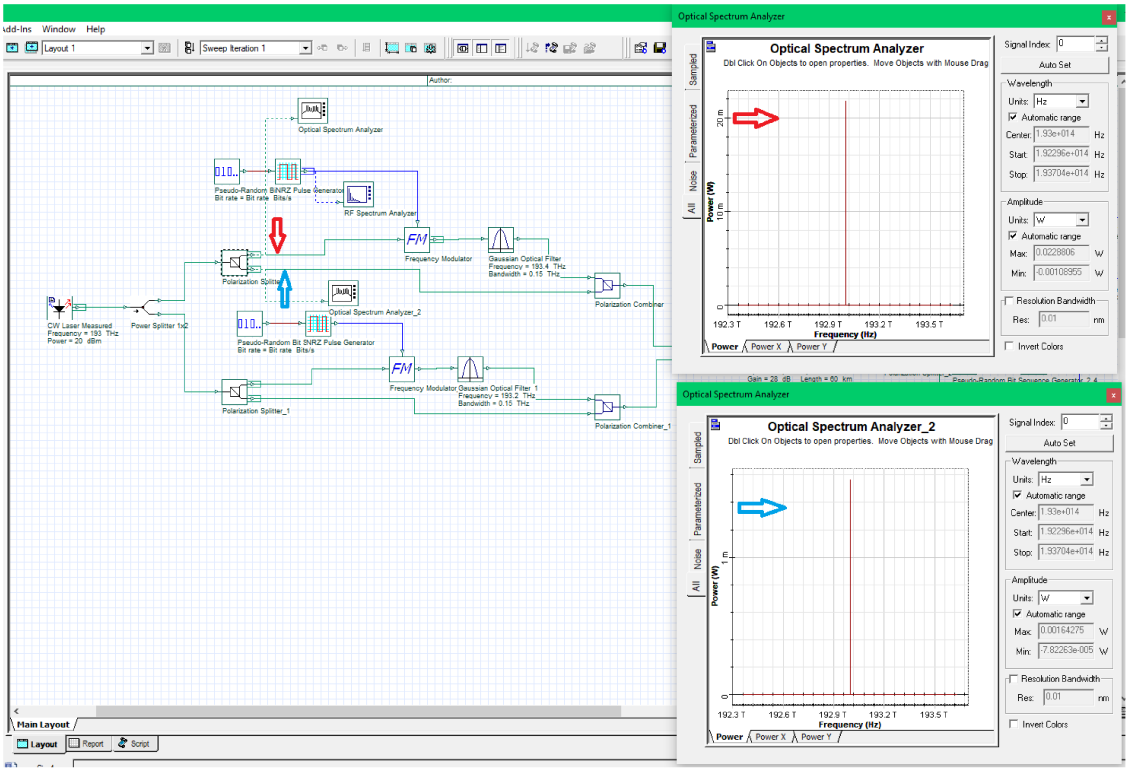


Figura 4.20 Polarización de la señal portadora en dos componentes ortogonales, transversal eléctrica TE (flecha roja) y transversal magnética TM (flecha azul).

Obtenida la modulación se aplica un filtro pasabanda para eliminar la banda lateral inferior como se observa en la figura 4.22.

Al obtener la banda lateral inferior se procede a implementar un combinador de polarización figura 4.23, con el cual se une las componentes ortogonales, una modulada

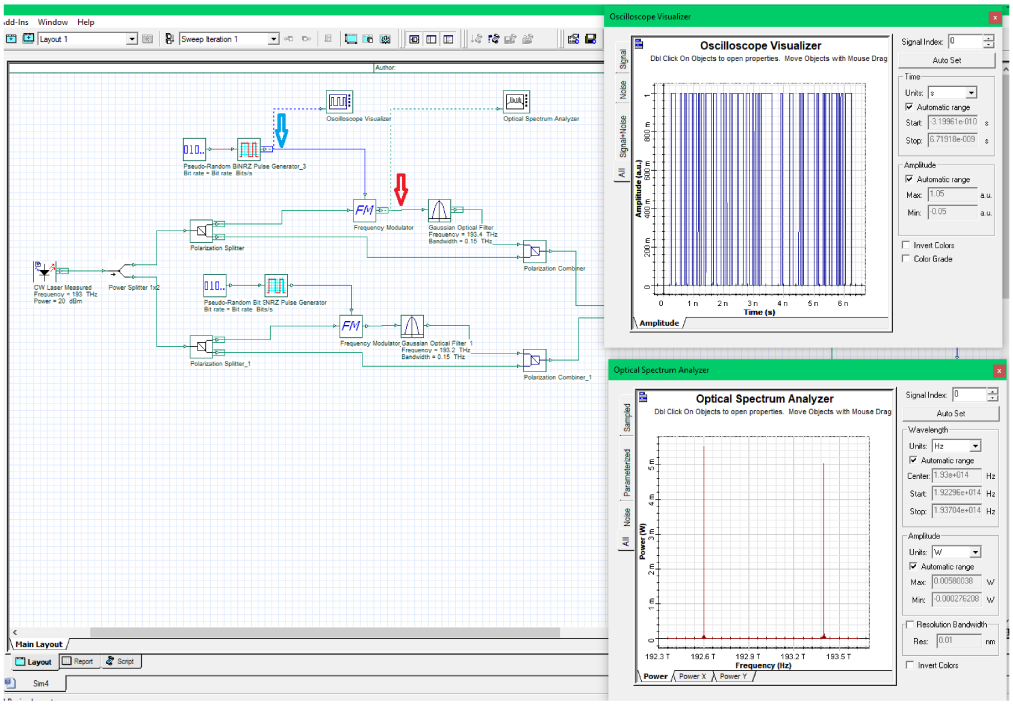


Figura 4.21 Señal Pseudoaletoria (flecha azul) y su modulación en fm con portadora óptica (flecha roja).

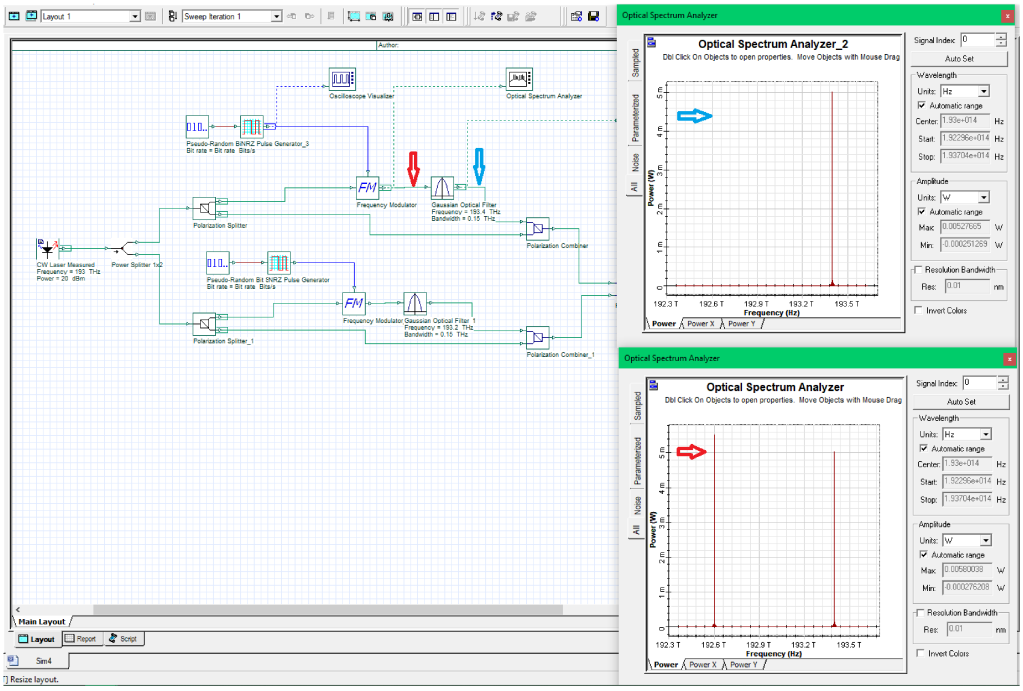


Figura 4.22 Modulación antes (flecha roja) y después de aplicar filtro pasa banda bessel (flecha azul).

y filtrada que es la transversal magnética y la componente transversal eléctrica, a la cual no se le realizó ningún tipo de manipulación.

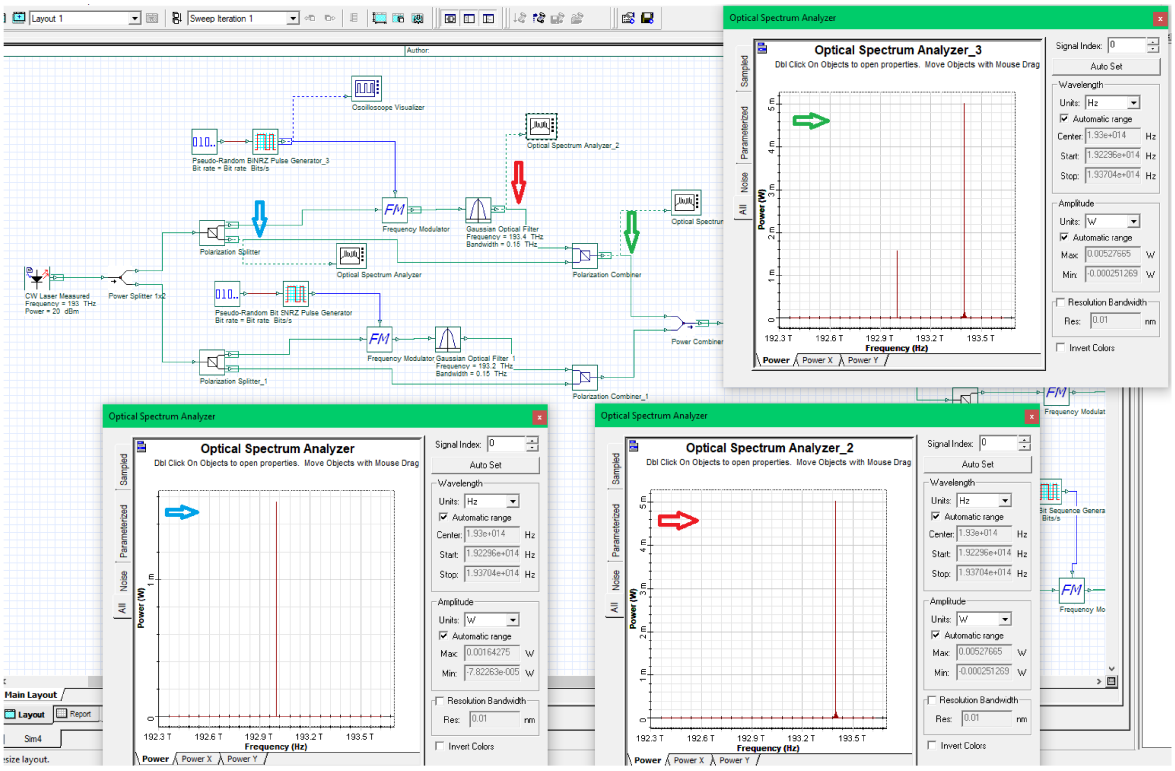


Figura 4.23 Combinación de polarización de las 2 componentes ortogonales (flecha verde), componente TM (flecha roja) y TE (flecha azul).

El proceso de utilizar los combinadores de polarización se realiza dos veces, dado que existe otro servicio similar dentro de la red planteada el cual se modula con un delta de frecuencia (Δf de $\pm 0{,}2THz$), que es diferente al usado en el otro servicio, para luego aplicar un filtro pasabanda eliminando la banda lateral inferior. Para agrupar dichos servicios se implementa un combinador de potencia que unifica las dos señales figura 4.24. Al combinar las dos señales se agrupan las componentes de la portadora fundamental, lo que aumenta la potencia de dicha portadora y combina a las otras dos componentes transversales magnéticas.

Realizada la combinación de potencia, se procede a amplificar la señal para poder ser enviada a través de la linea de transmisión óptica. Después de recorrer el tramo de fibra óptica se debe ser despolarizada figura 4.25, ya que se debe reutilizar la portadora base para volver a modular la información proveniente del usuario. y con la transversal Magnética se obtiene la información para el usuario.

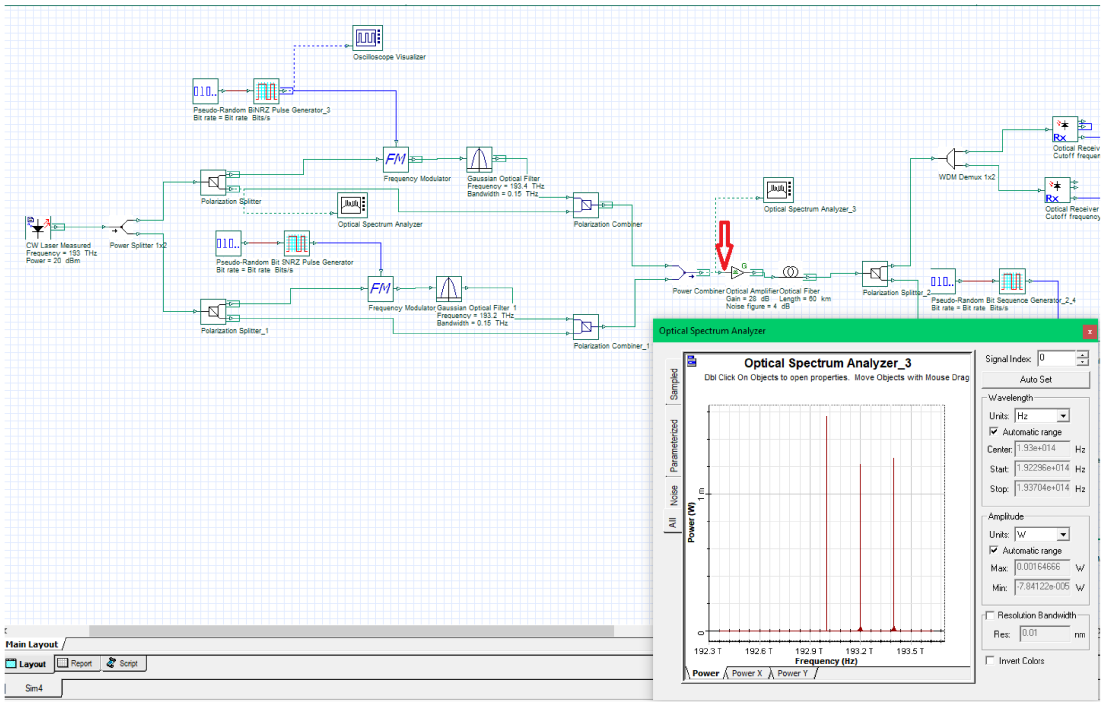


Figura 4.24 Combinación en potencia de los dos procesos de modulación.

