



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

Sistema de Posgrado
Maestría en Telecomunicaciones

Tema:

**“DISEÑO DE UN SISTEMA MÚLTIPLES ENTRADAS
MÚLTIPLES SALIDAS PARA COMUNICACIONES ÓPTICAS
EN ESPACIO LIBRE (FSO) COMO ALTERNATIVA EN LOS
ENLACES INALÁMBRICOS DE ÚLTIMA MILLA”**

Autor:

Jesús Estuardo Peñafiel Peñafiel

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de
Magister en Telecomunicaciones

Tutor:

MSC. MANUEL ROMERO PAZ

Guayaquil, 11 de agosto de 2020



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

Sistema de Posgrado
Maestría en Telecomunicaciones

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Ing. Jesús Estuardo Peñafiel Peñafiel como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones.

Guayaquil, 11 de agosto de 2020

TUTOR

MSc. Manuel Romero Paz

DIRECTOR DEL PROGRAMA

MSc. Manuel Romero Paz



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Jesús Estuardo Peñafiel Peñafiel

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación “**Diseño de un sistema múltiples entradas múltiples salidas para comunicaciones ópticas en espacio libre (FSO) como alternativa en los enlaces inalámbricos de última milla**” previa a la obtención del Título de Magíster en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido

Guayaquil, 11 de agosto de 2020

EL AUTOR

Ing. Jesús Estuardo Peñafiel Peñafiel



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

AUTORIZACIÓN

Yo, Jesús Estuardo Peñafiel Peñafiel

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “**Diseño de un sistema múltiples entradas múltiples salidas para comunicaciones ópticas en espacio libre (FSO) como alternativa en los enlaces inalámbricos de última milla**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 11 de agosto de 2020

EL AUTOR

Ing. Jesús Estuardo Peñafiel Peñafiel

REPORTE DE URKUND

URKUND Luis Córdova Rivadeneria (luis_cordova)

Documento: [TT Jesus Peñafiel Peñafiel.docx](#) (D77183485)

Presentado: 2020-07-26 01:23 (-05:00)

Presentado por: Luis Córdova Rivadeneria (lcordova@yahoo.com)

Recibido: luis.cordova.ucsg@analysis.orkund.com

19% de estas 32 páginas, se componen de texto presente en 4 fuentes.

Lista de fuentes Bloques

Categoría	Enlace/nombre de archivo
	Jorge_Diaz_TT_2018.docx
	Giler_Titulacion_2019.docx
	SUAREZ_GINO_FINAL.docx

Sistema de Posgrado Maestría en Telecomunicaciones

Tema: "DISEÑO DE UN SISTEMA MÚLTIPLES ENTRADAS MÚLTIPLES SALIDAS PARA COMUNICACIONES ÓPTICAS EN ESPACIO LIBRE (FSO) COMO ALTERNATIVA EN LOS ENLACES INALÁMBRICOS DE ÚLTIMA MILLA"

Autor: Jesús Estuardo Peñafiel Peñafiel

Trabajo de titulación previo a

la obtención del grado de Magister en Telecomunicaciones

Tutor: MSC. MANUEL ROMERO PAZ

Guayaquil, a los XX días del mes de agosto de 2019

Sistema de Posgrado Maestría en

Telecomunicaciones

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Ing. Jesús Estuardo Peñafiel Peñafiel como requerimiento parcial para la obtención del

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a Dios y la virgen que siempre me han protegido y guiado por el sendero del bien en los diferentes rumbos que he tomado en mi vida.

A toda mi familia que siempre han estado a mi lado brindándome todo su apoyo, en especial a mi muy querida hermana Fanny Peñafiel quien con esfuerzo ha sido un pilar fundamental para cumplir cada una de las metas que me he propuesto.

A mis padres que han sido el motor en mi vida dándome un consejo sabio para seguir adelante y nunca darme por vencido.

A mi hija María Cristina que es mi motivación e inspiración para continuar esforzándome y cumpliendo los retos que me he propuesto en el ámbito profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento muy especial a la Virgen de la Nube, a mis padres, María de la Nube Peñafiel y José Francisco Peñafiel, quienes con sus consejos y sabiduría me han dado fuerza y ánimos para alcanzar mis metas

A mi hermana Fanny que han sido con una madre, siendo un apoyo y ejemplo de esfuerzo y dedicación hace posible este logro en mi vida.

A mi director de tesis Ingeniero Manuel Romero quien me ha brindado su mano y dedicación para llevar a cabo la tesis.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f.

MSc. Manuel Romero Paz
TUTOR

f.

MSc. Manuel Romero Paz
DIRECTOR DEL PROGRAMA

f.

MSc. Edgar Quezada Calle
REVISOR

f.

MSc. Luis Córdova Rivadeneira
REVISOR

RESUMEN

La creciente demanda en el uso de Internet, la necesidad por acceder a un servicio de buena calidad en lugares donde muchas veces el acceso es limitado, hace mirar a las Comunicaciones Ópticas en el espacio libre como una alternativa, el presente trabajo analiza los fundamentos teóricos de estos sistemas, para luego elaborar un diseño, el mismo que consta de dos modelos, uno con modulación óptica interna y otro con modulación óptica externa. Para ejecutar el diseño y evaluar el rendimiento se utiliza el software Matlab realizando de esta manera pruebas con diferentes señales y en diferentes escenarios, el software Optisystem 16 permite simular un canal FSO, donde se puede variar: distancia, atenuación, pérdidas entre otro, de esta manera evaluar cómo se comporta ante estas perturbaciones y determinar eficiencia de estos sistemas o indicar los parámetros a cambiar para mejorar la misma. Para esta investigación se trabajará los métodos de análisis, síntesis y modelación, para de esta manera determinar la eficiencia del sistema.

Palabras clave: Sistema, MIMO-FSO, Canal FSO, Microondas, Infrarrojo, Li-Fi.

ABSTRACT

The growing demand in the use of the Internet, the need to access a good quality service in places where access is often limited, makes Optical Communications in free space look like an alternative, based on this, the work analyzes the theoretical foundations of these systems and elaborate a design, the same one that consists of two models, the first one is based on internal optical modulation and the other works with external optical modulation. To execute the design and evaluate the performance, Matlab is used, thus carrying out tests with different signals and in different scenarios, Optisystem 16 allows simulating an FSO channel, where it is possible to vary: distance, attenuation, losses and others, analyzing these disturbances to determine the efficiency of these systems or indicate the parameters to change and improve it. For this research, the methods of analysis, synthesis and modeling will be worked on, in order to determine the efficiency of the system.

Keys words: System, MIMO-FSO, FSO Channel, Microwave, Infrared, Li-Fi.

Índice General

DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTOS.....	VII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
Índice General.....	XI
Índice de Figuras.....	XIV
Índice de Tablas	XVII
CAPÍTULO I	2
Generalidades de la Propuesta de Investigación	2
1.1 Importancia	2
1.2 Justificación	2
1.3 Antecedentes.....	3
1.4 Situación Problémica.....	4
1.4.1 Problema de investigación	5
1.4.2 Objeto y campo	5
1.5 Objetivos	5
1.5.1 Objetivo General.....	5
1.5.2 Objetivos específicos	5
1.6 Hipótesis	6
1.7 Métodos y técnicas de la Investigación	6
CAPÍTULO II	7
Fundamentos Técnicos de las Comunicaciones Ópticas Inalámbricas.....	7
2.1 Espectro Electromagnético.....	7
2.1.1 Ondas Radio frecuencia	8
2.1.2 Microondas	9
2.1.3 Infrarrojo.....	10
2.1.4 Luz visible	11
2.2 Comunicaciones Ópticas Inalámbricas.....	11
2.2.1 Tipos de comunicaciones Ópticas inalámbricas.....	12
2.2.1.1 Comunicaciones Luz Visible (VLC).....	12
2.2.1.2 Light Fidelity Li-Fi	12
2.2.1.3 Comunicaciones Ópticas en el espacio Libre (FSO).....	13

2.2.2 Sistemas FSO	13
2.2.2.1 Historia de Sistema FSO	14
2.2.2.2 Ventajas de Sistemas FSO	15
2.2.2.3. Desventajas de Sistemas FSO.....	16
2.3 Técnicas de Comunicación utilizadas en los sistemas FSO.....	16
2.3.1 Modulación QAM	16
2.3.2. Demodulación M-QAM.....	17
2.3.3 Transformada Rápida de Fourier	18
2.3.4 OFDM.....	21
2.3.5 Modulación Óptica.....	22
2.3.6 Modulación espacial óptica OFDM (OSM-OFDM)	22
2.3.7 Modulación Espacial Óptica -OFDM sin componente DC (NDCO-OFDM)	24
2.3.8 Modulación Coherente Óptica (CO-OFDM).....	25
2.4 Tipos de Modulación Óptica.....	28
2.4.1 Modulación Directa.....	28
2.4.2 Modulación Externa.....	28
2.4.2.1 Modulación Electroóptica	28
2.4.2.1.1 Modulación Electroóptica de Fase.....	29
2.4.2.1.2 Modulación Electroóptica de Amplitud	30
2.5 Canal FSO	32
2.5.1 Perdidas en un Canal no guiado	33
2.5.2 Perdidas por turbulencia.....	33
2.5.3 Perdidas por Apuntamiento.....	33
2.5.4 Pérdidas Atmosféricas	34
2.6 Elementos Ópticos del Sistema FSO.....	35
2.6.1 Láser.....	35
2.6.2 Fotodetectores	36
2.6.3 Antenas Ópticas.....	37
CAPÍTULO III	39
Diseño del sistema MIMO FSO Propuesto	39
3.1 Sistema MIMO FSO con modulación Óptica de Intensidad y Detección Directa.....	39

3.1.1 Transmisor.....	39
3.1.2 Receptor.....	44
3.2 Sistema MIMO FSO con modulación óptica externa y detección coherente	48
3.2.1 Transmisor.....	48
3.2.2 Receptor.....	49
CAPÍTULO IV.....	51
Simulaciones y Resultados.....	51
4.1 Sistema MIMO FSO con modulación óptica de intensidad y detección directa.	51
4.1.1 Transmisor.....	51
4.1.2 Receptor.....	54
4.2 Sistema MIMO FSO con Modulación Óptica Externa y Detección Coherente	59
4.2.1 Transmisor.....	59
4.2.2 Receptor.....	64
Conclusiones.....	73
Referencias bibliográficas	77