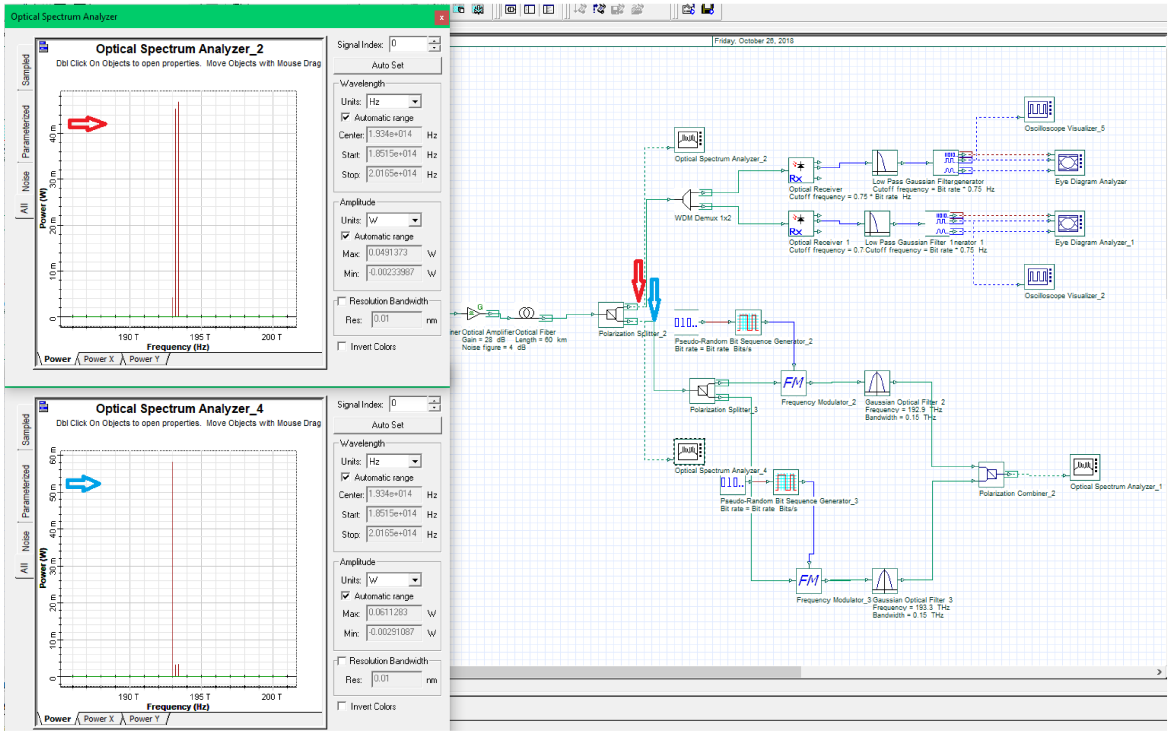


Figura 4.25 Separación de las componentes TM (flecha roja) y TE (flecha azul) de la señal después de recorrer la linea de transmisión.

Al obtener la componente transversal magnética, se debe separar la señal del primer servicio (A) de la del segundo (B), con ayuda de un multiplexor que se ajusta para que en el canal 1 solo salga la información con frecuencia de 193.4 THz y por el canal 2 la información B con frecuencia de 193.2 Thz figura 4.26.

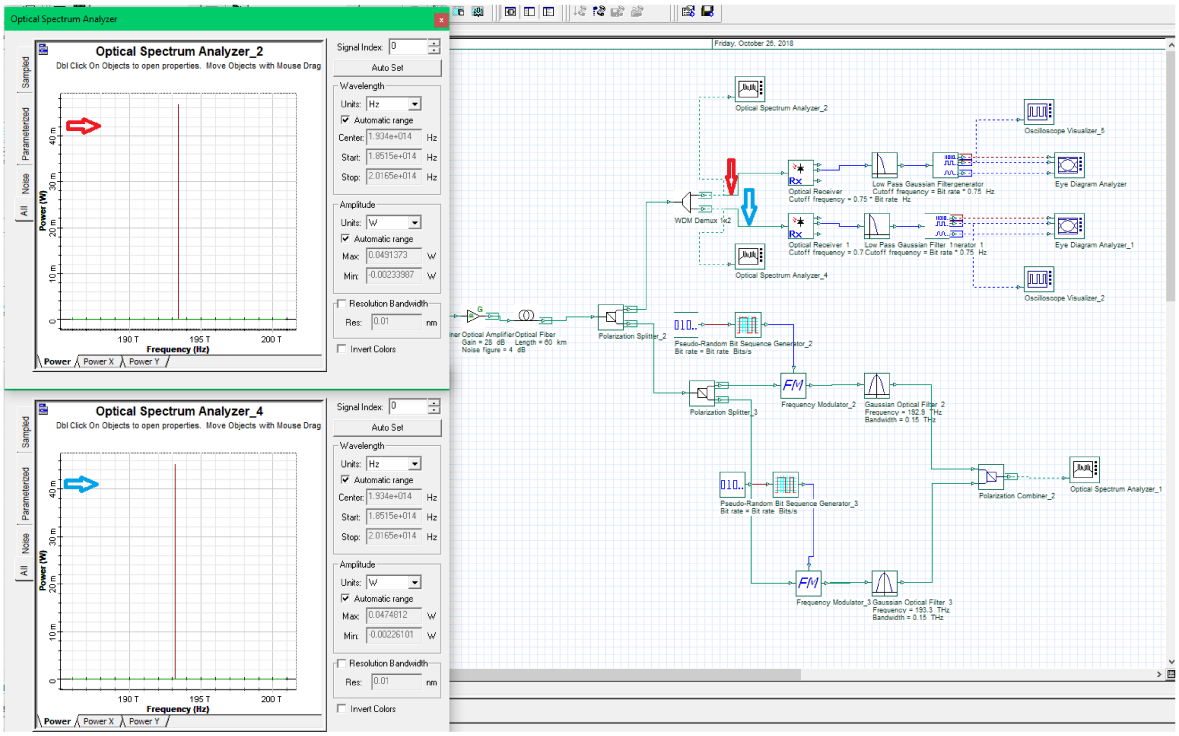


Figura 4.26 Demultiplexación de la componente transversal magnética en la señal del servicio 1 (flecha roja) y servicio 2 (flecha azul).

Separando las informaciones de los 2 servicios, se procede a capturar la señal óptica con un diodo foto-detector APD, el cuál devuelve una señal eléctrica que debe ser filtrada para eliminar cualquier tipo de ruido agregado en el trayecto de la fibra óptica.

Teniendo la señal eléctrica un poco más limpia, se implementa un regenerador de señal, que se encarga de procesar y reconstruir la señal digital original figura 4.27, este proceso se realiza simultáneamente para la señal del servicio B. Cabe destacar que si por algún motivo la información fue modulada desde la OLT y suprimida la banda superior, enviando por el sistema la banda lateral inferior la información recuperada para este servicio por la ONU, se encontrará invertida, debido a su posición a la izquierda de la portadora en el espectro, sin embargo este defecto se corrige fácilmente al invertir esta información.

En la figura 4.28, se muestran los diagramas de ojo obtenidos en el receptor al demodular la señal proveniente de los dos servicios, el primer servició señalado por

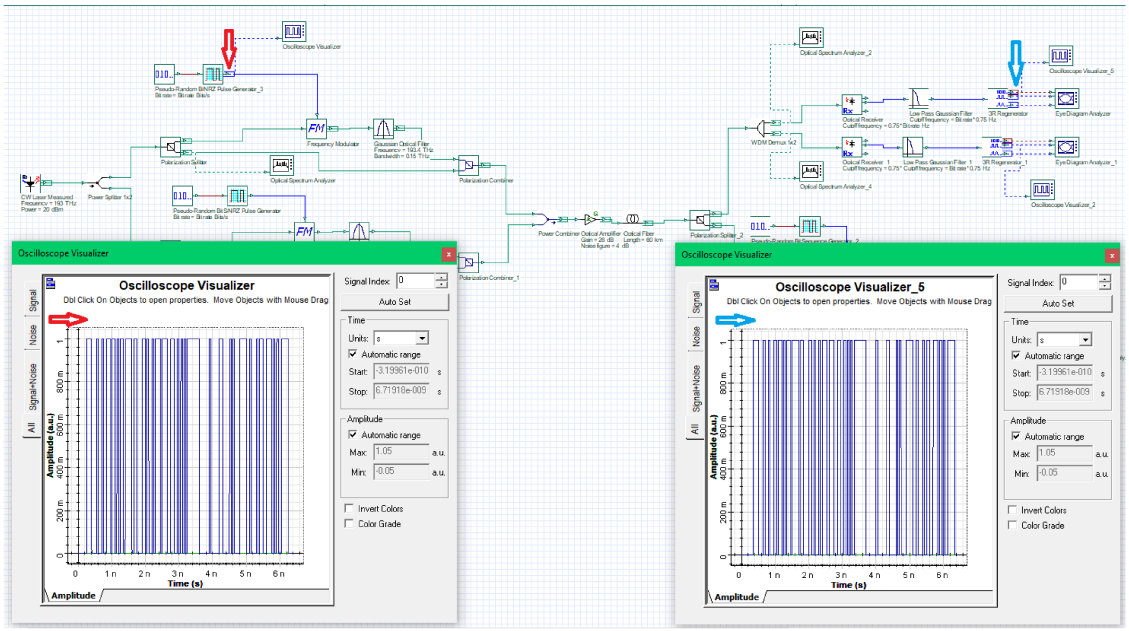


Figura 4.27 Comparación de la señal recibida y la señal transmitida

la flecha azul y el segundo por la flecha roja. El objetivo principal es aprovechar de la forma más eficiente la potencia suministrada por la fuente óptica garantizando un BER aproximado de 1×10^{-9}; ya que el peor BER que se debe garantizar según la recomendación CTI (Common Telecommunications Infrastructure) es de 1×10^{-7}.

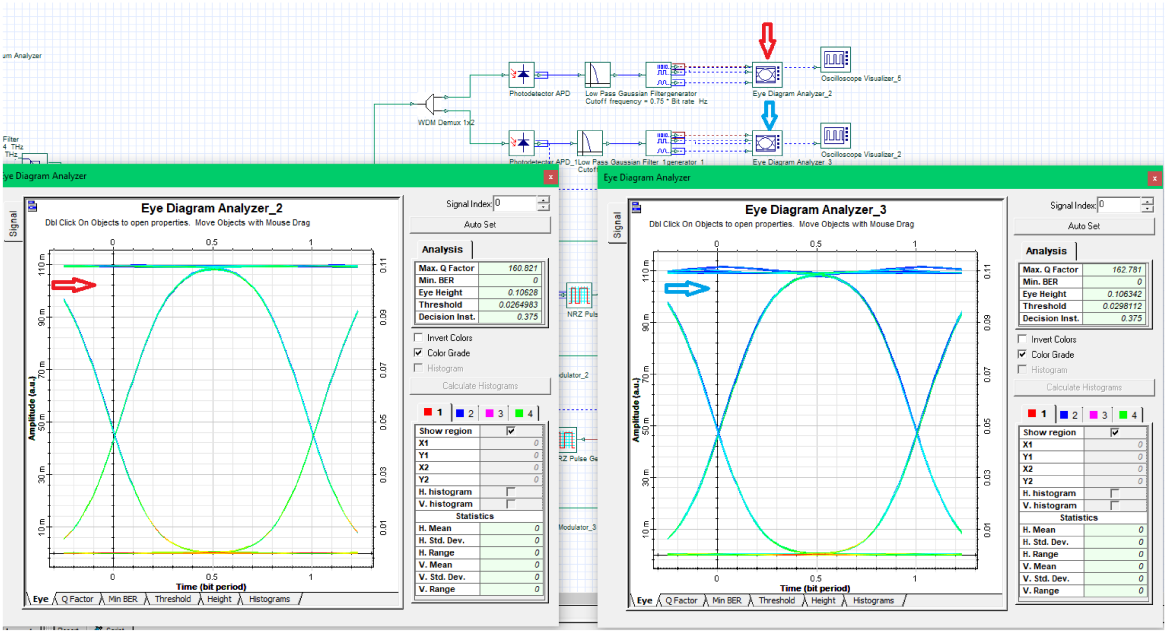


Figura 4.28 Diagrama de ojo para las señales A y B de bajada

Una vez culminadas estas fases y cumpliendo con las condiciones de BER en los receptores, se ha logrado entregar la información de bajada al cliente con éxito, ahora solo resta realizar la retransmisión de información proveniente del usuario, para lo cual se emplea la componente transversal eléctrica de la portadora original, que se consigue aplicando nuevamente el proceso de polarización, pero en este caso el haz de entrada es inyectado con un ángulo de 45°, para obtener dos sub-componentes de potencia idénticas, a las cuales se les aplica el mismo proceso de modulación y combinación para ser entregadas a la misma fibra óptica con la cual se transmitió figura 4.29.

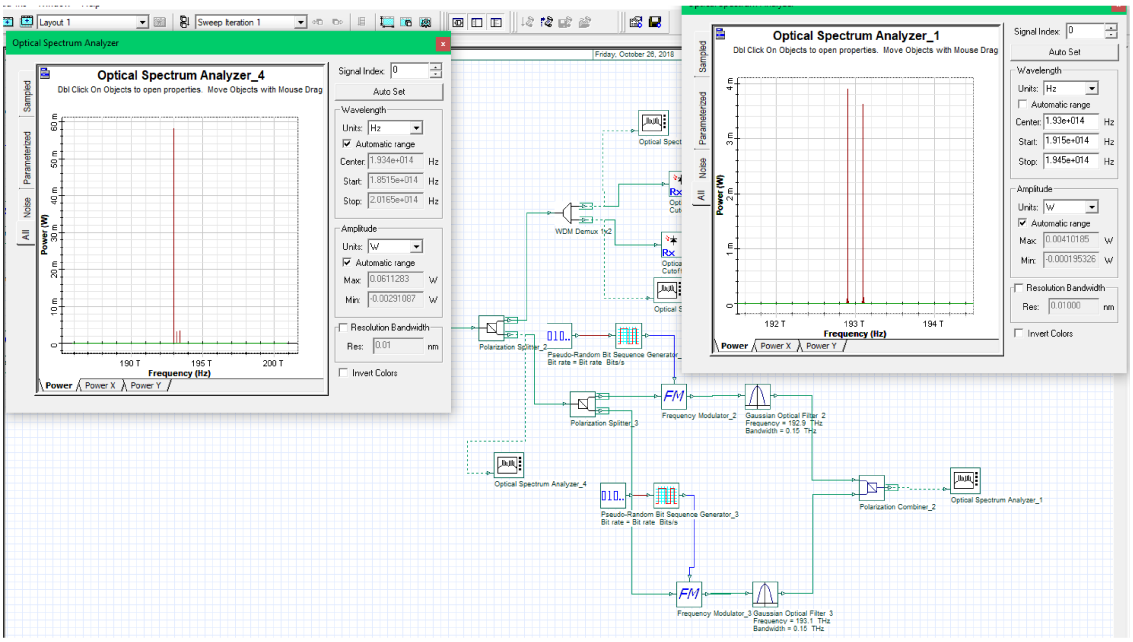


Figura 4.29 Portadora polarizada y señales A, B de subida

Es necesario considerar el sistema de recepción en la OLT como se muestra en la figura 4.30, el cual es similar al sistema de recepción en la ONU, salvo que en este caso no existe portadora sin modular y solo es necesario demodular las componentes ortogonales TM y TE de la señal de subida .

En la figura 4.31, se evidencia la atenuación que presenta la señal al recorrer la fibra óptica de regreso a la OLT y aunque la señal ha perdido una cantidad considerable de potencia durante todo el proceso, aún conserva un nivel admisible dentro de los parámetros de sensibilidad del receptor electro-óptico.