Índice de Figuras

Figura 2. 1 Espectro Electromagnético	7
Figura 2. 2 Espectro luz visible.....	11
Figura 2. 3 Tecnología Li-Fi.....	13
Figura 2. 4 Instalación de Sistema FSO.....	14
Figura 2. 5 Primera transmisión Óptica.....	15
Figura 2. 6 Constelación 16- QAM.....	17
Figura 2. 7 Demodulación M-QAM en el receptor	18
Figura 2. 8 Constelación de Demodulación 16-QAM.....	18
Figura 2. 9 Acondicionamiento de la señal para aplicar FFT	19
Figura 2. 10 Dualidad entre el dominio de tiempo-frecuencia.....	20
Figura 2. 11 Efecto mariposa en FFT	21
Figura 2. 12 Sub-portadoras de OFDM.....	21
Figura 2. 13 Transmisor OFDM.....	22
Figura 2. 14 Mapeo Espacial para OSM-OFDM	23
Figura 2. 15 Sistema OSM-OFDM.....	24
Figura 2. 16 Sistema NDCO-OFDM	25
Figura 2. 17 Sistema COOFDM	26
Figura 2. 18 CO-OFDM Transmisor.....	26
Figura 2. 19 Detector Coherente CO-OFDM.....	27
Figura 2. 20 Receptor CO-OFDM	27
Figura 2. 21 Modulador Óptico de fase	29
Figura 2. 22 Modulador Mach Zehnder	30
Figura 2. 23 Estructuras del Modulador MZ	31
Figura 2. 24 Perdidas en Fibra óptica en función de la longitud de onda.....	32
Figura 2. 25 Divergencia en función de la distancia recorrida entre Tx-Rx.....	36
Figura 2. 26 Fotodetector QPIN	36
Figura 2. 27 Potencia vs voltaje en Fotodetector QPIN	37
Figura 2. 28 Tipo de antenas Emisoras	38
Figura 2. 29 Tipo de antenas Receptoras.....	38
Figura 3. 1 Conversión serie a paralelo	39
Figura 3. 2 Modulación 4-QAM.....	40
Figura 3. 3 Mapeo de Símbolos 4-QAM.....	40

Figura 3. 4 Matriz V formado por R-U.....	41
Figura 3. 5 Transformada rápida de Fourier Inversa.....	42
Figura 3. 6 Valores a la salida de IFFT del Transmisor 1	43
Figura 3. 7 Valores Positivos para enviar por Láser.....	43
Figura 3. 8 Circuito Usado para conversión Eléctrica a óptica	44
Figura 3. 9 Fotodetector tipo avalancha (APD).....	45
Figura 3. 10: Estimación de canal.....	45
Figura 3. 11 Valores reales positivos y negativos receptados	46
Figura 3. 12 Transformada rápida de Fourier FFT a cada uno de los Receptores	47
Figura 3. 13 Proceso de Demodulación y Reconstrucción de Información Receptada	47
Figura 3. 14 Sistema MIMO FSO con modulación óptica externa.....	48
Figura 3. 15 Sistema Homodino.....	49
Figura 3. 16 Receptor MIMO-FSO con detección Coherente	50
Figura 4. 1 Transmisor MIMO-FSO con Modulación óptica de intensidad.....	51
Figura 4. 2 Constelación de modulación 4-QAM	52
Figura 4. 3 Valores a la salida de la IFFT	52
Figura 4. 4 Valores repiten en la segunda mitad del vector con signo cambiado	53
Figura 4. 5 Valores acondicionados para modulación óptica Interna.....	53
Figura 4. 6 Receptor MIMO-FSO con Detección Directa.....	54
Figura 4. 7 Distribución de Probabilidad en el receptor 1	54
Figura 4. 8 Valores recuperados Positivos y Negativos.....	55
Figura 4. 9 Valores receptados del símbolo $(-1+1j)$ y 0	55
Figura 4. 10 Valores receptados del símbolo $(-1-1j)$ y 0	56
Figura 4. 11 Valores receptados del símbolo $(1-1j)$ y 0	56
Figura 4. 12 Valores receptados del símbolo $(1+1j)$ y 0	57
Figura 4. 13 Rendimiento del Sistema MIMO-FSO con IM/DD.....	57
Figura 4. 14 Rendimiento del Sistema MIMO-FSO con SISO-FSO.....	58
Figura 4. 15 Constelación de símbolos $(1+1j)$ y 0 para TX-1	59
Figura 4. 16 Constelación de símbolos $(1+1j)$ y 0 para TX-2.....	60
Figura 4. 17 Constelación de símbolos $(-1+1j)$ y 0 para TX-3.....	60
Figura 4. 18 Constelación de símbolos $(-1+1j)$ y 0 para TX-4.....	61

Figura 4. 19 Modulaci3n MZM para Transmisor 1	62
Figura 4. 20 Modulaci3n MZM para Transmisor 2	62
Figura 4. 21 Modulaci3n MZM para Transmisor 3	63
Figura 4. 22 Modulaci3n MZM para Transmisor 4	63
Figura 4. 23 Par3metros del Canal FSO en OptiSystem 16.....	64
Figura 4. 24 Detecci3n Coherente realizada para Receptor 1	65
Figura 4. 25 Detecci3n Coherente realizada para Receptor 2.....	65
Figura 4. 26 Tasa de Error de Bit para un enlace FSO de 1Km.....	66
Figura 4. 27 Tasa de Error de Bit para un enlace FSO de 3Km.....	66
Figura 4. 28 Cambio en apertura de lente Transmisor y Receptor	67
Figura 4. 29 BER para enlace FSO de 3Km con par3metros de antenas modificados	67
Figura 4. 30 S3mbolos recuperados $(1+1j)$ y 0	68
Figura 4. 31 S3mbolos recuperados $(1-1j)$ y 0	68
Figura 4. 32 S3mbolos recuperados $(-1+1j)$ y 0.....	69
Figura 4. 33 S3mbolos recuperados $(-1-1j)$ y 0.....	69
Figura 4. 34 Se1al enviada	70
Figura 4. 35 Se1al Recibida con $K=5$	70
Figura 4. 36 Se1al Recibida con $K=2$	71
Figura 4. 37 Se1al Recibida con $K=3$	71
Figura 4. 38 Se1al de Audio enviada.....	71
Figura 4. 39 Se1al de Audio Receptada con $K=1$	72
Figura 4. 40 Se1al de Audio Receptada con $K=3$	72
Figura 4. 41 Se1al de Audio Receptada con $K=5$	72

Índice de Tablas

Tabla 2 1 Longitudes de onda y frecuencias de espectro electromagnético	8
Tabla 2 2 Frecuencias usadas en Radio Frecuencia	9
Tabla 2 3 Banda de Frecuencia de Microonda	9
Tabla 2 4 Rango de longitud de onda Infrarroja	10
Tabla 2 5 Bandas Infrarrojas usadas en Telecomunicaciones.....	10
Tabla 4. 1 Parámetros usados para la simulación	58
Tabla 4. 2 Parámetros de laser Tx-1	61
Tabla 4. 3 Parámetros de laser Tx-2	62
Tabla 4. 4 Parámetros de laser Tx-3	63
Tabla 4. 5 Parámetros de laser Tx-4	63
Tabla 4. 6 Parámetros de receptor 1	64
Tabla 4. 7 Parámetros del receptor 2	65

CAPÍTULO I

Generalidades de la Propuesta de Investigación

Este capítulo define las generalidades y los principios por los cuales se ha optado por la propuesta a investigar, determinando cual es la importancia, justificación, antecedentes, problema, causas y la solución que se pretende dar con esta investigación.

1.1 Importancia

Con la creciente demanda en las comunicaciones inalámbricas, los usuarios necesitan tener un servicio de calidad y eficiencia, esta tecnología ha trabajado desde sus inicios con el espectro de radio frecuencia como su único canal para la comunicación.

Al trabajar con el espectro radio eléctrico, se está limitado en cuanto al ancho de banda y velocidad de transmisión para los clientes que utilizan diferentes servicios que se transmiten por este canal, entonces es ahí donde se busca alternativas para trabajar con otras bandas de frecuencias.

Es aquí donde nace la importancia de buscar nuevos canales para estas comunicaciones, que permitan avanzar y garantizar un servicio óptimo a los usuarios que cada vez exigen y requieren un mayor ancho de banda.

Con la aparición de la fibra óptica, que trabaja con el espectro infrarrojo (IR) del espectro electromagnético, se garantiza un mayor ancho de banda y velocidad de transmisión por un medio guiado, en este caso la fibra, que está hecha de un material de vidrio o plástico, por lo tanto, las comunicaciones ópticas en el espacio libre usan el mismo espectro infrarrojo, pero la diferencia es que el medio de transmisión es el espacio libre alcanzando velocidades de los Gbps.

1.2 Justificación

En la búsqueda de nuevas maneras para transmitir información de manera inalámbrica, es donde aparecen las comunicaciones ópticas en el espacio

libre o FSO (Free Space Optical), que trabajan en rangos de frecuencias mayores a las de radio.

Las frecuencias con que trabaja FSO están ubicadas entre los 150 y 500THz es decir en el espectro infrarrojo, luz visible y ultravioleta, una banda mayor a la de las ondas de radio frecuencia y microondas, dando como resultado tener mayores velocidades, además no tienen ningún limitante en el uso del espectro de estas bandas ya que son de uso libre o sin licencia por lo tanto no hay ningún costo para trabajar con ellas.

Los sistemas FSO son muchos más seguros en comparación con los RF, además tener un sistema MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) garantizará la robustez del sistema, así como la velocidad de transmisión que llegue a los Gbps.

La limitante de estos sistemas es la distancia, es por esta razón que estos sistemas se utilizan como última milla en enlaces inalámbricos, como backhaul en las redes de telefonía celular 4G y 5G, así como en las redes híbridas en las que se combinen con sistemas de radio frecuencia y FSO.

1.3 Antecedentes

Las estaciones de radio, televisión, telefonía celular y muchas otras aplicaciones, usan el espectro de radio frecuencia y microondas como canal para brindar diversos servicios a los usuarios de manera inalámbrica

Este es el canal más común y utilizado para las comunicaciones inalámbricas, al trabajar solo con este espectro provoca que los enlaces en bandas libres se vuelvan muy conflictivo, ya que hay una gran cantidad de ondas que provocan interferencia, afectando a los enlaces y por otra parte trabajar con bandas licenciadas resulta costoso.