La señal obtenida hasta el momento debe ser separada mediante el divisor de polarización figura 4.32, cada una de las componentes TM como TE es guiada hacia los diodos APD que cuentan con una responsibidad de 0.65, donde la señal cambia del dominio óptico al eléctrico perdiendo un poco de potencia y posterior a ello es

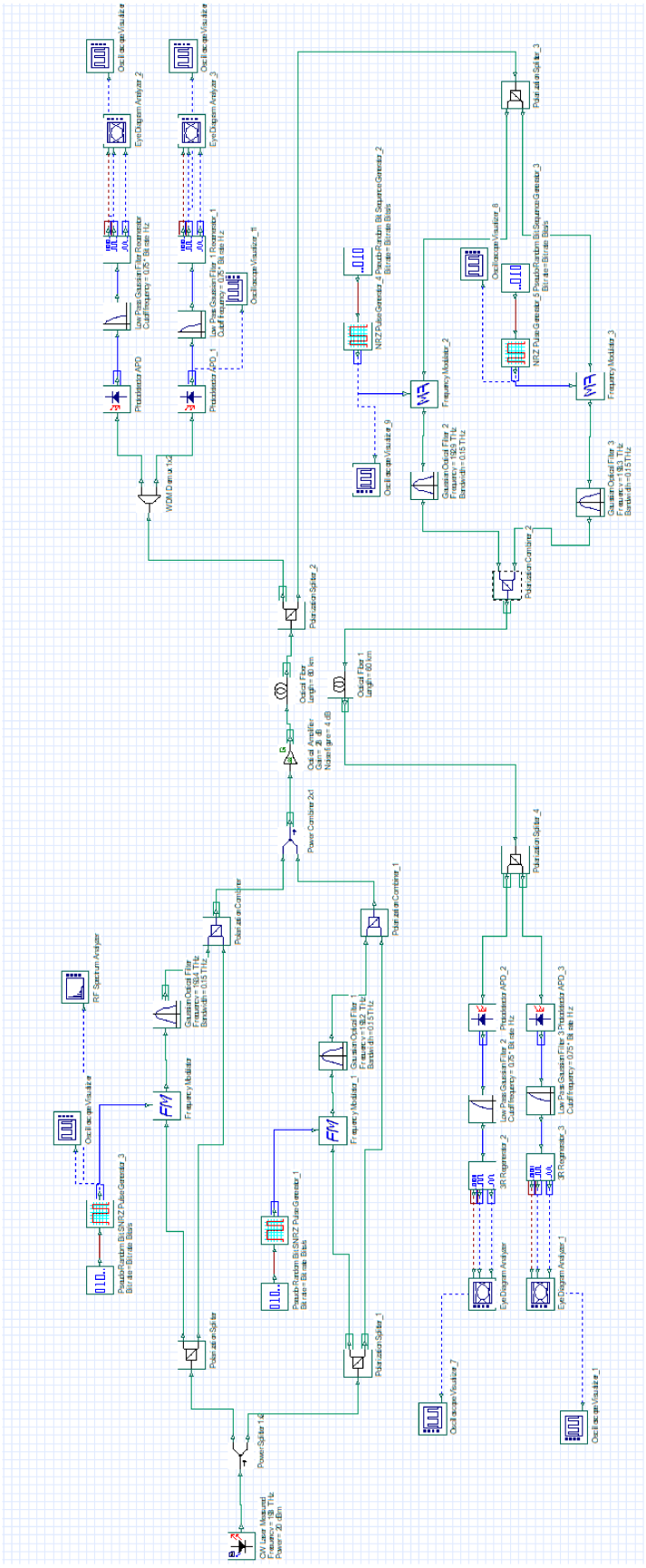


Figura 4.30 Diagrama general de Transmisión y Recepción para A, B de bajada y de subida para 1 OLT y 1 ONU

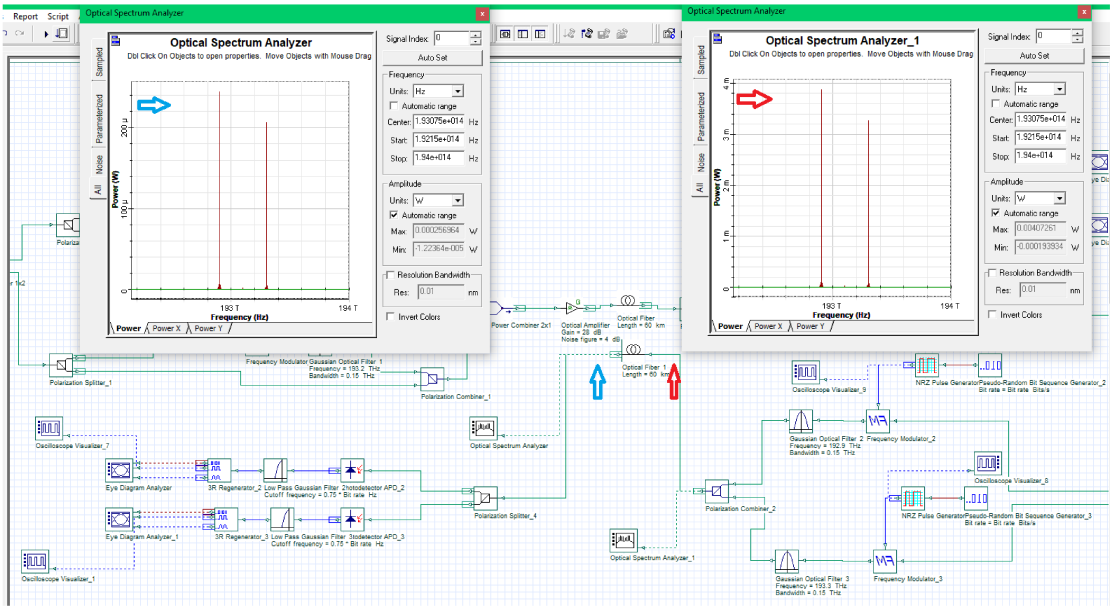


Figura 4.31 A, B antes de ser lanzada por la fibra óptica vs A, B en el otro extremo de la linea de transmisión

filtrada para eliminar componentes espureas obtenidas durante el proceso. Finalmente la información se reconstruye a través de un DSP, que en la simulación es representado por el bloque regenerador 3R. En la figura 4.33 se muestra la comparación entre la información enviada y la recibida.

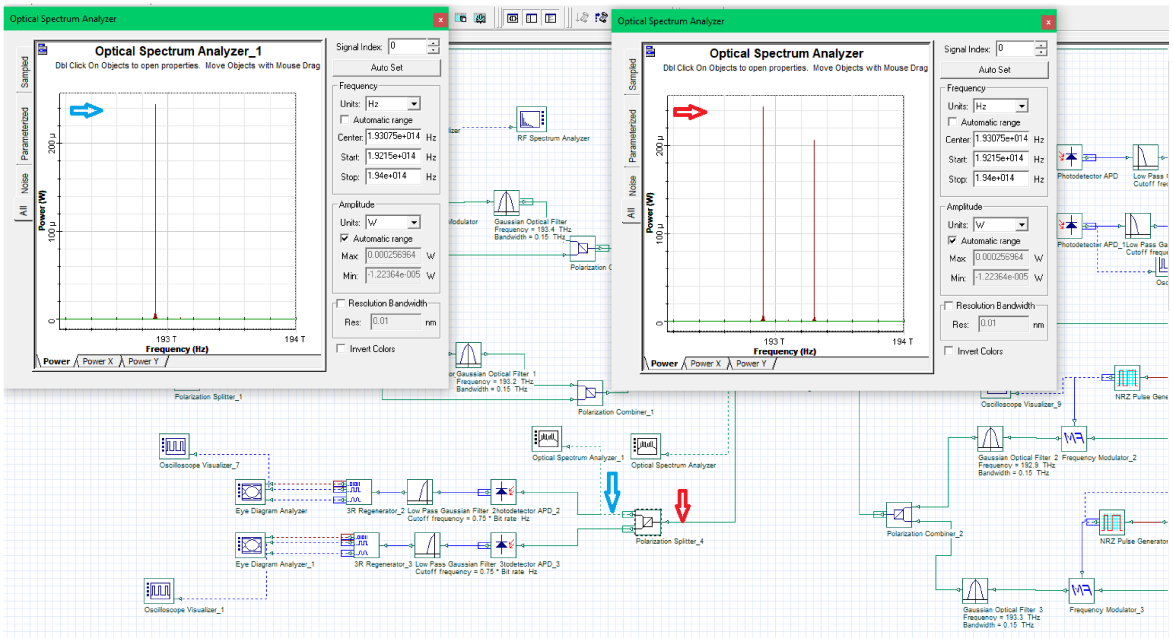


Figura 4.32 Demultiplexión de A y B dentro de la OLT

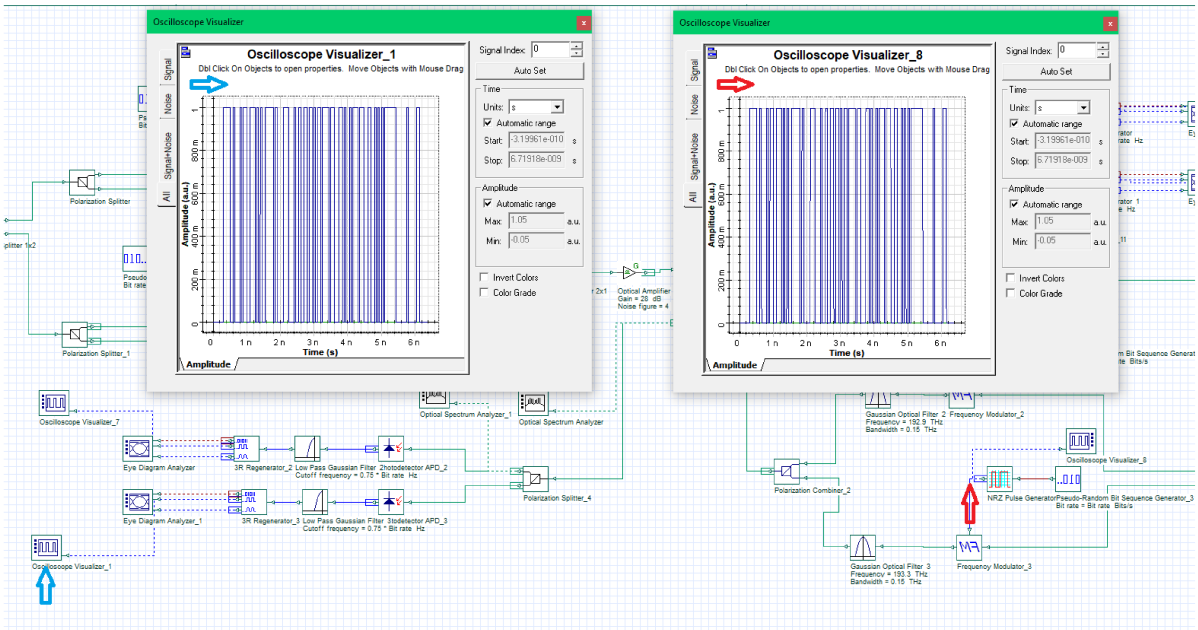


Figura 4.33 Comparación de la señal Pseudoaleatorio generada en la ONU vs la recibida en la OLT

En las figuras 4.28 y 4.34 se muestran los diagramas de ojo obtenidos para la ONU y OLT del sistema.

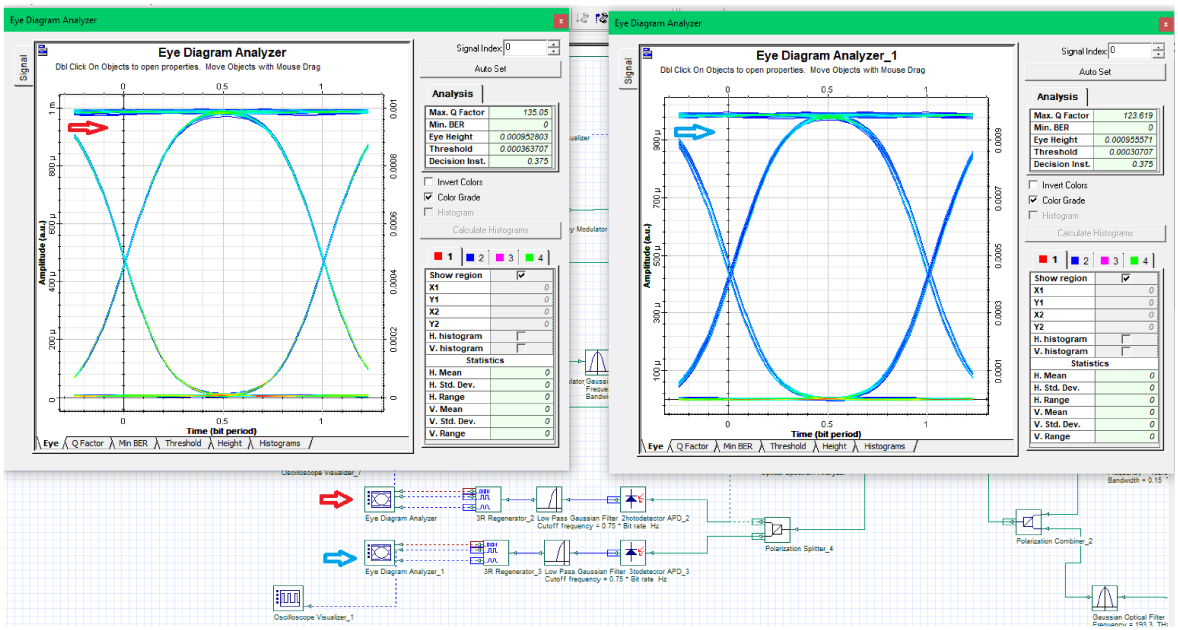


Figura 4.34 Diagrama de ojo de las señales A, B vista en la OLT

4.2.3. Análisis de resultados para sistema con 1 ONU

Para analizar el comportamiento del sistema respecto a la distancia es necesario correr varias simulaciones y observar su comportamiento. La figura 4.35, muestra el comportamiento del factor Q en los receptores de la ONU y OLT a lo largo de 1 km a 50 km, en dos casos diferentes donde el filtro eléctrico es de orden uno y tres, donde se han configurado 26° en los divisores de polarización de la OLT, 45°en el divisor de polarización de subida de las ONU, y en los demás divisores y combinadores 0°, con el fin de no tener los efectos de sobre-polarización que se presentan en la figura 4.25 y de esta manera aprovechar mejor las características del sistema.

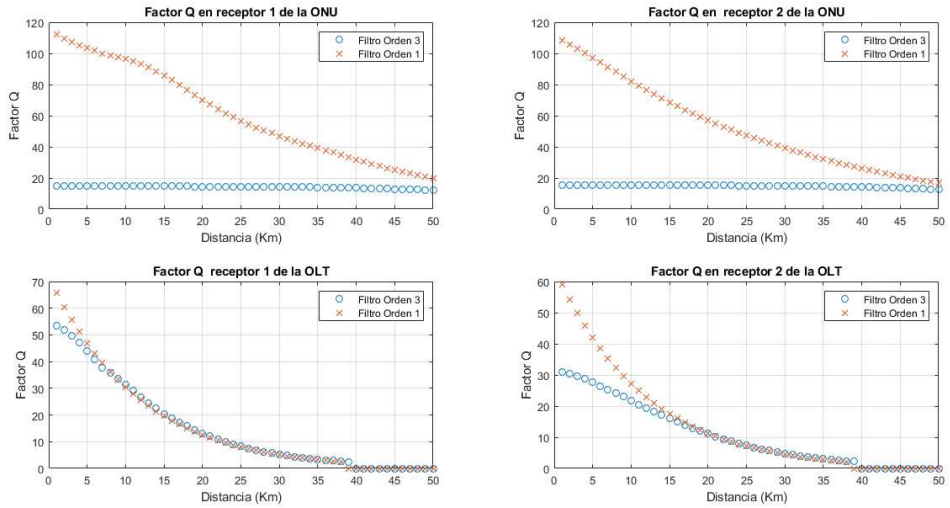


Figura 4.35 Factor Q en receptores de la ONU y OLT con filtros eléctricos de orden 1 y 3

Para que un sistema presente una mejor calidad se recomienda que el factor Q sea superior a 6 (UIT-T G.984.2) y en la figura 4.35 se observa que el factor Q es mejor para sistemas donde el filtro eléctrico es de orden 1, así mismo en la figura 4.36 se presentan mejores respuestas en cuanto al BER para sistemas con filtros de orden 1, siendo su BER prácticamente cero.

De esta manera, un filtro eléctrico de menor orden favorecerá el sistema al permitir el paso de una mayor cantidad de componentes que ayudarán una mejor reconstrucción de la señal, mientras un filtro de orden superior al caracterizarse por una pendiente más pronunciada rechazará y disminuirá la potencia de frecuencias útiles para la reconstrucción, comprometiendo la calidad de la información.

En la figura 4.37 se presentan los datos de Q y BER del sistema respecto a la distancia implementando los filtros eléctricos de orden 1, es claro en esta gráfica

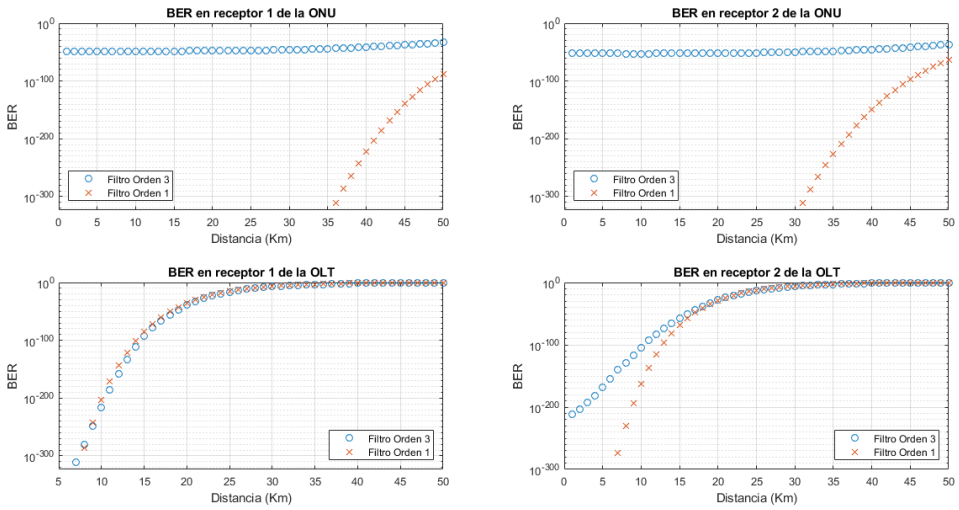


Figura 4.36 BER en receptores de la ONU y OLT con filtros eléctricos de orden 1 y 3

que si la distancia de la fibra aumenta el factor Q va disminuyendo, sin embargo se presenta una pequeña diferencia entre el factor Q de las ONU, que no representa ningún inconveniente para la recuperación de la información, esta diferencia puede ser causa de las frecuencias en que ha llegado cada señal procedente de la OLT. Adicionalmente en la figura 4.37 se muestra la variación del BER respecto a la distancia, sin embargo sus valores son tan pequeños para distancias inferiores a 30 km que a pesar de haberse graficado de forma logarítmica mediante Matlab no se representan estos valores en la imagen, lo que se traduce en una variación prácticamente nula del BER, y una calidad del sistema de transmisión excelente.

En cuanto al comportamiento de este mismo par de parámetros de la señal que regresa a la OLT figura 4.39, el factor Q es menor que los presentados en las ONU, lo que es de esperar ya que la señal ha viajado 2 veces la distancia presentada en el gráfico. Es importante resaltar que en la tabla 4.2, el comportamiento del BER del receptor de la OLT 2 se encuentra en los limites permitidos (BER$<1 \times 10^{-7}$), lo que hace que el sistema se restrinja a 28 km de longitud de la fibra. Los respectivos diagramas de ojo de los receptores se presentan en la figura 4.38, donde se evidencia un deterioro en las señales de los receptores OLT mientras en los receptores de la ONU la señal es muy estable, correspondiendo a los datos para 28 km de la tabla 4.2, adicionalmente se presenta el presupuesto de potencia de bajada para este sistema en la tabla 4.4, donde en la columna servicio se presentan los servicios 1 y 2, así como la letra 'P' que indica la potencia de la señal reservada para la subida, y en la tabla 4.5 se encuentra el presupuesto de potencia de subida.

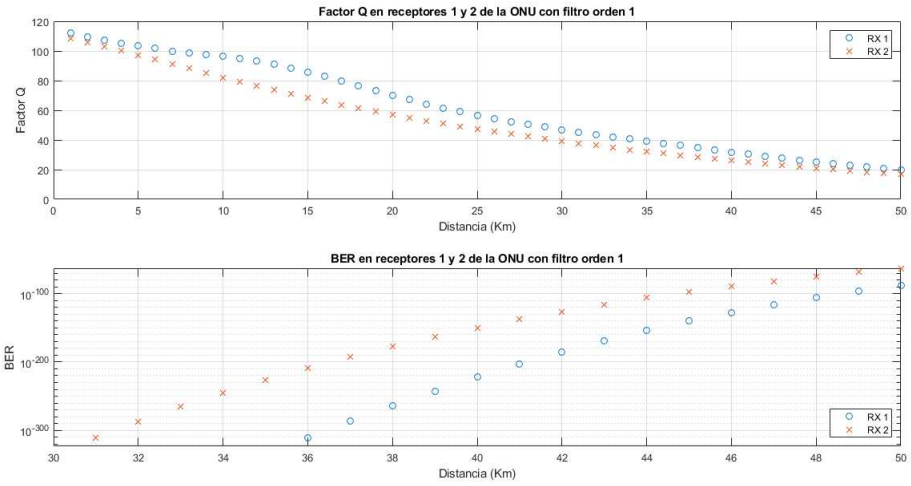


Figura 4.37 Factor Q y BER en receptores 1 y 2 de la ONU con filtro de orden 1

Longitud de la fibra 27 km				
	Max. Q	Min. BER	Eye Height (V)	Threshold (V)
RX 1 OLT	6,65897041	1,37E-11	1,01E-05	8,19E-06
RX 2 OLT	5,95672119	1,28E-09	9,15E-06	8,74E-06
RX 1 ONU	52,358974	0	0,00012788	4,92E-05
RX 2 ONU	43,9238776	0	0,00012601	5,88E-05

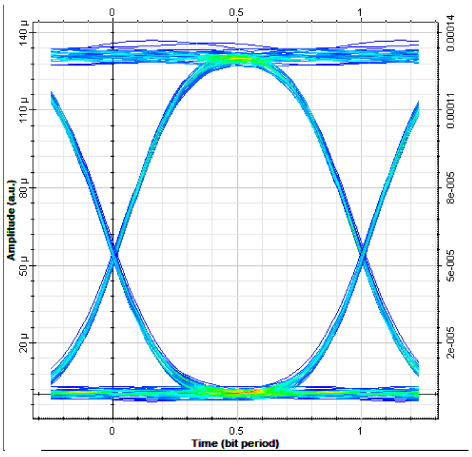
Longitud de la fibra 29 km				
	Max. Q	Min. BER	Eye Height (V)	Threshold (V)
RX 1 OLT	5,54597083	1,45E-08	6,99E-06	6,78E-06
RX 2 OLT	4,95712302	3,56E-07	6,04E-06	7,25E-06
RX 1 ONU	48,6885339	0	0,00011606	4,65E-05
RX 2 ONU	40,7426698	0	0,0001142	5,55E-05

Longitud de la fibra 28 km				
	Max. Q	Min. BER	Eye Height (V)	Threshold (V)
RX 1 OLT	6,07753514	6,06E-10	8,46E-06	7,45E-06
RX 2 OLT	5,43455984	2,73E-08	7,53E-06	7,94E-06
RX 1 ONU	50,4847969	0	0,00012183	4,90E-05
RX 2 ONU	42,3155031	0	0,00011997	5,69E-05

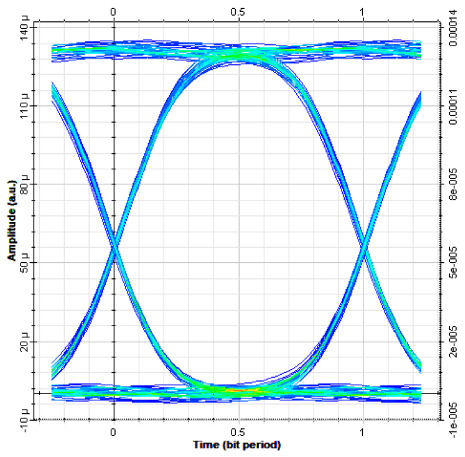
Longitud de la fibra 30 km				
	Max. Q	Min. BER	Eye Height (V)	Threshold (V)
RX 1 OLT	5,06024519	2,08E-07	5,65E-06	6,17E-06
RX 2 OLT	4,52041594	3,07E-06	4,69E-06	6,62E-06
RX 1 ONU	46,9644539	0	0,00011057	4,64E-05
RX 2 ONU	39,2065095	0	0,00010869	5,37E-05

Tabla 4.2 Datos en receptores ONU 1-2 y OLT 1-2 de 27 km a 30 km

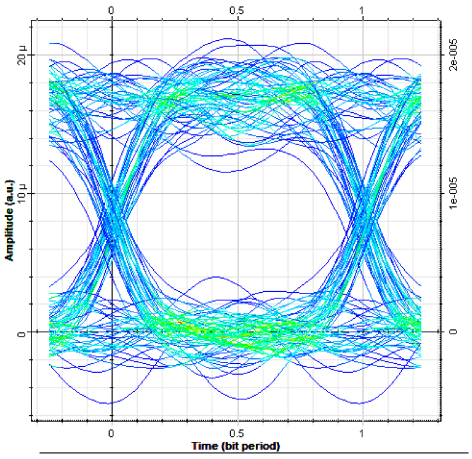
Otro tipo de parámetros relevantes para el sistema se encuentran en las figuras 4.40 y 4.41, para los receptores de la ONU y la OLT respectivamente, presentando las aperturas de ojo, que corresponde a la amplitud medida entre el '0' y '1' lógico, y el umbral de detección de la señal o threshold, que es el valor de sensibilidad mínimo que debe tener el receptor para poder discriminar correctamente los valores de la señal. En ambas gráficas se evidencia la perdida de voltaje conforme la distancia aumenta, los datos en cuanto a la apertura del ojo por parte de los receptores ya sea de la ONU o la OLT, presentan un comportamiento similar, sin embargo los valores de umbral de detección inician con una pequeña diferencia y a medida que la distancia de la fibra aumenta, la diferencia del umbral se irá reduciendo, así mismo el circuito electrónico que recibirá la señal deberá contar con una mayor sensibilidad como se muestra en la tabla 4.2.



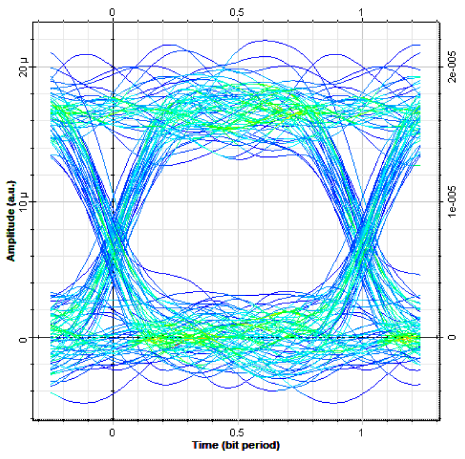
(a) Receptor 1 de la ONU



(b) Receptor 2 de la ONU



(c) Receptor 1 de la OLT



(d) Receptor 2 de la OLT

Figura 4.38 Diagramas de ojo para sistema a 28 km y 26° en el divisor de polarización

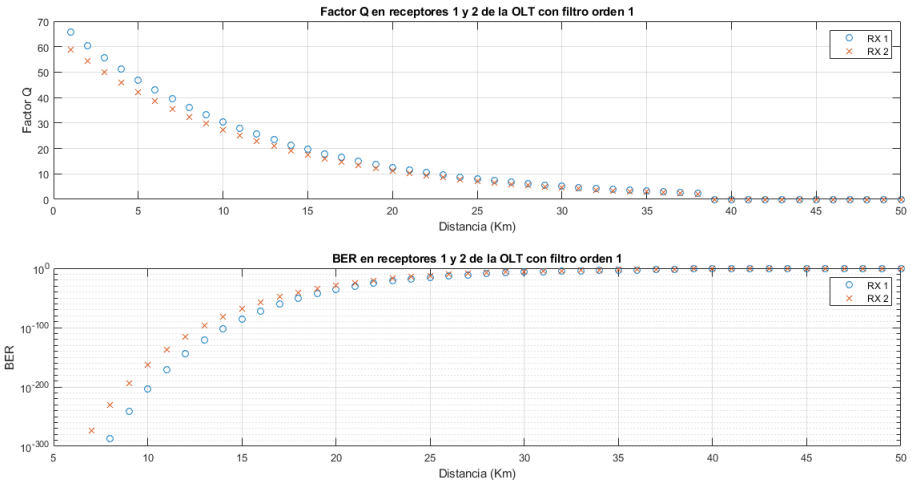


Figura 4.39 Factor Q y BER en receptores OLT 1 y 2 con filtro de orden 1

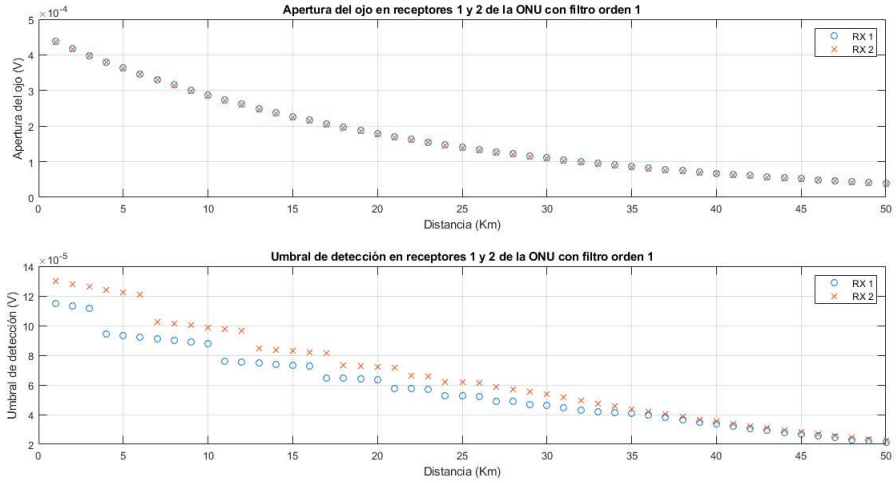


Figura 4.40 Apertura de ojo y umbral en receptores ONU 1 y 2 con filtro de orden 1

4.2.4. Sistema con soporte para múltiples ONU's

Para que el sistema expuesto en la sección anterior pueda soportar múltiples ONU's, es necesario realizar ciertas modificaciones sobre la etapa de recepción y reenvió, en la figura 4.42 se presenta un sistema con ocho ONU's, en el cual se evidencian 3 componentes nuevos, dos de ellos están ubicados entre el divisor de polarización y las ONU's, la flecha roja señala un demultiplexor óptico, a través de él se realizará broadcast a todas las ONU con la señal que lleva la información de los dos servicios, la flecha azul es un switch óptico el cual guía la señal de la portadora óptica polarizada hacia las ONU, funcionando como un TDM. El último componente señalado por la

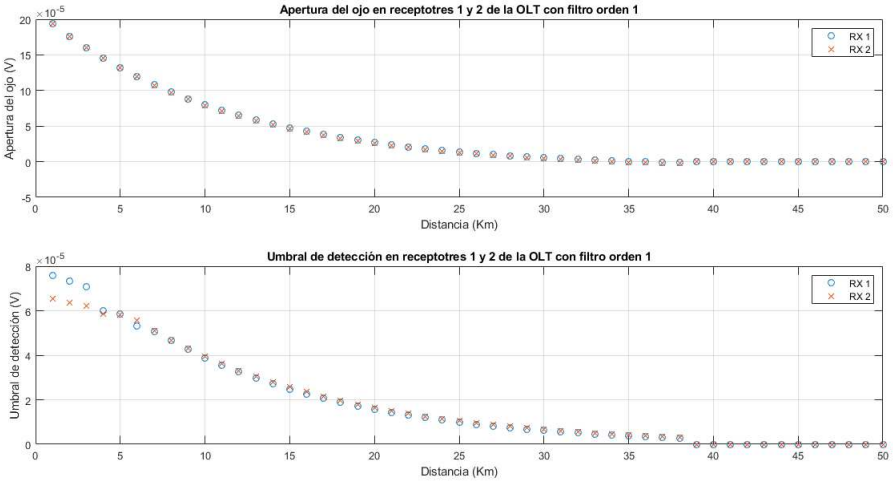


Figura 4.41 Apertura de ojo y umbral en receptores OLT 1 y 2 con filtro de orden 1

flecha verde es un switch que se encarga de tomar la señal de la ONU que ha modulado información para la subida. Cada ONU figura 4.43, se basa en la estructura propuesta en la sección anterior, la cual se puede observar en la figura 4.44, que corresponde al esquema interno del bloque.