Los sistemas SISO (Simple-Input Single-Output), que utilizan un solo emisor y un receptor, limitan la velocidad para las comunicaciones, razón por la cual se usan sistemas MIMO para garantizar una mejor comunicación y velocidad de transmisión entre estos.

La aparición de la fibra óptica en las comunicaciones alámbricas, al poder enviar gran cantidad de información y a grandes velocidades, ha despertado el interés en las comunicaciones inalámbricas por trabajar con estas frecuencias, que en el espectro electromagnético se las denomina: ondas infrarrojas, luz visible y ultravioleta.

Se da así una nueva alternativa a las comunicaciones inalámbricas, para trabajar con este tipo de frecuencias y desahogar el espectro de radio. A este tipo de comunicaciones se denomina FSO, que permite trabajar con un mayor ancho de banda y por lo tanto tener una mayor velocidad de transmisión, y no son licenciadas lo que implica que se puede trabajar en estas frecuencias sin ningún costo.

Empresas encargadas del desarrollo de tecnologías de comunicaciones ópticas en el espacio óptico como: fSONA, EC system, entre otras, desarrollan equipos para comunicaciones inalámbricas ópticas, que usan el espectro infrarrojo para transmitir información, pero no se ha encontrado en la literatura revisada suficiente información referente a las técnicas que usan el emisor y receptor de esos sistemas.

1.4 Situación Problemática

Nuevas tecnologías en las comunicaciones inalámbricas, como la aparición de 5G y el internet de las cosas IoT (Internet of Things), buscan dar un servicio de mejor calidad y una mayor velocidad a los usuarios, al trabajar con el espectro de radio frecuencia para las comunicaciones de este tipo se tienen los siguientes aspectos:

- La sobresaturación del espectro de radio frecuencia para las comunicaciones inalámbricas.
- Limitación en ancho de banda. lo que provoca una comunicación limitada de los usuarios
- La interferencia que existe entre estas frecuencias provoca un bajo rendimiento entre las comunicaciones inalámbricas

- Trabajar con frecuencia licenciadas es costoso

1.4.1 Problema de investigación

La sobresaturación del espectro de radio frecuencia para la transmisión de datos en las comunicaciones inalámbricas, impide brindar una óptima prestación a los diferentes proveedores que utilizan este espectro para dar un servicio a sus clientes.

1.4.2 Objeto y campo

El objeto de estudio de esta investigación son las comunicaciones inalámbricas y se enfocará en el campo de las comunicaciones ópticas inalámbricas en el espacio libre con sistemas de múltiples entradas y salidas.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Diseñar un sistema MIMO en comunicaciones FSO, para brindar una alternativa en las comunicaciones inalámbricas en enlaces de última milla, que permita descongestionar el tráfico de datos, mejorando la velocidad de transmisión que existe en los enlaces de radio frecuencia.

1.5.2 Objetivos específicos

- Realizar el análisis de los fundamentos teóricos de cada uno de los componentes que conforman el emisor y receptor de un sistema FSO-MIMO.
- Realizar el análisis del comportamiento del sistema FSO-MIMO bajo determinadas características propias del canal FSO.
- Realizar una simulación del sistema FSO-MIMO propuesto, que conste de un emisor, canal y receptor, en la que se evalúe la eficiencia del sistema propuesto.

1.6 Hipótesis

Un sistema MIMO para comunicación FSO, en el que se identifique cuáles son las técnicas óptimas de modulación, codificación, demodulación y decodificación, para un mejor desempeño del emisor y receptor respectivamente y mediante una simulación se analizará el comportamiento y se determinará la robustez, para que sea una alternativa en los enlaces inalámbricos de última milla.

1.7 Métodos y técnicas de la Investigación

Para esta investigación se trabajará con el método de análisis y síntesis, ya que mediante el análisis que significa descomposición, se estudiará por separado las características de cada uno de los elementos que conforman el receptor y emisor, mediante la recopilación de información bibliográfica, para luego realizar el diseño mediante la metodología de síntesis, es decir englobar y engranar cada uno de los elementos para diseñar el sistema a usar en las comunicaciones ópticas en el espacio libre.

Mediante el método de modelación y con la ayuda de un software en que se pueda colocar las características antes diseñadas, se caracterizará el comportamiento del funcionamiento del sistema en diferentes condiciones y mediante la aplicación de métodos empíricos como la medición, poder analizar la BER (Bit Error Rate) que se da entre el emisor y receptor y de esta manera determinar la eficiencia del sistema.

CAPÍTULO II

Fundamentos Técnicos de las Comunicaciones Ópticas Inalámbricas

En este capítulo se tratará sobre los conceptos técnicos de los sistemas ópticos, el espectro electromagnético, las comunicaciones ópticas inalámbricas, tipos de sistemas, como está conformado un sistema FSO, y los tipos de modulación óptica que existen en la actualidad.

2.1 Espectro Electromagnético

La luz y otro tipo de radiación conforman un rango extenso que se conoce como: Espectro Electromagnético, donde están las ondas de radio, microondas, infrarrojas, luz visible entre otras. Hay 2 características importantes que definen a las ondas electromagnéticas, la frecuencia y longitud de onda, relacionadas entre sí, por la ecuación 2.1

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

Donde:

f = Frecuencia (Hz)

c = velocidad de la luz (3×10^8 m/s)

λ = longitud de onda (metros)

La importancia de conocer este tipo de ondas es que cada una de ellas se utiliza para una determina aplicación. La figura 2.1 muestra todo el espectro electromagnético.

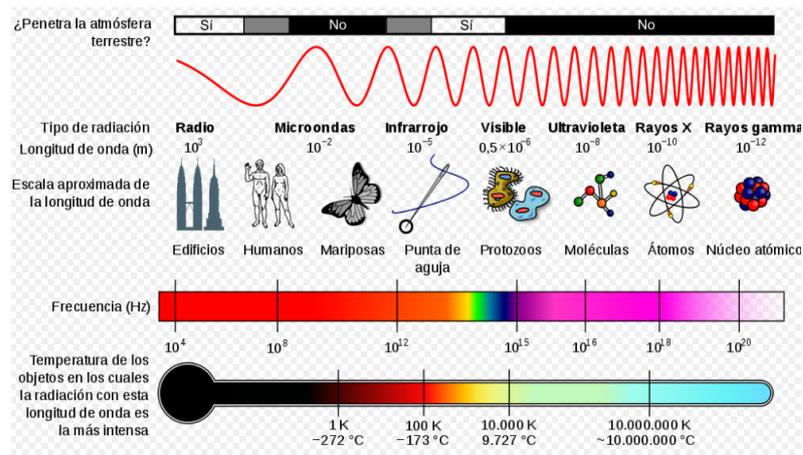


Figura 2. 1 Espectro Electromagnético

Fuente: (Pérez, sf)

Como se observa en la figura 2.1 el espectro electromagnético va desde las ondas de radio hasta las microondas, utilizadas particularmente para las comunicaciones inalámbricas en telecomunicaciones, pasando por infrarrojo, visible, ultravioleta, hasta las ondas de rayos X y gamma utilizados particularmente en medicina.

La tabla 2.1 indica con mayor claridad cómo se divide el espectro electromagnético, las longitudes de ondas y banda de frecuencia donde se ubica.

Tabla 2 1 Longitudes de onda y frecuencias de espectro electromagnético

		Longitud de onda	Frecuencia
Radio	Muy Baja Frecuencia	> 10 Km	< 30 KHz
	Onda Larga	< 10 Km	> 30 KHz
	Onda media	< 650 m	> 650 KHz
	Onda corta	< 180 m	> 1.7 MHz
	Muy alta frecuencia	< 10 m	> 30 MHz
	Ultra alta frecuencia	< 1 m	> 300 MHz
Microondas		< 30 cm	> 1.0 GHz
Infrarrojo	Lejano	< 1 mm	> 300 GHz
	Medio	< 50 μ m	> 6.0 THz
	Cercano	< 2.5 μ m	> 120 THz
Luz Visible		< 780 nm	> 384 THz
Ultravioleta	Cercano	< 380 nm	> 789 THz
	Extremo	< 200 nm	> 1.5 PHz
Rayos X		< 10 nm	> 30.0 PHz
Rayos Gamma		< 10 pm	> 30.0 EHz

Fuente: (Suárez, 2014)

2.1.1 Ondas Radio frecuencia

Se conoce como radio frecuencia al segmento de ondas del espectro electromagnético con menor frecuencia, pero con mayor longitud de ondas en comparación con el resto de las ondas que conforman dicho espectro.

En telecomunicaciones son utilizadas para comunicaciones inalámbricas: en enlaces de largo alcance y las comunicaciones internas para el servicio de internet en las viviendas.

El espectro de radio frecuencia se divide en subniveles de ondas que van desde los 3Hz hasta los 300MHz, con su respectiva banda de frecuencia, longitudes de ondas y denominación característica. Ver la tabla 2.2.

Tabla 2 2 Frecuencias usadas en Radio Frecuencia

Banda	Denominación	Frec. Mínima	Frec. Máxima	λ Máxima	λ Mínima
ELF	Extremely Low	-	3 kHz	-	100 km
VLF	Very Low	3 Hz	30 Hz	100 km	10 km
LF	Low	30 Hz	300 kHz	10 km	1 km
MF	Medium	300 kHz	3 MHz	1 km	100 m
HF	High	3 MHz	30 MHz	100 m	10 m
VHF	Very High	30 MHz	300 MHz	10 m	1 m
UHF	Ultra High	300 MHz	3 GHz	1 m	10 cm
SHF	Super High	3 GHz	30 GHz	10 cm	1 cm
EHF	Extremely High	30 GHz	300 GHz	1 cm	1 mm

Fuente: (Murillo, 2012)

2.1.2 Microondas

Las microondas van desde los 300MHz hasta los 30GHz y con longitudes de onda que van desde 1m hasta los 10mm.

Dentro de este espectro se puede identificar a tres subniveles específicos: UHF (Ultra High Frequency), que va desde 0.3GHz hasta 3 GHz, SHF (Super High Frequency), de 3GHz a 30GHz, EHF (Extremely High Frequency) de 30GHz a 300GHz. La tabla 2.3 indica la clasificación de bandas en microondas y la denominación para cada una de ellas.

Tabla 2 3 Banda de Frecuencia de Microonda

Banda	frec. mínima	frec. máxima	λ máxima	λ mínima
L	1 GHz	2 GHz	30 cm	15 cm
S	2 GHz	4 GHz	15 cm	7.5 cm
C	4 GHz	8 GHz	7.5 cm	3.75 cm
X	8 GHz	12.4 GHz	3.75 cm	2.42 cm
Ku	12.4	18 GHz	2.42 cm	1.66 cm
K	18 GHz	26.5 GHz	1.66 cm	1.11 cm
Ka	26.5	40 GHz	11.1 mm	7.5 mm
mm	40 GHz	300	7.5 mm	1 mm

Fuente: (Murillo, 2012)

2.1.3 Infrarrojo

La luz infrarroja o IR es una radiación electromagnética situada entre las microondas y la luz visible con longitudes de onda menores a las microondas, pero mayores a las de luz visible. Se conoce como infrarroja ya que está ubicada por debajo de la luz roja visible.

El rango de la luz infrarroja varía desde los 700nm a 1mm. De igual manera esta parte del espectro presentan una sub-división, la tabla 2.4 indica el nombre y longitudes de ondas que se utiliza en IR.

Tabla 2 4 Rango de longitud de onda Infrarroja

Designación	Nomenclatura	Rango Longitud de onda
Infrarrojo Cercano	NIR	780-3000nm
Infrarrojo medio	MWIR	3000-600nm
Infrarrojo Lejano	LWIR	6000-15000nm
Extremo Infrarrojo	EIR	0.15-1mm

Fuente: (Murillo, 2012)

En telecomunicaciones se usa este tipo de ondas para enviar información por el muy conocido medio como es la fibra óptica, o mediante el espacio libre en las Comunicaciones FSO. Estandarizando así el rango de longitud de onda y nomenclatura para estas bandas, la tabla 2.5 indica lo antes mencionado.

Tabla 2 5 Bandas Infrarrojas usadas en Telecomunicaciones

Banda	Longitud de onda
Banda O	1260-1360nm
Banda E	1360-1460nm
Banda S	1460-1530nm
Banda C	1530-1565nm
Banda L	1565-1625nm
Banda U	1625-1675nm

Fuente: (Murillo, 2012)

A diferencia de las ondas de radio y microondas que pueden penetrar y pasar obstáculos, este tipo de ondas necesitan tener una línea de vista

directa, sin obstáculos o elementos que corte la luz entre el emisor o receptor para tener un óptimo funcionamiento en un enlace inalámbrico.

2.1.4 Luz visible

Se conoce como luz visible a todo el espectro que puede ser observado por el ojo humano, Está en el rango de 400-800THz, situado por arriba del espectro infrarrojo y debajo de la luz ultravioleta como se indica en la figura 2.2.

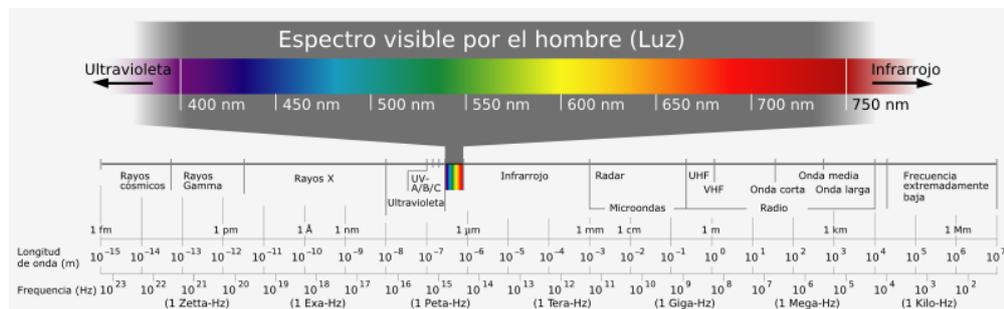


Figura 2. 2 Espectro luz visible

Fuente: (Suárez, 2014)

En los últimos años las telecomunicaciones se han enfocado en trabajar con este espectro para comunicaciones inalámbrica en interiores, ya que al tener longitudes de ondas muy pequeñas y un rango de frecuencias muy grande se pueden alcanzar velocidades de los Gbps, tal es el caso de la tecnología Light Fidelity (Li-Fi), que utiliza este espectro para transmitir información de manera inalámbrica, pudiendo superar en velocidad 100 veces al conocido Wi-Fi.

2.2 Comunicaciones Ópticas Inalámbricas

Las comunicaciones ópticas inalámbricas (OWC, Optical Wireless Communications), son aquellas que utilizan el espectro de luz: infrarrojo, visible o ultravioleta, como medio de transporte para enviar información a través de ellas.

Dentro de las comunicaciones ópticas inalámbricas se pueden tener para interiores o Indoor y en el espacio libre u Outdoor.

2.2.1 Tipos de comunicaciones Ópticas inalámbricas

Las comunicaciones ópticas inalámbricas se dividen en dos grupos: las que usan el espectro de luz visible y las que emplean el infrarrojo, como medio de transporte de información, la primera se usa para comunicaciones ópticas en interiores, la aplicación más conocida es la tecnología Li-fi, mientras que el espectro infrarrojo es usado para comunicaciones inalámbricas FSO, en la que se puede enviar información a mayores distancias.

2.2.1.1 Comunicaciones Luz Visible (VLC)

Las comunicaciones por luz visible (VLC, Visible Light Communication), es la transmisión de datos por medio del espectro de luz visible, es una alternativa nueva, que se ha estudiado mucho en los últimos años, como un desahogo al saturado espectro de radio frecuencia.

El espectro de la luz visible está en el rango de 400-800THz, donde se puede trabajar en cualquier intervalo de esta banda para la transmisión de información.

Uno de los principales factores del avance de esta tecnología es LED (Light-Emitting Diode), que es usado por la mayor parte de aplicaciones en los tiempos actuales.

Por las características de los LED's que se encienden y apagan con una gran velocidad y es imperceptible para el ojo humano, las telecomunicaciones trabajan con estos equipos para enviar información sobre los Gbps.

2.2.1.2 Light Fidelity Li-Fi

Li-Fi utiliza LED's, para transmisión de datos, enviando información por ellos, codificando la información y modulando las frecuencias a las que trabajan estos elementos.

El proceso para enviar la información es de manera binaria, uno cuando el LED emite luz y cero cuando está apagado, este proceso se realiza a una velocidad imperceptible para el ojo humano, tiene la dualidad de enviar información y servir como iluminación como se indica en la figura 2.3.



Figura 2. 2 Tecnología Li-Fi
Fuente: (Peñaherrera, 2014)

La velocidad de transmisión tiene directa relación con el color de LED, ya que entre más lejano del blanco cálido, más rápida es la transmisión, debido a que puede usarse un mayor espectro de frecuencia (Aguilar, 2014)

2.2.1.3 Comunicaciones Ópticas en el espacio Libre (FSO)

Las FSO usan ondas de luz infrarrojo para enviar información usando como medio al espacio libre. Estos sistemas constan de transmisores y receptores instalados en lugares estratégicos.

Con la aparición de la Fibra óptica en las comunicaciones inalámbricas y al alcanzar velocidades de los Gbps, se usa el espectro de luz infrarrojo para transmitir en el espacio libre, llegando a alcanzar velocidades de hasta 2.5 Gbps, aunque en pruebas de laboratorio se ha logrado alcanzar velocidades de hasta 160 Gbps.

2.2.2 Sistemas FSO

Un sistema FSO consta de un transmisor y un receptor que envían y reciben luz infrarroja respectivamente, el proceso es similar a los enlaces de fibra óptica, pero con la diferencia, que el medio de transmisión es el aire, es

decir un medio no guiado. Por lo tanto, el transmisor y receptor deben estar perfectamente enlazados para que se puedan comunicar y enviar datos entre ellos.

La información es enviada por los emisores ópticos utilizando un tipo de modulación denominada modulación en potencia, variando la energía de la señal óptica, de esta forma al transmitir un 1 lógico la intensidad de la señal es mayor que si se transmite un 0 lógico. Entonces se puede decir que un sistema FSO funciona exactamente igual que un sistema de Fibra Óptica, pero considerando que se trabaja en un canal óptico inalámbrico

Estos dispositivos se instalan en lugares donde se tenga una línea de vista directa (LOS, Line of Sight) entre emisor y receptor, por lo general en terrazas de edificios, por lo tanto al estar expuestos al aire libre, los equipos deben cumplir ciertas especificaciones técnicas, que ayude a protegerlos del viento y de la humedad. Como se muestra en la figura 2.4

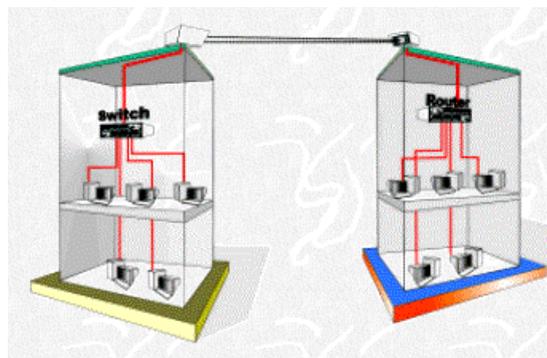


Figura 2. 3 Instalación de Sistema FSO
Fuente: (Lobatón, 2005)

2.2.2.1 Historia de Sistema FSO

Las FSO se remontan hasta el siglo XIX, cuando el científico Graham Bell inventor del teléfono, envía voz a través del aire un haz de luz aproximadamente una distancia de 180 metros. El 3 de junio de 1880, Bell realizó la primera transmisión de telefonía inalámbrica entre dos edificios cercanos, como se muestra en la figura 2.5 (Suárez, 2014).

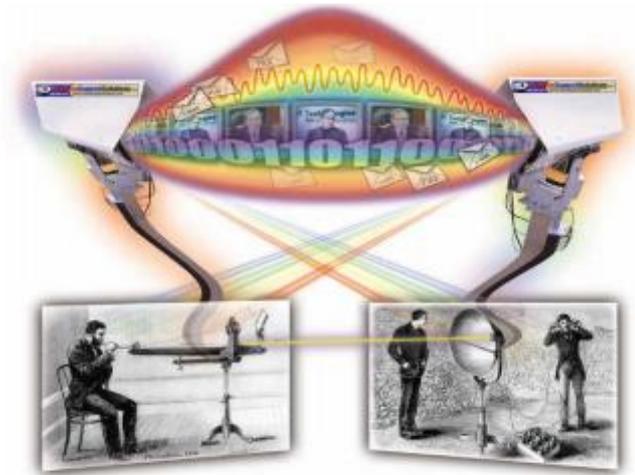


Figura 2. 4 Primera transmisión Óptica
Fuente: (Suárez, 2014)

Pero ha sido en los últimos tiempos, que el avance en la tecnología y de dispositivos laser permite transmitir datos a mayor distancia, alta velocidad y de manera muy efectiva (Suárez, 2014).