4.2.5. Análisis de resultados de un sistema con 8 ONU

Al poner a prueba el sistema con 8 ONU, la potencia de la señal de bajada será dividida para cada ONU y como se observa en la figura 4.45, el factor Q y BER serán deteriorados por este efecto, sin embargo se observa como en los receptores de la OLT se obtienen resultados similares para un sistema con 8 ONU's como con 1 ONU figura 4.46 y 4.39, y tabla de presupuesto de potencia de subida 4.5, esto se debe a que la señal de subida es conmutada ópticamente manteniendo la potencia de subida sin importar el número de ONU´s del sistema.

Nuevamente la distancia máxima que podrá alcanzar el sistema se ve limitada por la OLT a 28 km, como se puede apreciar en la tabla 4.3, debido a la restricción de BER menor a 1×10^{-7} que presenta la OLT a esta distancia. En la figura 4.49 se presentan los diagramas de ojo obtenidos en el sistema a 28 km, donde en los receptores de la ONU se deteriora la forma del ojo en comparación a la figura 4.38, y en la tabla 4.4 se muestra el presupuesto de potencia de bajada del sistema.

En las figuras 4.47 y 4.48, se muestra la disminución de la apertura del ojo y el umbral de detección del diodo APD conforme la longitud de la fibra aumenta.

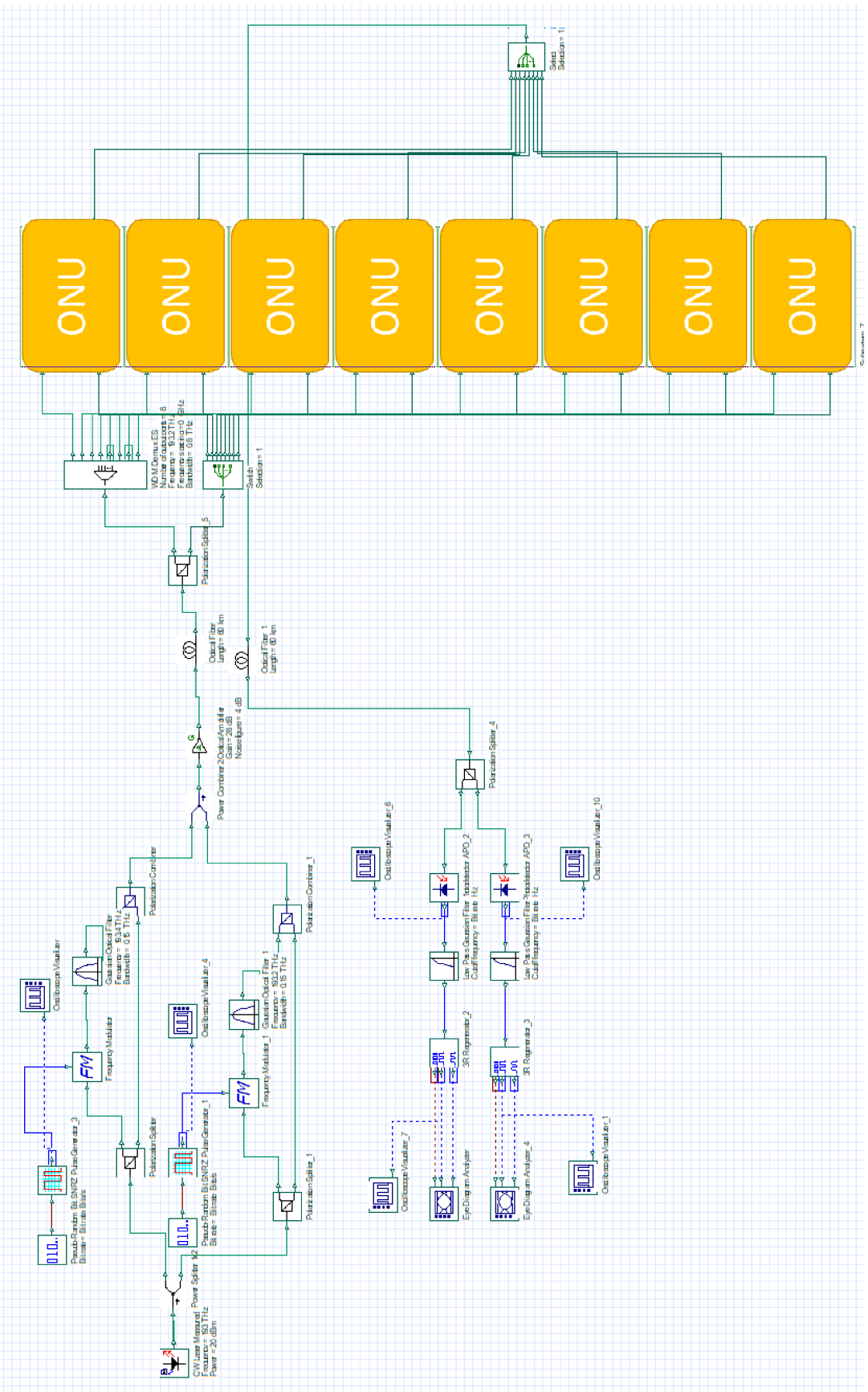


Figura 4.42 1 OLT con 8 ONU



Figura 4.43 Bloque ONU

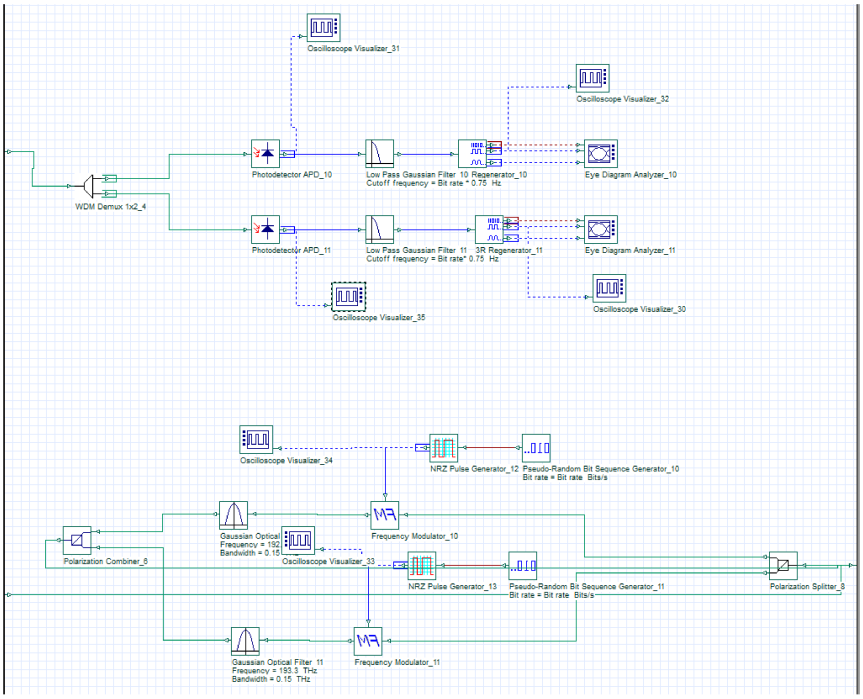


Figura 4.44 Diagrama interno de un bloque ONU

Hasta ahora se han venido modificando los parámetros correspondientes a la longitud de la fibra y la cantidad de ONUS, sin embargo para explotar al máximo el sistema planteado, es necesario variar el ángulo del dispositivo de polarización debido a que este también modifica la distribución de la potencia.

Longitud de la fibra 27 km				
	Max. Q	Min. BER	Eye Height (V)	Threshold (V)
RX 1 OLT	6,65897041	1,37E-11	1,01E-05	8,19E-06
RX 2 OLT	5,95672119	1,28E-09	9,15E-06	8,74E-06
RX 1 ONU	7,36961721	8,51E-14	1,00E-05	7,88E-06
RX 2 ONU	5,99347942	1,02E-09	8,19E-06	8,28E-06

Longitud de la fibra 29 km				
	Max. Q	Min. BER	Eye Height (V)	Threshold (V)
RX 1 OLT	5,54597083	1,45E-08	6,99E-06	6,78E-06
RX 2 OLT	4,95712302	3,56E-07	6,04E-06	7,25E-06
RX 1 ONU	6,72518962	8,72E-12	8,54E-06	7,20E-06
RX 2 ONU	5,46344444	2,33E-08	6,71E-06	7,59E-06

Longitud de la fibra 28 km				
	Max. Q	Min. BER	Eye Height (V)	Threshold (V)
RX 1 OLT	6,07753514	6,06E-10	8,46E-06	7,45E-06
RX 2 OLT	5,43455984	2,73E-08	7,53E-06	7,94E-06
RX 1 ONU	7,03961349	9,58E-13	9,27E-06	7,53E-06
RX 2 ONU	5,72282413	5,23E-09	7,43E-06	7,91E-06

Longitud de la fibra 30 km				
	Max. Q	Min. BER	Eye Height (V)	Threshold (V)
RX 1 OLT	5,06024519	2,08E-07	5,65E-06	6,17E-06
RX 2 OLT	4,52041594	3,07E-06	4,69E-06	6,62E-06
RX 1 ONU	6,42536181	6,54E-11	7,85E-06	6,89E-06
RX 2 ONU	5,21575266	9,13E-08	6,03E-06	7,26E-06

Tabla 4.3 Datos en receptores ONU 1-2 y OLT 1-2 de 27 km a 30 km, sistema de 8 ONU's

Presupuesto de potencia de bajada					
		1 ONU		8 ONUS	
Servicio	Componentes	Potencia de salida (dBm)			
		Esperada	Simulada	Esperada	Simulada
	Fuente láser	20	20	20	20
	Divisor de potencia	14	13,99	14	13,99
1	PBS de la OLT a 26°	13,0732	13,063	13,0732	13,063
2		13,0732	13,063	13,0732	13,063
P1		6,8368	6,826	6,8368	6,826
P2		6,8368	6.826	6,8368	6.826
1	Modulador FM	13,0732	13,063	13,0732	13,063
2		13,0732	13,063	13,0732	13,063
1	Filtro	7,0732	6,768	7,0732	6,768
2	Filtro	7,0732	6,735	7,0732	6,735
1	PBC de la OLT 0°	8,614	8,881	8,614	8,881
2		8,614	8,865	8,614	8,865
1-2-P	Combinador de potencia	7,3173	7,648	7,3173	7,648
1-2-P	Fibra óptica 28 km	1,7173	2,05	1,7173	2,05
1-2	PBS de la ONU 0°	-2,7229	-2,767	-2,7229	-2,767
P		0,3952	0,311	0,3952	0,311
1	Demux ONU	-8,7229	-8,799	-17,7538	-17,829
2		-8,7229	-8,819	-17,7538	-17,85

Tabla 4.4 Presupuesto de potencia de bajada para sistemas de 1 y 8 ONU´s a 28 km y 26° en el divisor de polarización

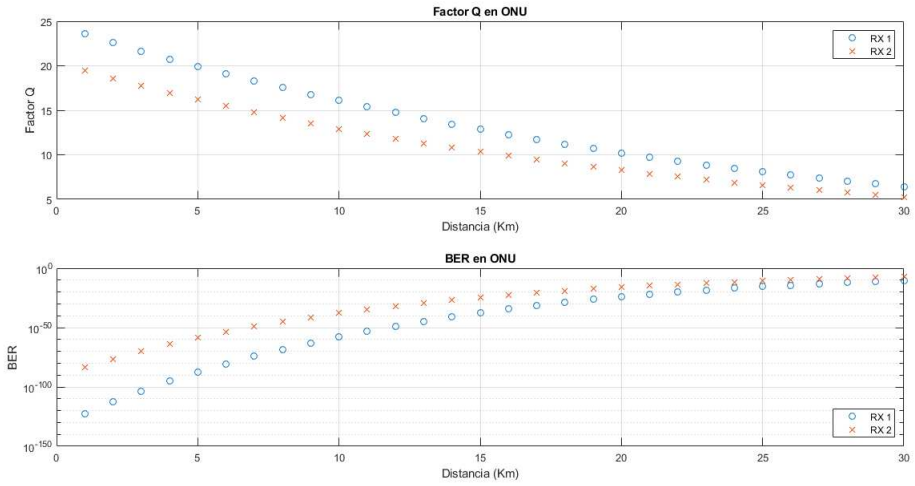


Figura 4.45 Factor Q de ojo y BER en los receptores 1 y 2 de una ONU, en sistema con 8 ONU's

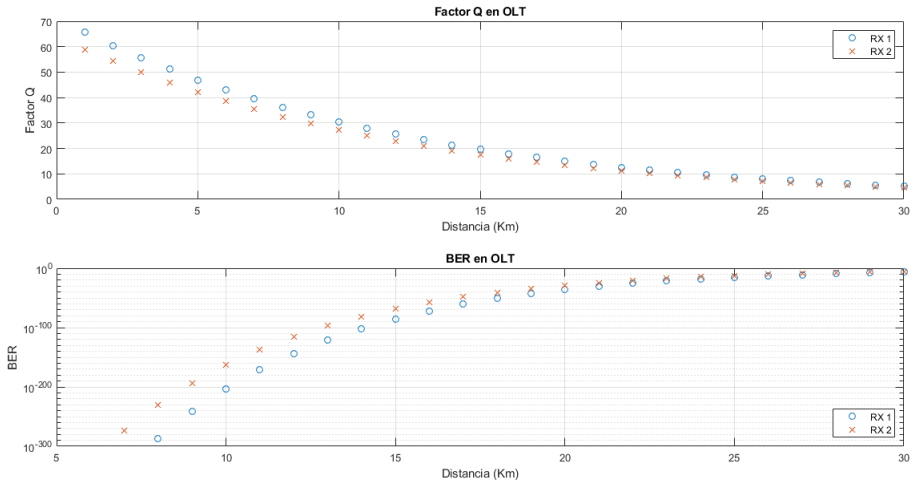


Figura 4.46 Factor Q de ojo y BER en los receptores 1 y 2 de la OLT, en sistema con 8 ONU's

Con el fin de determinar los ángulos donde la potencia tanto en las ONU's como en las OLT's no superen un BER de 1×10^{-9}, y que el sistema se pueda extender más de 20 km, se realizó una simulación conjunta con MatLab y Optisystem en donde se implementa hace uso del sistema del anexo A.4, resultando la figura 4.50 al utilizar el algoritmo del anexo A.2, el resultado obtenido es valido para un BER muy bueno, sin embargo si se tiene en cuenta un BER$<1 \times 10^{-7}$, se obtiene la figura 4.51, donde se mejora el alcance y los rangos del ángulo de aceptación del divisor de polarización.

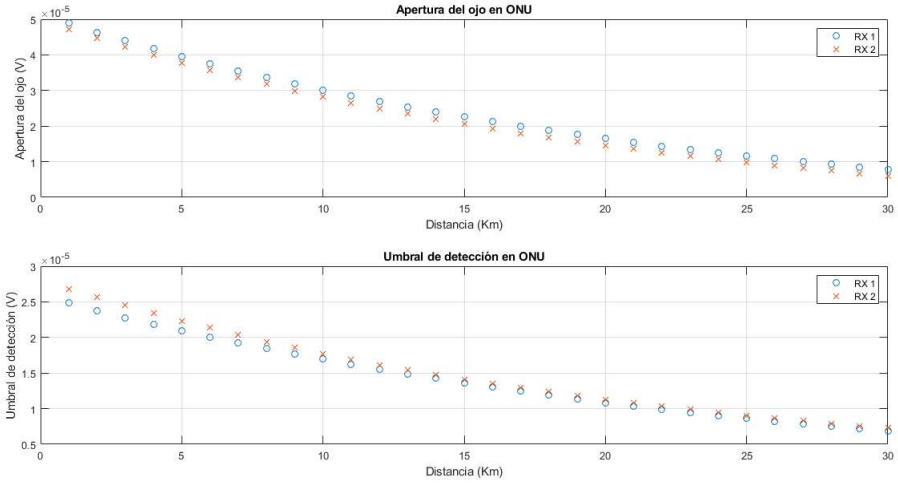


Figura 4.47 Apertura de ojo y umbral en los receptores 1 y 2 de una ONU, en sistema con 8 ONU's

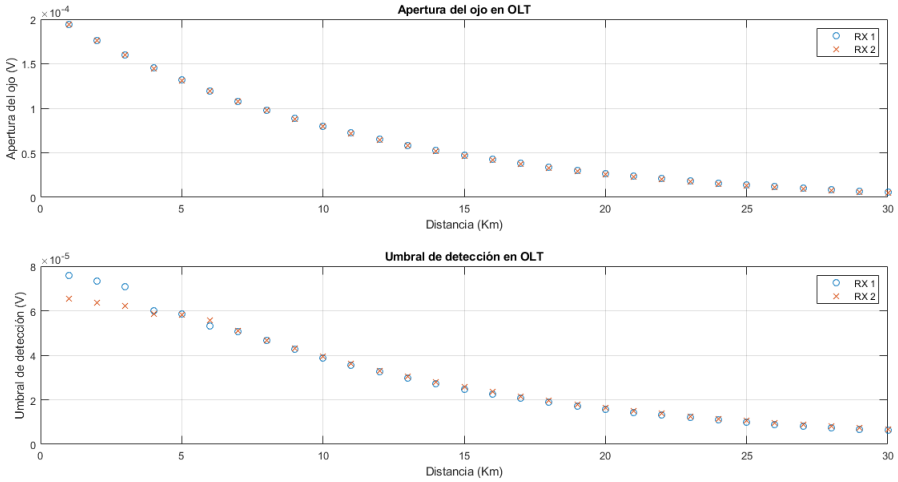
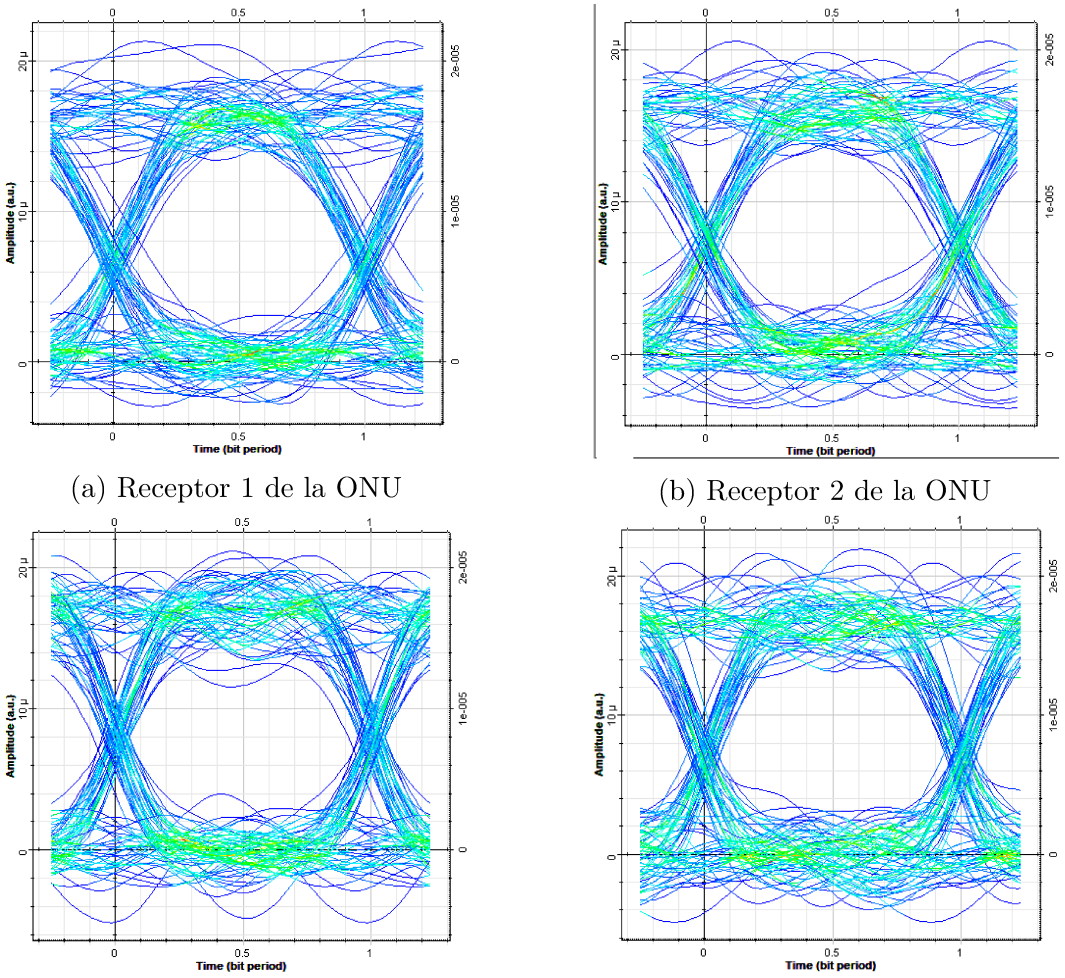


Figura 4.48 Apertura de ojo y umbral en los receptores 1 y 2 de la OLT, en sistema con 8 ONU's

En la tabla 4.6, la cual es obtenida mediante el algoritmo del anexo A.3, presenta de una manera detallada la cantidad de ONU's soportadas por el sistema sin amplificador con BER$<1 \times 10^{-9}$, para cada una de las configuraciones de ángulo de aceptación de los divisores de polarización de la OLT, y distancias superiores a 20 km. En ella se evidencia como la cantidad de ONU's va disminuyendo conforme el ángulo aumenta, esto se debe al efecto de la ecuación 4.3, la cual determina la potencia que será entregada a cada componente de polarización, adicionalmente se presenta la tabla 4.7, en la cual



(a) Receptor 1 de la ONU

(b) Receptor 2 de la ONU

(c) Receptor 1 de la OLT

(d) Receptor 2 de la OLT

Figura 4.49 Diagramas de ojo para sistema con 8 ONU's a 28 km y 26° en el divisor de polarización

Presupuesto de potencia de subida			
		1 y 8 ONU's	
Servicio	Componentes	Potencia de salida (dBm)	
		Esperada	Simulada
	Laser de subida	0,3952	0,311
1	PBS de la ONU a 45°	-2,6151	-2,699
2		-2,6151	-2,699
1	Modulador FM	-2,6151	-2,699
2		-2,6151	-2,699
1	Filtro	-8,6151	-8,663
2		-8,6151	-9,053
1-2	PBC de la OLT 0°	-9,8644	-8,853
1-2	Fibra óptica 28 km	-15,4644	-14,454
1	PBS de la ONU 0°	-18,4747	-17,273
2	PBS de la ONU 0°	-18,4747	-17,273

Tabla 4.5 Presupuesto de potencia de subida para sistemas de 1 y 8 ONU´s a 28 km y 26° en el divisor de polarización

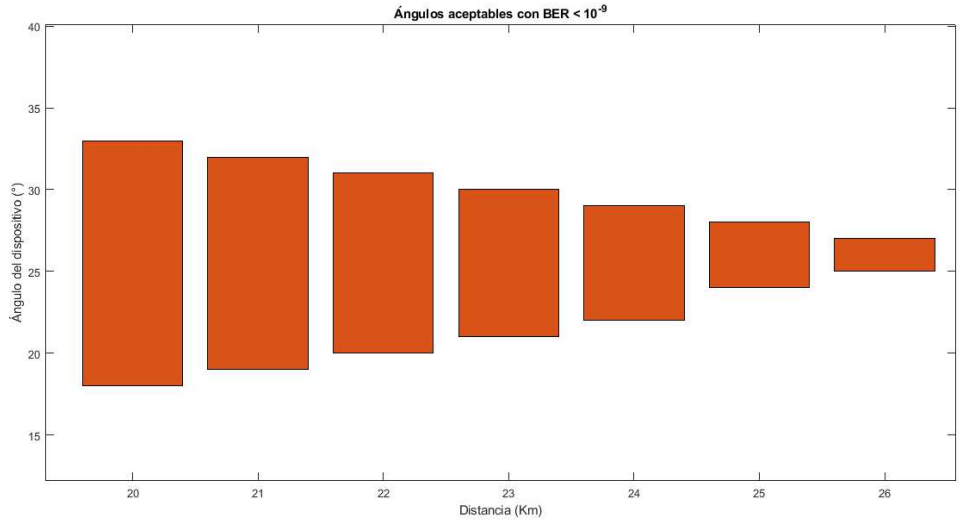


Figura 4.50 Rangos de ángulos del divisor de polarización sin amplificador con BER$<1\times10^{-9}$

se observa como al aceptar un mayor BER, se logra incrementar la cantidad de ONU's, así como la distancia de la fibra.

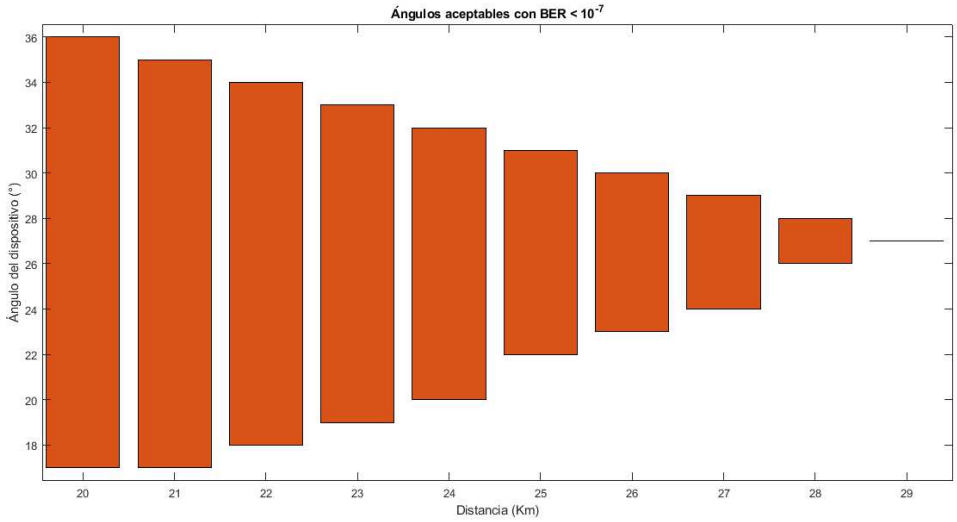


Figura 4.51 Rangos de ángulos del divisor de polarización sin amplificador con BER$<1 \times 10^{-7}$

°\km	20	21	22	23	24	25	26
18	13	-	-	-	-	-	-
19	13	12	-	-	-	-	-
20	13	12	11	-	-	-	-
21	12	12	11	11	-	-	-
22	12	11	11	10	10	-	-
23	12	11	11	10	10	-	-
24	11	11	10	10	9	9	-
25	11	10	10	9	9	9	8
26	10	10	10	9	9	8	8
27	10	10	9	9	8	8	8
28	10	9	9	8	8	8	-
29	9	9	8	8	8	-	-
30	9	9	8	8	-	-	-
31	9	8	8	-	-	-	-
32	8	8	-	-	-	-	-
33	8	-	-	-	-	-	-

Tabla 4.6 Número de ONU's por ángulo y distancia sin amplificador con BER$<1 \times 10^{-9}$

4.2.6. Análisis de resultados para sistemas con múltiples ONU's y amplificador de 28 dBm

En las subsecciónes anteriores se encontró que la potencia en el sistema es un parámetro muy dependiente de la distancia del enlace óptico, por ello es necesario

°\km	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
17	16	15	-	-	-	-	-	-	-	-
18	15	15	14	-	-	-	-	-	-	-
19	15	14	14	13	-	-	-	-	-	-
20	15	14	13	13	12	-	-	-	-	-
21	14	14	13	12	12	-	-	-	-	-
22	14	13	13	12	11	11	-	-	-	-
23	13	13	12	12	11	11	10	-	-	-
24	13	12	12	11	11	10	10	9	-	-
25	13	12	11	11	10	10	9	9	-	-
26	12	12	11	11	10	10	9	9	8	-
27	12	11	11	10	10	9	9	8	8	8
28	11	11	10	10	9	9	8	8	8	-
29	11	10	10	9	9	9	8	8	-	-
30	10	10	9	9	9	8	8	-	-	-
31	10	9	9	9	8	8	-	-	-	-
32	10	9	9	8	8	-	-	-	-	-
33	9	9	8	8	-	-	-	-	-	-
34	9	8	8	-	-	-	-	-	-	-
35	8	8	-	-	-	-	-	-	-	-
36	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 4.7 Número de ONU's por ángulo y distancia sin amplificador con $BER < 1 \times 10^{-7}$

incluir un amplificador óptico a la salida de la OLT para soportar múltiples ONU's, igualmente la distribución de de la potencia también se encuentra sujeta al ángulo del divisor de polarización. En la figura 4.52,se determinan los ángulos donde la potencia tanto en las ONU's como en las OLT's no superen un BER de 1×10^{-9}, y que el sistema se pueda extender más de 100 km.

Para la simulación de la figura 4.52 y 4.50, se utilizó como base un sistema de 8 ONU's, sobre el cual se realizó la variación de los parámetros de longitud de la fibra óptica y ángulo del dispositivo, con esto se asegura un mínimo de 8 ONU's,en el sistema. La simulación demuestra que hasta los 103 km el sistema posee un BER menor a 1×10^{-9}, mientras en el eje vertical se encuentran unas barras que definen el rango de configuración del ángulo del divisor de polarización, evidenciando que cuando la distancia aumenta el rango válido de ángulos se disminuye.

La tabla 4.8 presenta de una manera detallada la cantidad de ONU's soportadas por el sistema con amplificador, para cada una de las configuraciones de ángulo de los divisores de polarización de la OLT, distancias superiores a 100 km y BER$<1 \times 10^{-9}$.