2.2.2.2 Ventajas de Sistemas FSO

- Las FSO permiten una instalación sencilla, pudiendo inclusive colocar los emisores y receptores dentro de los edificios, evitando así dañar el entorno de las fachadas de los edificios, pero teniendo en cuenta que siempre debe existir línea de vista directa entre emisor y receptor.
- Al ser una comunicación punto a punto se produce una comunicación directa, siendo así improbable de ser captada por un tercero.
- Se trabaja con un haz de luz que no afecta a la retina, la longitud de onda con la que trabaja es invisible para el ojo humano.
- Las ondas con las que trabajan estos sistemas son inmunes a interferencias electromagnéticas, por lo tanto, se pueden usar en lugares donde no llega radio frecuencia.

- Al trabajar con el espectro de luz infrarroja se puede conseguir velocidades que están en los Gbps, superando varias veces a la velocidad que se tiene en los enlaces de radio frecuencia.
- No se necesita pagar para usar cualquier frecuencia que este dentro del espectro de luz infrarrojo

2.2.2.3. Desventajas de Sistemas FSO

- La luz láser se dispersa por el aire, este tipo de comunicaciones están limitadas a unos cuantos kilómetros.
- Este tipo de comunicaciones es muy vulnerable a los factores climáticos como son lluvia, neblina, luz solar, teniendo por lo tanto restricciones para usar en ciertos lugares geográficos.
- El corte de transmisión provocado por aves u otros elementos que interfieran entre la línea de vista directa necesaria, ya que las ondas IR no traspasan objetos.
- Al no estar reguladas se puede usar laser con longitudes de ondas que aumenten el ancho de banda, pero que se vuelvan inseguras para los usuarios, afectando su integridad física.

2.3 Técnicas de Comunicación utilizadas en los sistemas FSO

Entre las características fundamentales que usan los sistemas ópticos en el espacio libre se describe las principales

2.3.1 Modulación QAM

La modulación por amplitud de cuadratura (QAM, Quadrature Amplitud Modulation), se caracteriza porque varía dos parámetros: amplitud y fase. El flujo de datos binarios, es decir unos y ceros, que son los parámetros de ingreso para esta modulación están en serie, son agrupados y distribuidos en símbolos, cada uno contiene un numero k de bits del flujo de entrada, los cuales forman una matriz ordenada y cada símbolo esta equiespaciado el uno del otro. Los símbolos QAM tienen una ubicación determinada en

un plano real $\text{R}(\mathbf{z})$ y en un plano imaginario $\text{Im}(\mathbf{z})$, como se observa en la figura 2.6 (Peñafiel, 2017).

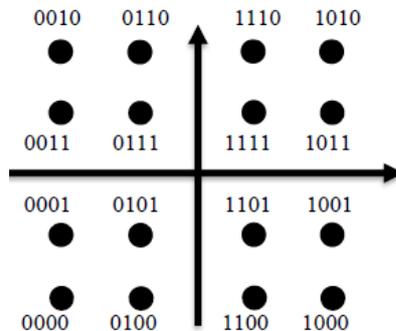


Figura 2. 5 Constelación 16- QAM
Fuente: (Peñafiel, 2017)

La forma en la que se ordenan y se distribuyen los símbolos se conoce como constelaciones, que se pueden formar como indica la ecuación 2.2.

$$M = 2^m \quad (2.2)$$

Donde:

m: es un número entero positivo

Las alternativas para QAM son: 4-QAM, 16-AQM, 64-QAM, etc. Para formar cuadraturas se tiene la ecuación 2.3 que indica el número de símbolos en función del tipo de modulación:

$$k = \log_2(M) \quad (2.3)$$

Donde:

M= es el tipo de modulación que se va a utilizar M-QAM

k= es el número de bits por símbolo que se tiene dependiendo de la modulación

2.3.2. Demodulación M-QAM

La demodulación M-QAM realiza el proceso de conversión de los símbolos en bits, que se utiliza en los receptores que captan la señal óptica y la

convierten a eléctrica, a la cual se aplica la transformada rápida de Fourier para obtener los símbolos que son demodulados por M-QAM y de esta manera recuperar la información. Esto se muestra en la figura 2.7.

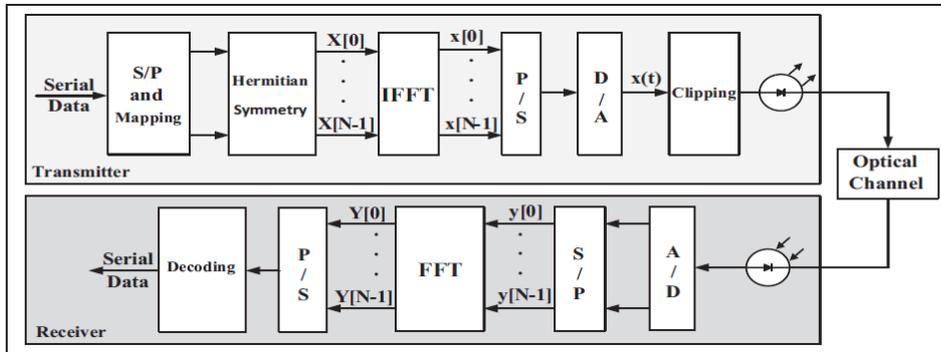


Figura 2. 6 Demodulación M-QAM en el receptor
Fuente: (Barrami, LeGuenec, Novakov, & Busson, 2014)

Al pasar por un canal óptico alámbrico o inalámbrico, se presenta ruido o interferencia que afecta a la información y por lo tanto a los símbolos que van a ser demodulados, como se muestra en la figura 2.8.

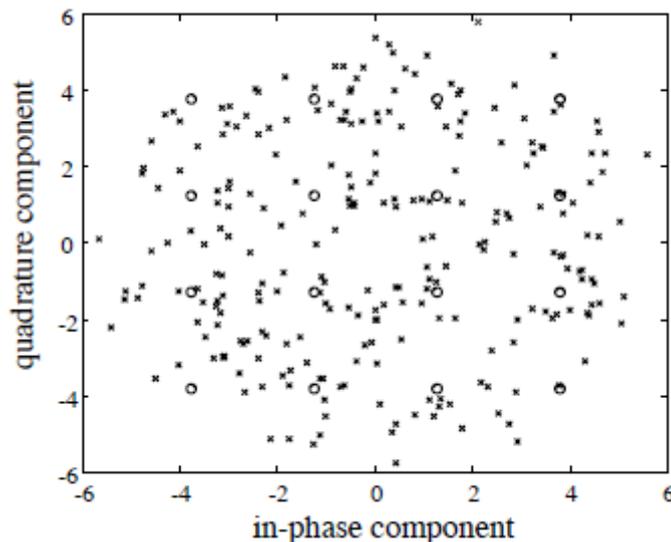


Figura 2. 7 Constelación de Demodulación 16-QAM
Fuente: (Van de Beek, J., 1998)

2.3.3 Transformada Rápida de Fourier

La transformada rápida de Fourier tiene como propósito fundamental convertir muestras que están en dominio tiempo al dominio frecuencia, usa señales discretas, por lo tanto, está dada por la ecuación 2.4

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) wn^{(j-1)(k-1)} \quad (2.4)$$

Donde: $wn = e^{\frac{-2\pi i}{N}}$

Como se ve en la figura 2.9 hay una señal originalmente formada por 16 muestras, para realizar el proceso de la transformada rápida de Fourier se realiza un acondicionamiento de la señal, por lo tanto, se la descompone en 2 vectores de 8 muestras cada uno, el primer vector está formado por las muestras pares mientras que el otro por las impares del vector inicial. Se repite el mismo proceso para estos dos vectores, se vuelve a dividir en 2 vectores formado por muestras pares e impares, formando de esta manera 4 vectores, el proceso se repite hasta tener 16 vectores con una sola muestra (Smith, 1999).

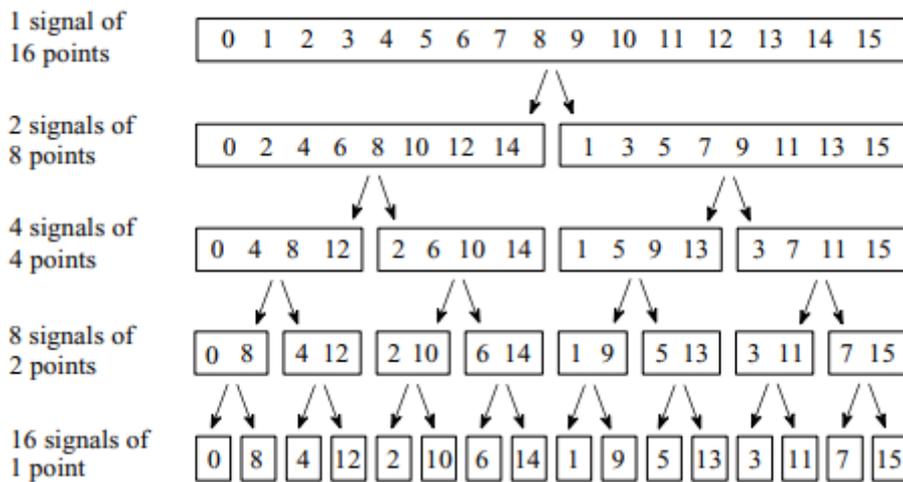


Figura 2. 8 Acondicionamiento de la señal para aplicar FFT

Fuente: (Smith, 1999)

Si se generaliza este proceso, para cualquier señal se tiene la ecuación 2.5

$$Nm = 2^m \quad (2.5)$$

Donde:

Nm = número de muestras de una sola señal

m = número entero que aplicado la ecuación 2.5 da el valor de Nm

De esta manera, m indica el número de descomposiciones que se puede realizar a la señal. Por ejemplo, para una señal con 512 muestras se realiza 9 descomposiciones, ya que $m=9$, así se obtiene 512 señales con una sola muestra mediante el proceso indicado (Smith, 1999).

El siguiente proceso es pasar estas señales a dominio frecuencia, la transformada de Fourier de una constante es el mismo valor ya sea en tiempo o en frecuencia debido a la propiedad de la dualidad. Obteniendo de esta manera el mismo número de señales, pero ahora en dominio frecuencia (Smith, 1999)

Para el proceso indicado en la figura 2.9, se realiza el proceso inverso, es decir, las 16 señales se convierten en 8 señales con 2 muestras cada una, y así sucesivamente hasta obtener una sola señal con 16 puntos en el dominio frecuencia. La figura 2.10 muestra el efecto de la dualidad entre el dominio tiempo y el dominio frecuencia y la reconstrucción de la señal en el dominio frecuencia (Smith, 1999)

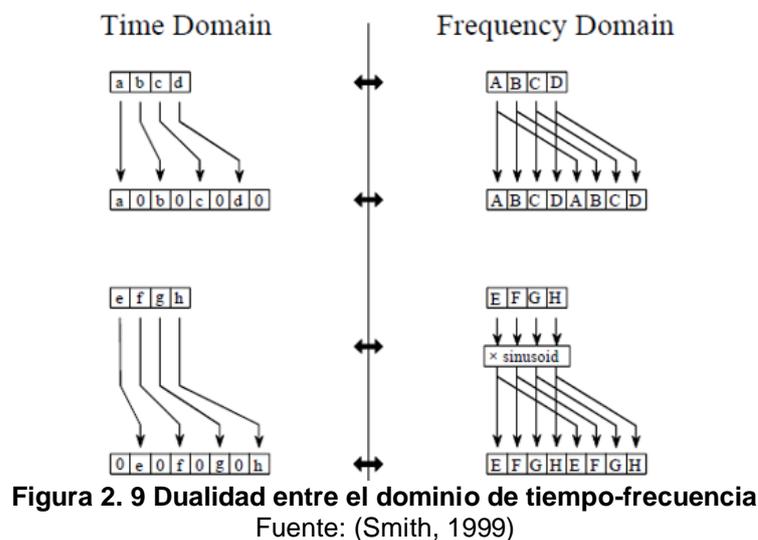


Figura 2. 9 Dualidad entre el dominio de tiempo-frecuencia
Fuente: (Smith, 1999)

El proceso de pasar dos señales con 4 puntos cada una, a una sola señal con 8 puntos en el dominio frecuencia se conoce como efecto mariposa y finaliza el proceso de la transformada rápida de Fourier (FFT Fast Fourier Transform), esto se muestra en la figura 2.11.

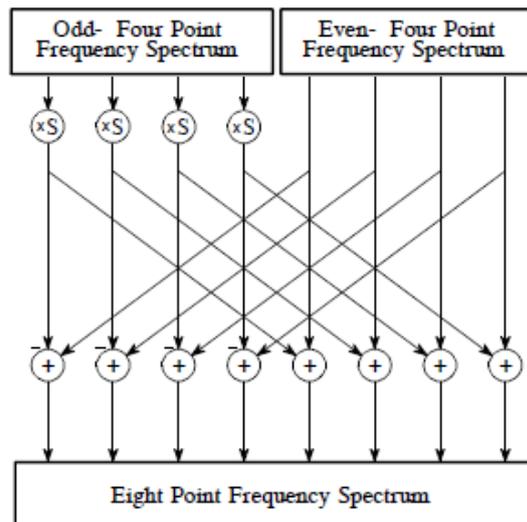


Figura 2. 10 Efecto mariposa en FFT
Fuente: (Smith, 1999)

2.3.4 OFDM

La multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing), consiste en enviar por el mismo ancho de banda un conjunto de ondas subportadoras con su respectiva frecuencia y cada una lleva cierta información y están equidistantes la una de la otra, como se muestra en la figura 2.12.

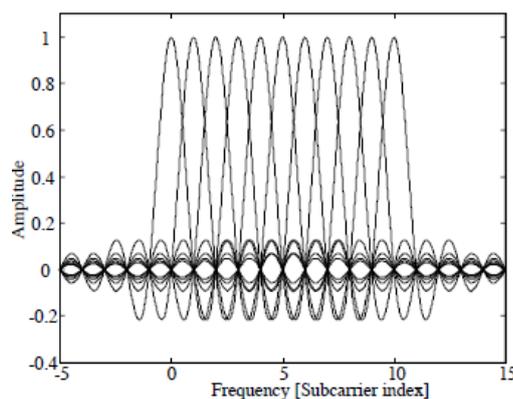


Figura 2. 11 Sub-portadoras de OFDM
Fuente: (Van de Beek, J., 1998)

La trama de bits está en dominio tiempo en una secuencia serial, estos valores son convertidos a paralelo y mapeados mediante la modulación M-QAM, donde se obtiene símbolos que son procesados mediante la

trasformada rápida de Fourier inversa (IFFT, Inverse Fast Fourier Transform), a los valores de la salida de ésta se agrega el prefijo cíclico, luego estos datos son pasados a forma serial y mediante la conversión digital analógica son acondicionados para ser transmitidos por las antenas. El proceso indicado se muestra en la figura 2.13.

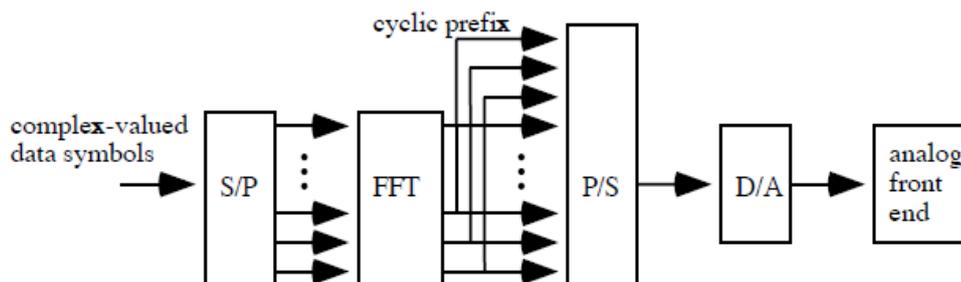


Figura 2. 12 Transmisor OFDM
Fuente: (Van de Beek, J., 1998)

2.3.5 Modulación Óptica

La modulación óptica consiste en modular la portadora óptica con señales de información, variando: intensidad, frecuencia, fase o polarización, el elemento emisor de esta información es una fuente de luz, ya sea para comunicaciones alámbricas o inalámbricas.

Este tipo de modulación va de la mano con M-QAM, IFFT y OFDM, ya que por las características propias de estas técnicas permiten una comunicación robusta y rápida, los sistemas OFDM que varían intensidad envían señales positivas y reales, a diferencia de los sistemas tradicionales que envían señales negativas e imaginarias (De los Ángeles, J., 2014).

2.3.6 Modulación espacial óptica OFDM (OSM-OFDM)

Esta modulación OSM-OFDM (Optical Spatial Modulation-OFDM) combina dos tipos de modulación, la espacial y la óptica, reúne las características de cada una de ellas para tener un sistema con múltiples salidas, obteniendo mayores velocidades de transmisión.

Los bits de ingreso son datos binarios en serie, se dividen en grupos de $3n$, donde n es un número entero, para formar una matriz $[3n, M]$. El primer bit se encarga del mapeo espacial y a los dos bits siguientes se aplica modulación 4-QAM, como se muestra en la figura 2.14 (Zhang, Dimitrov, & Sinanovic, 2012).

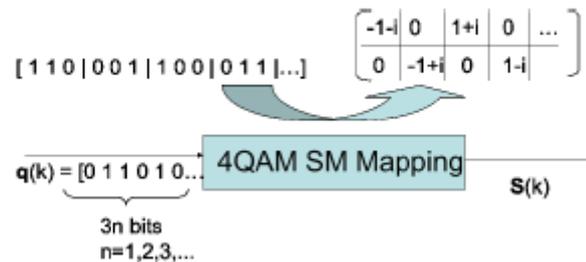


Figura 2. 13 Mapeo Espacial para OSM-OFDM
Fuente: (Zhang, Dimitrov, & Sinanovic, 2012)

La matriz de salida representada en la figura 2.14 con $S(k)$, está compuesta por símbolos resultantes de la modulación 4-QAM. Para formar dicha matriz, se toma los primeros 3 bits del vector de ingreso de la figura 2.14, que son $[1\ 1\ 0]$, el primer bit realiza el mapeo, en este caso tiene el valor 1, entonces en la primera fila, se coloca el símbolo resultante de aplicar modulación a los siguientes 2 bits $[1\ 0]$, formando $[-1\ -j]$, y en la segunda fila se coloca un 0, sucesivamente se repite el proceso con todos los valores de ingreso.

La figura 2.15 muestra un sistema OSM-OFDM, en la parte del trasmisor, se da el proceso de mapeo y modulación indicados anteriormente, obteniendo dos vectores denominados $X1(n)$ y $X2(n)$, estos pasan por una modulación de intensidad óptica OFDM, para después realizar una conversión digital analógica y finalmente enviar esta información a través de los emisores de luz.

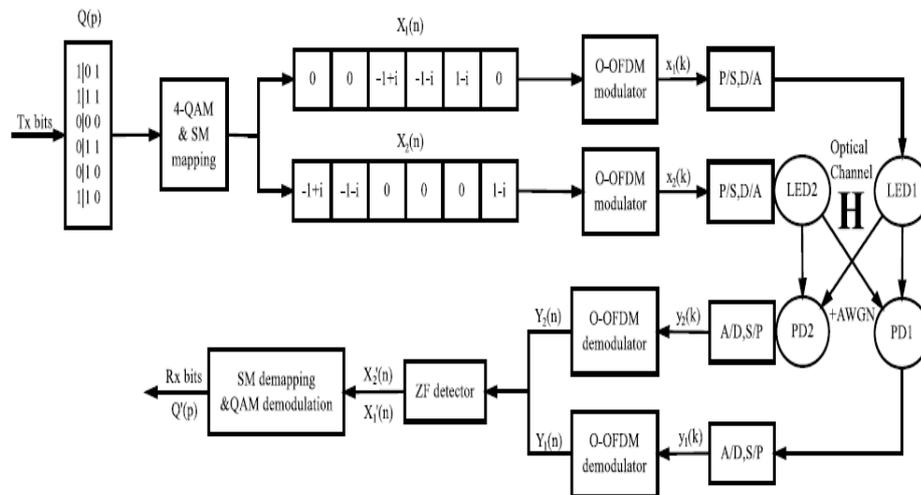


Figura 2. 14 Sistema OSM-OFDM
Fuente: (Zhang, Dimitrov, & Sinanovic, 2012)

En la parte del receptor mostrado en la parte inferior de la figura 2.15, se tiene dos elementos que se encargan de convertir las ondas de luz captadas y enviadas por los elementos transmisores en señales eléctricas, luego se realiza la demodulación óptica, convirtiendo estas señales en símbolos, realizando el demapeo y la demodulación M-QAM recupera la información enviada.