°\km	100	101	102
32	142	0	0
33	136	0	0
34	130	0	0
35	124	118	0
36	118	112	0
37	112	107	0
38	106	101	0
39	100	96	0
40	95	90	86
41	89	85	81
42	84	80	76
43	78	75	72
44	73	70	67
45	68	65	62
46	64	61	58
47	59	56	54
48	55	52	50
49	51	48	46
50	47	44	42
51	43	41	0
52	39	37	0
53	36	34	0
54	32	31	0
55	29	28	0
56	26	0	0
57	24	0	0
58	21	0	0

Tabla 4.8 Número de ONU's por ángulo y distancia con con $BER < 1 \times 10^{-9}$ y amplificador de 28 dB.

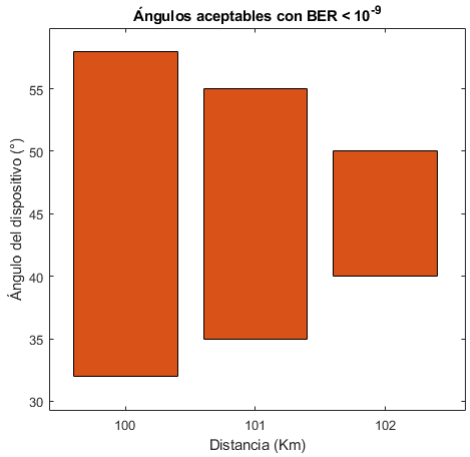


Figura 4.52 Rangos de ángulos del divisor de polarización con amplificador

En ella se evidencia como la cantidad de ONU's va disminuyendo conforme el ángulo aumenta, esto se debe al efecto de la ecuación 4.3, la cual determina la potencia que será entregada a cada componente de polarización.

En las tablas 4.6, 4.7 y 4.8, se puede afirmar que a menor valor del ángulo de configuración del divisor de polarización, se encuentran la mayor cantidad de ONU's soportadas en el sistema por kilometro, y se debe a que entre menor sea el ángulo configurado, más potencia se entregará a las ONU's a cambio de disminuir la potencia en los receptores de la OLT, por que se puede simplificar el procedimiento al encontrar los valores de ángulos más pequeños en los cuales el BER en los receptores de la OLT cumple las condiciones deseadas y a partir de este encontrar el numero máximo de ONU´s soportadas, un ejemplo de esto es la tabla 4.9, en la cual se presenta la cantidad máxima de ONU's por kilometro y el ángulo que satisface las condiciones de BER$<1 \times 10^{-7}$ en un sistema donde se ha puesto el amplificador de 28 dB a la salida de la OLT.

Longitud (km)	Ángulo (°)	# ONU's
80	10	747
81	11	704
82	11	673
83	12	634
84	12	605
85	13	569
86	14	535
87	14	511
88	15	479
89	16	449
90	16	429
91	17	401
92	18	375
93	19	349
94	20	326
95	21	303
96	23	273
97	24	253
98	25	234
99	27	209
100	29	185
101	31	163
102	33	143
103	37	112
104	44	70

Tabla 4.9 Número máximo de ONU's por kilometro en sistema con amplificador y $BER < 1 \times 10^{-7}$

Capítulo 5

Conclusiones

- El desarrollo del sistema propuesto se pudo lograr a partir del uso de la multiplexación por polarización de luz que permitió dividir el haz de luz en dos componentes ortogonales TM (señal de bajada) y TE (señal de subida), que a la vez posibilitaron el transporte de información de dos servicios simultáneos sobre un sistema de 20 Gbps en canal de ascendente y descendente, desde la OLT hasta la ONU, en una red óptica pasiva, evitando de esta manera el uso de láser en las ONUs.

- En base al comportamiento del modulador de fase PM, se logra comprender el funcionamiento del modulador en AM. En sistema propuesto se ha implementado un modulador FM, sin embargo al no existir comercialmente un modulador de este tipo, se propone como una continuación de este trabajo la sustitución del modulador FM, por uno AM con sus respectivos desplazamientos en frecuencia que pueden ser logrados mediante un shifter.

- Con el sofware MatLab se aprovecharon mejor los recursos de simulación de Optisystem y adicionalmente facilitó análisis de resultados generados mediante la variación de parámetros que permiten definir las características validas para un sistema deseado, donde se garantiza un BER menor a 1×10^{-9}, tanto en los receptores de las ONU's como los de las OLT's. Cabe destacar que para el debido funcionamiento, inicialmente se busca asegurar el BER en los receptores de la OLT, gráficas 4.52 y 4.50, dado que la señal recibida ha recorrido dos veces la distancia y por ende ha pasado por más elementos con perdidas, posterior a ello se busca la cantidad de ONU's soportadas por el sistema 4.6 y 4.8, logrando centralizar de esta forma una fuente óptica en diferentes configuraciones.

- Para las nuevas generaciones de redes se busca que el sistema sea confiable, multiservicio y con la menor cantidad de errores, lo que se logró con los sistemas obtenidos en las tablas 4.6 y 4.8, donde el BER en ellos no es mayor a 1×10^{-9}, igualmente las características de propagación de la luz en la fibra hacen que estos sistemas cuenten con inmunidad a factores electromagnéticos externos y una alta velocidad de propagación dada por este medio de transmisión.

- El ángulo de aceptación del polarizador, permitió la asignación de mayor potencia a la componente TE de subida, para conseguir una mayor potencia en el envió de información por parte de la ONU, adicionalmente se evidenció a partir las tablas 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9, que la variación de los ángulos de aceptación del dispositivo, permiten que el sistema modifique su alcance y así como la cantidad de ONU's permitidas, por otra parte, si se llegara a necesitar un sistema de este tipo con un alcance superior a 100 km, la adición de un amplificador óptico a la salida de la OLT lo permite como se muestra en las tablas 4.8 y 4.9, no obstante sin el amplificador se logran obtener sistemas de un mínimo de 8 ONU's hasta 26 km de distancia como se presenta en la figura 4.50, el alcance de esta red se ha visto limitado por factores de atenuación y también por la alta tasa de transmisión que maneja, sin embargo recordando que el sistema soporta dos servicios simultáneos, podría considerarse su implementación en ciudades.

Bibliografía

[1] E. Barrera Y R.D. Ortega. Análisis de cambios en características fundamentales de la telefonía celular desde 1g hasta 5g. *División de Ingenierías y Arquitectura. Universidad Santo Tomás. Bucaramanga.*, pages 305–317, 2017.

[2] Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Estudio y caracterización de un modulador electroóptico mach-zehnder. 2012.

[3] S. G. Cardenas B. R. Díaz. Análisis y diseño de un sistema de centralización de fuentes ópticas para una red de acceso pasiva usando multiplexación de polarización, 2016.

[4] W-Rash. It needs to start thinking about 5g and edge cloud computing. url: http://www.pcmag.com/article/359036/it-needs-to-start-thinking-about-5g-and-edge- cloud-computing, 2018.

[5] MINTIC. *Boletín trimestral de las TIC*. MINTIC, Republica de Colombia, 2017.

[6] Jorge Ignacio Sandoval Arenas. Calidad de experiencia en el servicio banda ancha móvil. Master's thesis, UNIVERSIDAD DE CHILE, 2011.

[7] Comision de regulacion de comunicaciones de Colombia. Revision del regimen de calidad de telecomunicaciones. page 40, 2016.

[8] G. Breed. Bit error rate: Fundamental concepts and measurement issues. *High frecuency electronics*, 2:46–47, 2003.

[9] José Antonio Dinamarca Ossa. Análisis de diagramas de ojo, 2002.

[10] Gemalto. *Presentación de las redes 5G Caracteristicas y usos*. LATAM, 2016.

[11] Wayne Tomasi. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Prentice Hall, México, 2003.

[12] Constantine A. Balanis. *Advanced engineering electromagnetics*. John Wiley and Sons Inc, Arizona State University, 2012.

[13] Matthew N. O. Sadiku. *Elementos de electromagnetismo*, volume 3. Oxford University Press, USA, séptima edition, 2002.

[14] Vendrell Mario. *Óptica cristalina*. Free Software Foundation, USA, 2002.

[15] Michael W. Davidson Mortimer Abramowitz. Polarization of light.

[16] John W. Jewett Raymond A. Serway. *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna*, volume 2. CENGAGE, USA, séptima edition, 2002.

[17] Gustavo Adolfo Puerto Leguizamón. *Fotónica de microondas y procesado todo-óptico aplicados a la comunicación de paquetes ópticos*, volume 1. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, primera edition, 2017.

[18] H. M. Chin, J. Mårtensson, and M. Forzati. Volterra based nonlinear compensation on 224 gb/s polmux-16qam optical fibre link. In *OFC/NFOEC*, 2012.

[19] Gurpreet Kaur* Harmanpreet Kaur Sandhu, R.S Kaler and Rajneesh Randhawa. Transmission performance of 112 gb/s polmux qpsk signal in ook/dpsk wdm system. 2018.

[20] Koltchanov I Mingaleev S Karelin N Kuzmin2 K Louchet H, Richter A. Comparison of xpm and xpolm-induced impairments in mixed 10 g – 100 g transmission. 2011.

[21] V. Veljanovski M. Kuschnerov M. Hirano Y. Yamamoto T. Sasaki S.L. Jansen H. de Waardt V.A.J.M. Sleiffer, D. van den Borne. Transmission of 448-gb/s dual-carrier polmux-16qam over 1230 km with 5 flexi-grid roadm passes. 2012.

[22] Santiago Galindo Cárdenas Brian Arturo Díaz García. Análisis y diseño de un sistema de centralización de fuentes ópticas para una red de acceso pasiva usando multiplexación de polarización. 2016.

[23] Omicron Laserage. Lighthub plug play laser light engines with up to 6 user-upgradable wavelengths. url: https://www.omicron-laser.de/files/lighthub$_{p}lus_{d}atasheet$201901.*pdf*, 2019.

[24] López Pastor Eduardo. Divisores Ópticos (splitters) en ftth. 08 2013.

Apéndice A

Cosimulación

A.1. Función para adquirir resultados de analizador de diagrama de ojo en OptiSystem

El algoritmo presentado a continuación, es una función la cual debe ser guardada en el computador como 'OJO.m', debido a que los algoritmos en los anexos A.2 y A.3 dependen de ella.

```
function r=OJO(A)
%Adquisición de resultados en diagrama de ojo
r=zeros(64,1);

r(1,1)=A.GetResultValue('Total Power (dBm)');
r(2,1)=A.GetResultValue('Total Power (W)');
r(3,1)=A.GetResultValue('Signal Power (dBm)');
r(4,1)=A.GetResultValue('Signal Power (W)');
r(5,1)=A.GetResultValue('Noise Power (dBm)');
r(6,1)=A.GetResultValue('Noise Power (W)');
r(7,1)=A.GetResultValue('Signal Delay (s)');
r(8,1)=A.GetResultValue('Signal Delay (samples)');
r(9,1)=A.GetResultValue('Bit Rate (Bits/s)');
r(10,1)=A.GetResultValue('Max. Q Factor');
r(11,1)=A.GetResultValue('Min. BER');
r(12,1)=A.GetResultValue('Min. log of BER');
r(13,1)=A.GetResultValue('Max. Eye Height (a.u.)');
r(14,1)=A.GetResultValue('Threshold at Min. BER (a.u)');
r(15,1)=A.GetResultValue('Decision Instant at Min. BER (bit period)');
r(16,1)=A.GetResultValue('Max. Eye Amplitude (a.u.)');
r(17,1)=A.GetResultValue('Max. Eye Closure (a.u.)');
r(18,1)=A.GetResultValue('Max. Eye Opening Factor (dB)');
r(19,1)=A.GetResultValue('Max. Eye Opening Factor');
r(20,1)=A.GetResultValue('Max. Eye Opening Factor (%)');
r(21,1)=A.GetResultValue('Extinction Ratio at Min. BER (dB)');
r(22,1)=A.GetResultValue('Extinction Ratio at Min. BER');
r(23,1)=A.GetResultValue('Extinction Ratio at Min. BER (%)');
```

```
r(24,1)=A.GetResultValue('Q Factor at User Defined Decision Instant');
r(25,1)=A.GetResultValue...
    ('Eye Height at User Defined Decision Instant (a.u.)');
r(26,1)=A.GetResultValue('Min. BER at User Defined Decision Instant');
r(27,1)=A.GetResultValue...
    ('Min. log of BER at User Defined Decision Instant');
r(28,1)=A.GetResultValue('BER at User Defined Threshold');
r(29,1)=A.GetResultValue...
    ('BER at User Defined Decision Instant and Threshold');
r(30,1)=A.GetResultValue('log of BER at User Defined Threshold');
r(31,1)=A.GetResultValue...
    ('log of BER at User Defined Decision Instant and Threshold');
r(32,1)=A.GetResultValue...
    ('Eye Amplitude at User Defined Decision Instant (a.u.)');
r(33,1)=A.GetResultValue...
    ('Eye Closure  at User Defined Decision Instant (a.u.)');
r(34,1)=A.GetResultValue...
    ('Eye Opening Factor at User Defined Decision Instant (dB)');
r(35,1)=A.GetResultValue...
    ('Eye Opening Factor at User Defined Decision Instant');
r(36,1)=A.GetResultValue...
    ('Eye Opening Factor at User Defined Decision Instant (%)');
r(37,1)=A.GetResultValue...
    ('Extinction Ratio at User Defined Decision Instant (dB)');
r(38,1)=A.GetResultValue...
    ('Extinction Ratio at User Defined Decision Instant');
r(39,1)=A.GetResultValue...
    ('Extinction Ratio at User Defined Decision Instant (%)');
r(40,1)=A.GetResultValue('Vertical Histogram 1 Mean');
r(41,1)=A.GetResultValue('Vertical Histogram 1 Standard Deviation');
r(42,1)=A.GetResultValue('Vertical Histogram 1 Range');
r(43,1)=A.GetResultValue('Horizontal Histogram 1 Mean');
r(44,1)=A.GetResultValue('Horizontal Histogram 1 Standard Deviation');
r(45,1)=A.GetResultValue('Horizontal Histogram 1 Range');
r(46,1)=A.GetResultValue('Vertical Histogram 2 Mean');
r(47,1)=A.GetResultValue('Vertical Histogram 2 Standard Deviation');
r(48,1)=A.GetResultValue('Vertical Histogram 2 Range');
r(49,1)=A.GetResultValue('Horizontal Histogram 2 Mean');
r(50,1)=A.GetResultValue('Horizontal Histogram 2 Standard Deviation');
r(51,1)=A.GetResultValue('Horizontal Histogram 2 Range');
r(52,1)=A.GetResultValue('Vertical Histogram 3 Mean');
r(53,1)=A.GetResultValue('Vertical Histogram 3 Standard Deviation');
r(54,1)=A.GetResultValue('Vertical Histogram 3 Range');
r(55,1)=A.GetResultValue('Horizontal Histogram 3 Mean');
r(56,1)=A.GetResultValue('Horizontal Histogram 3 Standard Deviation');
r(57,1)=A.GetResultValue('Horizontal Histogram 3 Range');
r(58,1)=A.GetResultValue('Vertical Histogram 4 Mean');
r(59,1)=A.GetResultValue('Vertical Histogram 4 Standard Deviation');
```

```
r(60,1)=A.GetResultValue('Vertical Histogram 4 Range');
r(61,1)=A.GetResultValue('Horizontal Histogram 4 Mean');
r(62,1)=A.GetResultValue('Horizontal Histogram 4 Standard Deviation');
r(63,1)=A.GetResultValue('Horizontal Histogram 4 Range');
r(64,1)=A.GetResultValue('Eye Mask Violation Ratio (%)');
end
```