Para este sistema se utiliza dos elementos transmisores, y dos elementos receptores, por lo tanto, es un sistema **MIMO [2X2]**.

2.3.7 Modulación Espacial Óptica -OFDM sin componente DC (NDCO-OFDM)

El transmisor del sistema NDCO-OFDM tiene como entrada una serie de bits, los cuales son mapeados, convertidos a paralelo y modulados con M-QAM. El primer paso es aplicar simetría hermética obteniendo valores solo reales a la salida de la IFFT, dando como resultado 2 vectores, uno con valores absolutos positivos y otro con valores absolutos negativos, los cuales se convierten a valores analógicos mediante un DAC (Digital to Analogue Converter) para ser enviados por diodos emisores de luz. Este proceso se muestra en la figura 2.16 (Khan & Hossain, 2017).

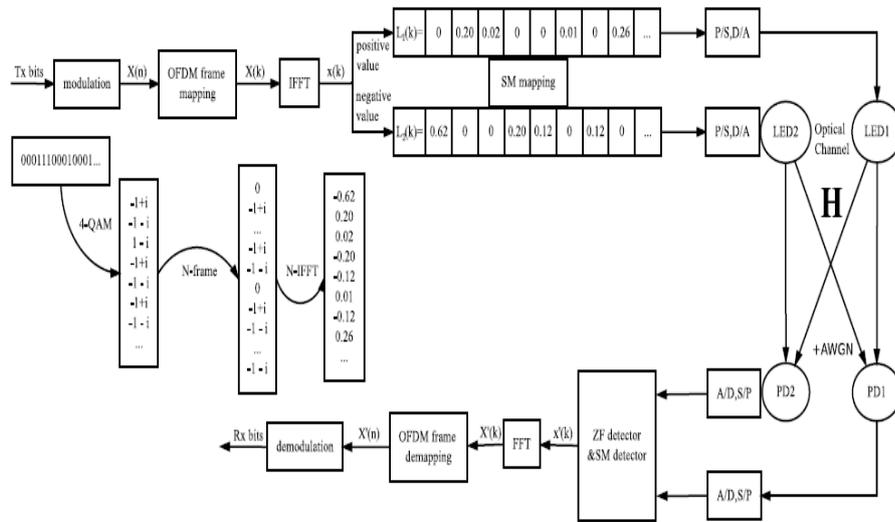


Figura 2. 15 Sistema NDCO-OFDM
Fuente: (Li, Tsonev, & Haas, 2013)

A la salida de la IFFT en la figura 2.16, se aplica el mapeo espacial, es decir el vector $\mathbf{x}(\mathbf{k})$, se separa en 2 vectores, $\mathbf{L1}(\mathbf{k})$ con valores positivos y $\mathbf{L2}(\mathbf{k})$ con valores negativos, por lo tanto si $\mathbf{x}(\mathbf{k})$ tiene un valor negativo entonces el vector $\mathbf{L1}(\mathbf{k})$ se llena con cero y $\mathbf{L2}(\mathbf{k})$ con el valor absoluto, lo contrario sucede con un valor negativo de $\mathbf{x}(\mathbf{k})$, $\mathbf{L1}(\mathbf{k})$ toma el valor absoluto mientras $\mathbf{L2}(\mathbf{k})$ se llena con cero. Y así sucesivamente con todos los valores obtenidos de la IFFT. De esta manera se cumple la condición de los sistemas ópticos modulados por intensidad de trabajar con valores positivos y reales (Khan & Hossain, 2017).

2.3.8 Modulación Coherente Óptica (CO-OFDM)

El sistema CO-OFDM usa técnicas OFDM para mitigar el desvanecimiento selectivo de frecuencia y la interferencia intercanal más conocida como ICI (Inter Channel Interference). La parte del transmisor está formada por una secuencia de bits aleatoria, que pasa por un modulador M-QAM encargada de mapear y convertir a símbolos, estos valores son pasados por un módulo OFDM para aprovechar las características de estos sistemas, obteniendo a su salida valores reales e imaginarios, para convertir las señales eléctricas a ópticas mediante una Modulación Match-Zehnder

(MMZ), como se muestra en la figura 2.17 (Srikanth, Sriram, & Sriram, 2015).

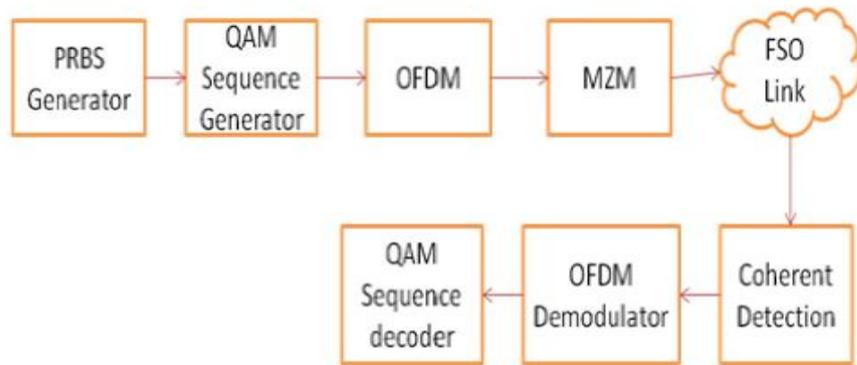


Figura 2. 16 Sistema COOFDM
Fuente: (Srikanth, Sriram, & Sriram, 2015)

Un emisor CO-OFDM realizado en el software OptiSystem, está compuesto por un generador binario pseudo randomico con una velocidad de 2.5Gbps, estos datos son mapeados por una modulación 4-QAM para realizar el proceso OFDM con 512 sub portadoras, donde la IFFT contiene 1024 muestras y el prefijo cíclico con 64 muestras para asegurar la recuperación correcta de la señal mediante dos moduladores Mach-Zehnder, se transforman las señales eléctricas a ópticas para ser enviadas por láser de onda continua o CWL (Continuous Wave Laser), con una frecuencia de 1923.1 THz y ancho de línea de 0.1 MHz, lo indicado se muestra en la figura 2.18 (Srikanth, Sriram, & Sriram, 2015).

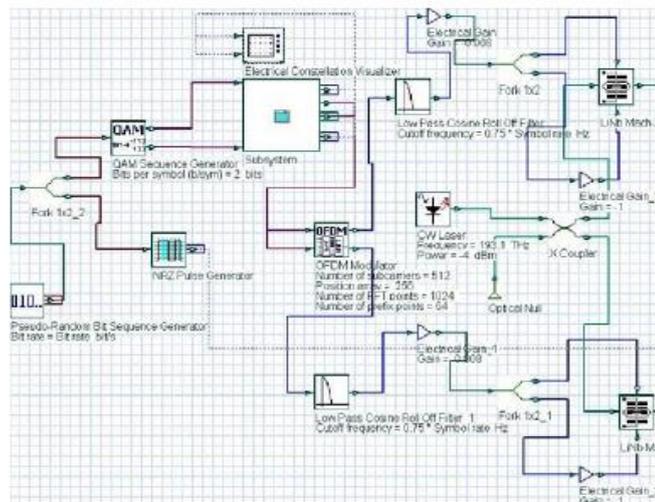


Figura 2. 17 CO-OFDM Transmisor
Fuente: (Srikanth, Sriram, & Sriram, 2015)

En la parte del receptor se realiza una detección coherente, formada por un láser que cumple con las funciones de un oscilador local con un ancho de línea de 0.1 MHz y una potencia de -2dBm, Las datos enviados por los CWL en la parte del emisor y que pasan por un canal inalámbrico son recuperados por dos pares de foto detectores, esto se muestra en la figura 2.19 (Srikanth, Sriram, & Sriram, 2015).

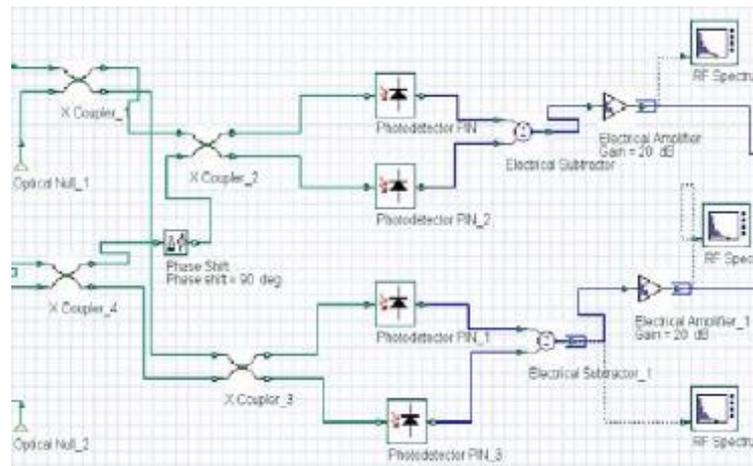


Figura 2. 18 Detector Coherente CO-OFDM
Fuente: (Srikanth, Sriram, & Sriram, 2015)

Una vez que pasa por el detector coherente se realiza una demodulación OFDM, estos datos son decodificados mediante 4-QAM y así obtener la información enviada. El receptor de CO-OFDM es mostrado en la figura 2.20 (Srikanth, Sriram, & Sriram, 2015).