A.2. Algoritmo de detección para ángulos y distancias validas del sistema

El siguiente algoritmo genera una matriz de 1 y 0 en la variable 'angle', la cual será representada mediante un gráfico de barras. Para el funcionamiento de este es necesaria la función A.1. Una vez culminada la ejecución se debe guardar el workspace bajo el nombre 'VALIDOS.mat'.

```
% OptiSystem simulación cooperativa 1
% Algoritmo de detección para ángulos validos del sistema a partir de
% 'd' km, teniendo como referencia un minimo de 8 ONU's ó puertos del
% divisor de potencia hacia las ONU's 'ports', con un BER < 'ber'

% Se limpia el Workspace
clear all

%Variables usadas
    %OLT1:  Almacena los datos del receptor 1 de la OLT
    %OLT2:  Almacena los datos del receptor 2 de la OLT
    %ONU1:  Almacena los datos del receptor 1 de la ONU
    %ONU2:  Almacena los datos del receptor 2 de la ONU
    %angle: Matíz que contendrá los datos de los ángulos validos en forma
    %       de '1' a partir de la distancia 'd'
    %d:     Distancia inicial en Km
    %ports: Número de ONUS mínimo o puertos del divisor de polarización que
    %       distribuye la señal a las ONU's
    %ber:   Minimo BER aceptado
    %verdad:Condición de culminación programa
    %dd:    Variable permite el avance rellenar las matrices
    %a:     Variable que recorre los ángulos de 1° a 90°

    %fibra:     Fibra optica de bajada
    %fibra2:    Fibra optica de subida
    %OLTA       Receptor 1 de la OLT
    %OLTB       Receptor 2 de la OLT
    %ONUA       Receptor 1 de la ONU
    %ONUB       Receptor 2 de la ONU
    %polsplit   Divisor de polarización del servicio 1
    %polcomb    Combinador de polarización del servicio 1
    %polsplit1  Divisor de polarización del servicio 2
```

```
    %polcomb1   Combinador de polarización del servicio 2
    %powersplit Divisor de potencia ó cantidad de ONUS del sistema
    %Amplificador   Amplificador óptico
    %A          Ganancia del amplificador en dBm

OLT1=zeros(64,1);
OLT2=zeros(64,1);
ONU1=zeros(64,1);
ONU2=zeros(64,1);

angle=zeros(90,1);
d=20;
A=0;    %0 ó 28
ports=8;
ber=1e-9;

verdad=1;
dd=1;

while verdad
    verdad=0;

% Creación de un servidor común con Optisystem
        optsys = actxserver('optisystem.application');
% Pausa para esperar a que Optisystem abra antes de abrir el proyecto
        pause(15);

        optsys.Open('C:\Users\Richar\Documents\MATLAB\TESIS\sim2.osd');

% Especificacar y definir los parámetros que serán cambiados
        ParameterName1  = 'Filename';
        Document        = optsys.GetActiveDocument;
        LayoutMngr      = Document.GetLayoutMgr;
        CurrentLyt      = LayoutMngr.GetCurrentLayout;
        CurrentSweep    = CurrentLyt.GetIteration;
        Canvas          = CurrentLyt.GetCurrentCanvas;

% Especificar los componentes cuyos parámetros serán modificados o leidos
        fibra      = Canvas.GetComponentByName('Optical Fiber');
        fibra2     = Canvas.GetComponentByName('Optical Fiber_1');
        OLTA       = Canvas.GetComponentByName('Eye Diagram Analyzer');
        OLTB       = Canvas.GetComponentByName('Eye Diagram Analyzer_4');
        ONUA       = Canvas.GetComponentByName('Eye Diagram Analyzer_1');
        ONUB       = Canvas.GetComponentByName('Eye Diagram Analyzer_3');
        polsplit   = Canvas.GetComponentByName('Polarization Splitter');
        polcomb    = Canvas.GetComponentByName('Polarization Combiner');
        polsplit1   = Canvas.GetComponentByName('Polarization Splitter_1');
        polcomb1    = Canvas.GetComponentByName('Polarization Combiner_1');
```

```
        powersplit  = Canvas.GetComponentByName('Power Splitter');
        Amplificador= Canvas.GetComponentByName('Optical Amplifier');
        Amplificador.SetParameterValue( 'Length', A );

%Actualización del número de puertos del splitter de potencia u ONU's
%permitidas
        powersplit.SetParameterValue( 'Number of output ports', ports)
%Actualización de la longitud de la fibra
        fibra.SetParameterValue( 'Length', (d) )
        fibra2.SetParameterValue( 'Length', (d) )
    for a=90:-1:1
%Actualización de los ángulos de divisores y combinadores de polarización
        polsplit.SetParameterValue('Device angle',a)
        %polcomb.SetParameterValue('Device angle',a)
        polsplit1.SetParameterValue('Device angle',a)
        %polcomb1.SetParameterValue('Device angle',a)

%Actialización de la cantidad de ONU's ó puerto del divisor de potencia
        powersplit.SetParameterValue( 'Number of output ports', ports)

%Ejecutar la simulación bajo los parámetros ya configurados
        Document.CalculateProject( false , true);

%Adquirir y almacenar los
            OLT1(:,a,dd)=OJO(OLTA);
            OLT2(:,a,dd)=OJO(OLTB);
            ONU1(:,a,dd)=OJO(ONUA);
            ONU2(:,a,dd)=OJO(ONUB);

            if ( (OLT1(11,a,dd)>ber)|| (OLT2(11,a,dd)>ber)||...
                    (ONU1(11,a,dd)>ber)||(ONU2(11,a,dd)>ber) )
                angle(a,dd)=0;
            else
                angle(a,dd)=1;
                verdad=1;
            end
            "Distancia km / Ángulo: "
            [d a]
    end
    pause(15);
    optsys.Quit;
    delete(optsys)
    dd=dd+1;
    d=d+1;
end


%nf: Número total de filas
```

```
%nc: Número total de columnas
[nf,nc]=size(angle);

%angle2:    Matriz con los valores numéricos de los angulos validos
angle2=zeros(nf,nc);
%barras:    vector a graficar de ONU's validas

%GRAFICO DE BARRAS DE ÁNGULOS Y DISTANCIAS VALIDAS QUE CUMPLEN LA CONDICIÓN
%DE BER

for y=1:nc
    for x=1:nf
        %[x y]
        if angle(x,y)==1
            angle2(x,y)=x;
        else
            angle2(x,y)=nan;
        end
    end
    barras(y,:)=[min(angle2(:,y)) max(angle2(:,y))-min(angle2(:,y))];
end
km=d-nc:d-1;
b=bar(km,barras,'stacked');

b(1).LineWidth = 2;
b(1).EdgeColor = 'white';
b(1).FaceColor = 'white';

ylabel('Ángulo del dispositivo (°)');
xlabel('Distancia (Km)');
%legend('No aceptable','Aceptable')
title("Ángulos aceptables con BER < 10^{-9}");

%Al finalizar guardar el workspace como 'VALIDOS.m'
```

A.3. Algoritmo de detección para número de ONU'S del sistema

A continuación se presenta el el algoritmo final el cual genera una matriz en la variable 'Nofports' con la cantidad de ONU's soportadas por el sistema a partir de el ángulo y la longitud de la fibra.

```
% OptiSystem simulación cooperativa 2
% Algoritmo de detección para número de ONUS del sistema a partir de
% 'd' km, teniendo como referencia un minimo de 8 ONU's ó puertos del
% divisor de potencia hacia las ONU's 'ports', con un BER < 'ber'
```

```
%Variables usadas
    %OLT1:  Almacena los datos del receptor 1 de la OLT
    %OLT2:  Almacena los datos del receptor 2 de la OLT
    %ONU1:  Almacena los datos del receptor 1 de la ONU
    %ONU2:  Almacena los datos del receptor 2 de la ONU
    %angle: Matíz que contendrá los datos de los ángulos validos en forma
    %       de '1' a partir de la distancia 'd'
    %d:     Distancia inicial en Km
    %ports: Número de ONUS mínimo o puertos del divisor de polarización que
    %       distribuye la señal a las ONU's
    %ber:   Minimo BER aceptado
    %di:    Longitud mínima de la fibra
    %df:    Longitud máxima de la fibra
    %a:     Variable que recorre los ángulos de 1° a 90°
    %b:     Variable que recorre la longitud de la fibra

    %fibra:     Fibra optica de bajada
    %fibra2:    Fibra optica de subida
    %OLTA       Receptor 1 de la OLT
    %OLTB       Receptor 2 de la OLT
    %ONUA       Receptor 1 de la ONU
    %ONUB       Receptor 2 de la ONU
    %polsplit   Divisor de polarización del servicio 1
    %polcomb    Combinador de polarización del servicio 1
    %polsplit1  Divisor de polarización del servicio 2
    %polcomb1   Combinador de polarización del servicio 2
    %powersplit Divisor de potencia ó cantidad de ONUS del sistema
    %Amplificador   Amplificador óptico
    %A          Ganancia del amplificador en dBm

    %Nofports:  RESULTADO DE LA SIMULACIÓN, VER ESTA VARIABLE AL TERMINAR
    %           LA EJECUCIÓN

clear all

%Se carga el workspace generado con el algoritmo anterior
load('VALIDOS','angle','d','nf','nc','A')

di=d-nc-1;
df=d-1;

OLT1=zeros(64,1);
OLT2=zeros(64,1);
ONU1=zeros(64,1);
ONU2=zeros(64,1);
OLT_1=zeros(64,1);
OLT_2=zeros(64,1);
ONU_1=zeros(64,1);
```

```
ONU_2=zeros(64,1);

Nofports=zeros(90,nc-1);

%d: Distancia en Km
d=di;

%Se recorre el sistema para todos los ángulos y distancias
for a=(nc-1):-1:1
   for b=(nf-1):-1:1
       %Si el ángulo y distancia son validas
        if angle(b,a)

        % Crear un servidor común con Optisystem
        optsys = actxserver('optisystem.application');
        % Pausa para esperar a que Optisystem abra antes de abrir
        % el proyecto
        pause(15);

        optsys.Open('C:\Users\Richar\Documents\MATLAB\TESIS\sim2.osd');
        % Especificacar y definir los parámetros que serán cambiados

        ParameterName1  = 'Filename';
        Document        = optsys.GetActiveDocument;
        LayoutMngr      = Document.GetLayoutMgr;
        CurrentLyt      = LayoutMngr.GetCurrentLayout;
        CurrentSweep    = CurrentLyt.GetIteration;
        Canvas          = CurrentLyt.GetCurrentCanvas;

        % Especificar los componentes cuyos parámetros serán modificados
        % o leidos
        fibra      = Canvas.GetComponentByName('Optical Fiber');
        fibra2     = Canvas.GetComponentByName('Optical Fiber_1');
        OLTA       = Canvas.GetComponentByName('Eye Diagram Analyzer');
        OLTB       = Canvas.GetComponentByName('Eye Diagram Analyzer_4');
        ONUA       = Canvas.GetComponentByName('Eye Diagram Analyzer_1');
        ONUB       = Canvas.GetComponentByName('Eye Diagram Analyzer_3');
        polsplit   = Canvas.GetComponentByName('Polarization Splitter');
        polcomb    = Canvas.GetComponentByName('Polarization Combiner');
        polsplit1   = Canvas.GetComponentByName('Polarization Splitter_1');
        polcomb1    = Canvas.GetComponentByName('Polarization Combiner_1');
        powersplit  = Canvas.GetComponentByName('Power Splitter');
        Amplificador= Canvas.GetComponentByName('Optical Amplifier');
        Amplificador.SetParameterValue( 'Gain', A );

        % Número inicial de puertos del splitter de potencia u ONU's
        % permitidas
        ports=Nofports(b+1,a);
```

```
        if ports<=0
           ports=3;
        end

        powersplit.SetParameterValue( 'Number of output ports', ports)
        fibra.SetParameterValue( 'Length', (a+d) )
        fibra2.SetParameterValue( 'Length', (a+d) )
        polsplit.SetParameterValue('Device angle',b)
        polsplit1.SetParameterValue('Device angle',b)
            while ports>2 && ports<1001
            [a+d b ports]
            powersplit.SetParameterValue('Number of output ports',ports)

                Document.CalculateProject( false , true);

                OLT1(:,b,a)=OJO(OLTA);
                OLT2(:,b,a)=OJO(OLTB);
                ONU1(:,b,a)=OJO(ONUA);
                ONU2(:,b,a)=OJO(ONUB);

                if ( (OLT1(11,b,a)>1e-9)|| (OLT2(11,b,a)>1e-9)||...
                        (ONU1(11,b,a)>1e-9)||(ONU2(11,b,a)>1e-9) )
                    "RESULTADO:"
                    [a b ports-1]
                    ports=2;
                else
                    Nofports(b,a)=ports;
                    ports=ports+1;
                    ONU_1=ONU1;
                    ONU_2=ONU2;
                    OLT_1=OLT1;
                    OLT_2=OLT2;
                end
            end

            optsys.Quit;
            delete(optsys)
            pause(2);
        end
   end
end

%Nofports:  RESULTADO DE LA SIMULACIÓN, VER ESTA VARIABLE AL TERMINAR
    %           LA EJECUCIÓN
```

A.4. Sistema utilizado para simulación cooperativa MatLab y Optysistem

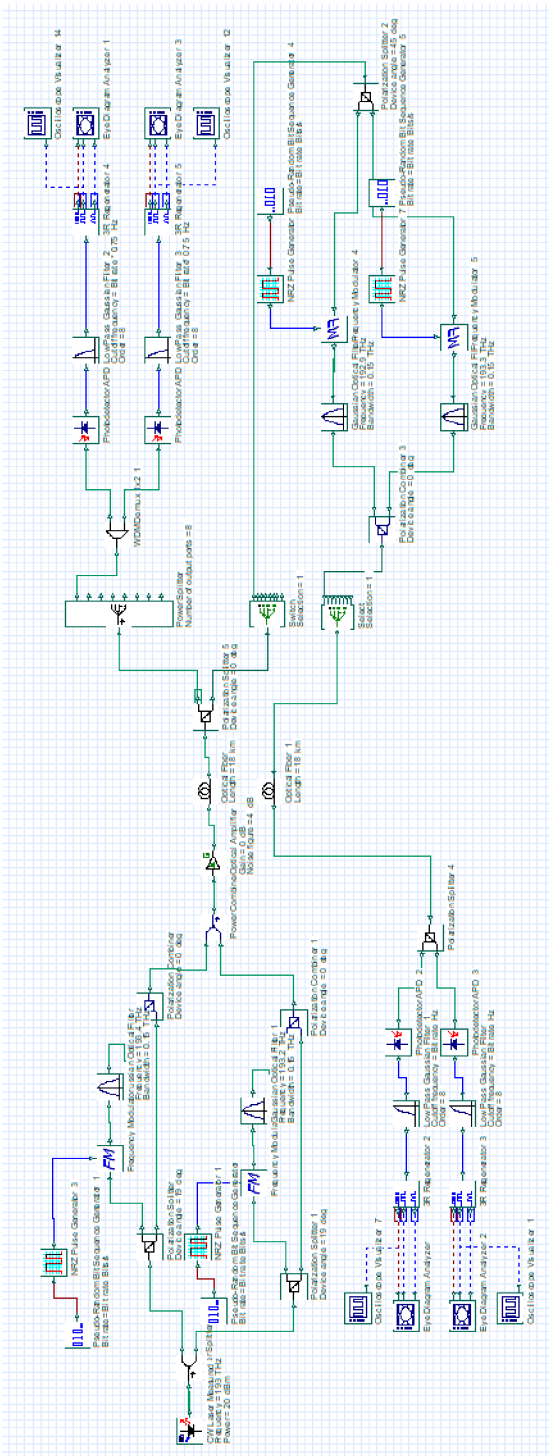


Figura A.1 Sistema en OptiSystem para simulación cooperativa