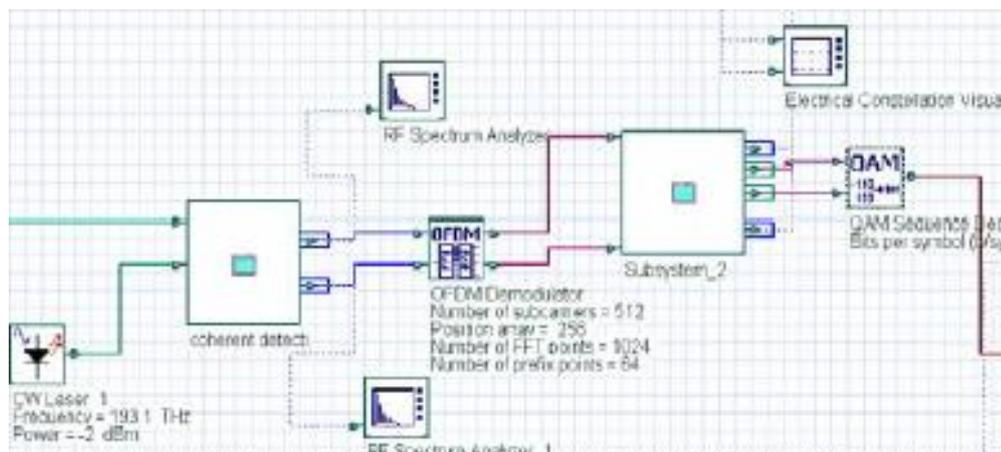


Figura 2. 19 Receptor CO-OFDM
Fuente: (Srikanth, Sriram, & Sriram, 2015)

2.4 Tipos de Modulación Óptica

A continuación, se indica los principales tipos de modulación óptica como son la modulación directa y la modulación externa.

2.4.1 Modulación Directa

Conocida como modulación directa de laser (DML, Directly Modulated Laser), consiste en generar una corriente eléctrica que alimente al laser, prendiéndolo o apagándolo, es decir para transmitir un “1” se alimenta con una corriente mayor a la umbral, mientras que para transmitir un “0” la corriente de alimentación es menor a la de umbral (Macho, 2012).

La limitación de usar este tipo de modulación es que depende de la frecuencia con la que se prenda o apague el láser y no de la frecuencia propia de la luz láser de transmisión, la velocidades de transmisión con este tipo de modulación ha ido desde los 2Gbps en sus inicios hasta las 40Gbps en los últimos años (Macho, 2012).

Otros de los inconvenientes de este tipo de modulación es que expande el espectro óptico conocido como Chirp, además provoca mayor interferencia, dando como resultado una mayor tasa de error por bit, lo que conlleva a realizar procesos más complejos y costosos para recuperar la información en la parte del receptor (Macho, 2012)

2.4.2 Modulación Externa

Este tipo de modulación se caracteriza por la variación de las propiedades de un material al aplicar una señal de distinta naturaleza. Entre las principales se puede enumerar a la modulación: Electroóptica (MEO), Electro-absorción (MEA) y Acústico-óptica (MAO).

2.4.2.1 Modulación Electroóptica

Está formado por un cristal electroóptico donde se modula la amplitud, fase o intensidad de la señal óptica aplicada sin tener que prender o apagar el haz de luz, como sucede en la modulación directa. El Niobato de Litio (LiNbO_3) es el cristal característico que usa este tipo de modulación.

2.4.2.1.1 Modulación Electroóptica de Fase

La resultante de este tipo de modulación es una señal que cambia de fase cuando se aplica una tensión eléctrica al modulador externo, formado por un cristal de LiNbO_3 , al aplicar un campo eléctrico a lo largo de la guía de onda, se obtiene un cambio en el índice de refracción, como se muestra en la figura 2.21.

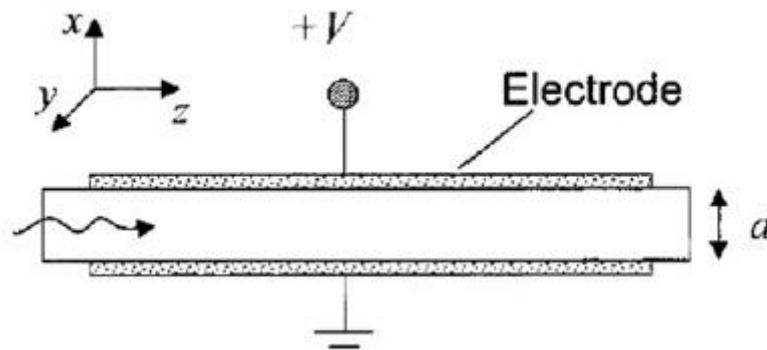


Figura 2. 20 Modulador Óptico de fase
Fuente: (Macho, 2012)

El voltaje necesario para realizar la variación en la fase se conoce como $V\pi$ y está dado por la ecuación 2.6

$$V\pi = \frac{d\lambda_0}{nr^3r_{33}Li} \quad (2.6)$$

Donde:

d = distancia de separación entre placas conductoras

L = longitud que recorre la señal óptica

λ_0 =Longitud de onda de la señal de entrada en el vacío

n = índice de refracción

r_{33} =coeficiente electroóptico $3.28 * 10^{-6} \text{ uV/m}$

Uno de los inconvenientes es reducir el $V\pi$ para conseguir un menor consumo de potencia mediante el aumento de la relación d/L , provocando que la modulación se ralentice y que el ancho de banda se reduzca, por tal

razón hay que tener en cuenta el ancho de banda como el consumo de potencia para estos moduladores (Macho, 2012).

2.4.2.1.2 Modulación Electroóptica de Amplitud

La modulación de amplitud externa mejora la calidad en la señal enviada y su velocidad de transmisión, alcanzando distancias mayores que la modulación directa ya que tiene menor incidencia de una señal pulsada o chrip, son utilizados en redes ópticas de gran capacidad. Este tipo de elemento se conoce como Modulador Mach Zehnder (MZM) (Macho, 2012).

Este tipo de Modulador está compuesto por una guía de onda óptica tipo “Y” conocida como interferómetro que separa la señal óptica o portadora en dos direcciones pudiendo controlar el desfase de la onda en el ramal inferior mediante los contactos de microonda alimentados por la señal moduladora o $V(t)$, obteniendo a la salida una señal modulada que puede variar en amplitud y fase. El Modulador Mach Zehnder se muestra en la figura 2.22 (Macho, 2012).

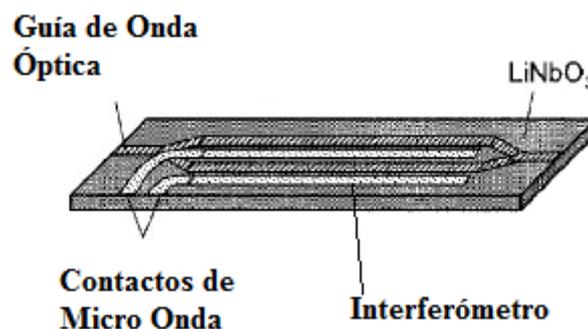


Figura 2. 21 Modulador Mach Zehnder

Fuente: (Macho, 2012)

La señal de salida de un modulador Mach Zehnder está dada por la ecuación 2.7.

$$E_o = \frac{E_i}{2} \left[\exp\left(\frac{j(1 + \alpha)\pi V(t)}{2 V\pi}\right) + j \exp\left(-\frac{j(1 + \alpha)\pi V(t)}{2 V\pi}\right) \right] \quad (2.7)$$

Donde:

α = Coeficiente de Chirp del Modulador

$V(t)$ = es el voltaje de alimentación del contacto de microonda

Hay diferentes tipos de acoples entre la señal eléctrica moduladora y la guía de onda óptica dependiendo de la simetría en el cristal LiNbO_3 , las principales estructuras son x-cut, z-cut con sus derivaciones single y dual drive como se muestra en la figura 2.23.

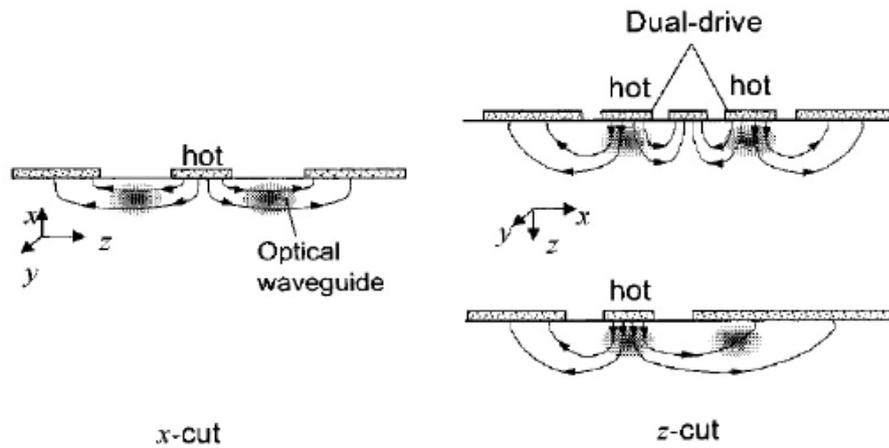


Figura 2. 22 Estructuras del Modulador MZ

Fuente: (Macho, 2012)

La estructura x-cut single drive presenta un factor de chirp nulo evitando el ensanchamiento innecesario en el espectro óptico, la estructura z-cut single drive presenta un chirp con un valor fijo de ± 0.75 , mientras que la estructura z-cut dual drive tiene un valor de chirp ajustable generado por dos voltajes que alimentan cada brazo de la guía de onda del Modulador MZ. La relación de la señal de salida con la de entrada está dada por la ecuación 2.8

$$E_o = \frac{E_i}{2} \left[\exp\left(-j\pi \frac{V_1}{V\pi}\right) + \exp\left(j\pi \frac{V_2}{V\pi}\right) \right] \quad (2.8)$$

La ventaja de la estructura z-cut dual drive es que se puede realizar modulación de amplitud variando el coeficiente de chirp indicado en la ecuación 2.9.

$$\alpha = \frac{V_1(t) + V_2(t)}{V_1(t) - V_2(t)} \quad (2.9)$$

Donde:

$V_1(t)$, $V_2(t)$ = son las tensiones de alimentación de los contactos de microonda del Modulador MZ

Cuando $V_1 = -V_2$ se puede realizar una modulación de amplitud con factor de Chirp cero. Mientras que en la modulación de fase para generar señales M-PSK o M-QAM se modifica el voltaje de fase mediante la ecuación 2.6.

2.5 Canal FSO

El canal de comunicación de un sistema FSO es un medio no guiado que presenta atenuación de una señal al propagarse por este, provocado por turbulencias y fenómenos como lluvia, neblina, aire, etc.

En un medio guiado como la fibra, hay ventanas donde la potencia se pierde menos en presencia de los fenómenos enumerados anteriormente, cosa similar sucede en un canal no guiado que utiliza las mismas longitudes de onda (880, 1310 y 1550 nanómetros) para enviar y recibir información aprovechando así los elementos ópticos usados en las comunicaciones alámbricas, esto se muestra en la figura 2.24.

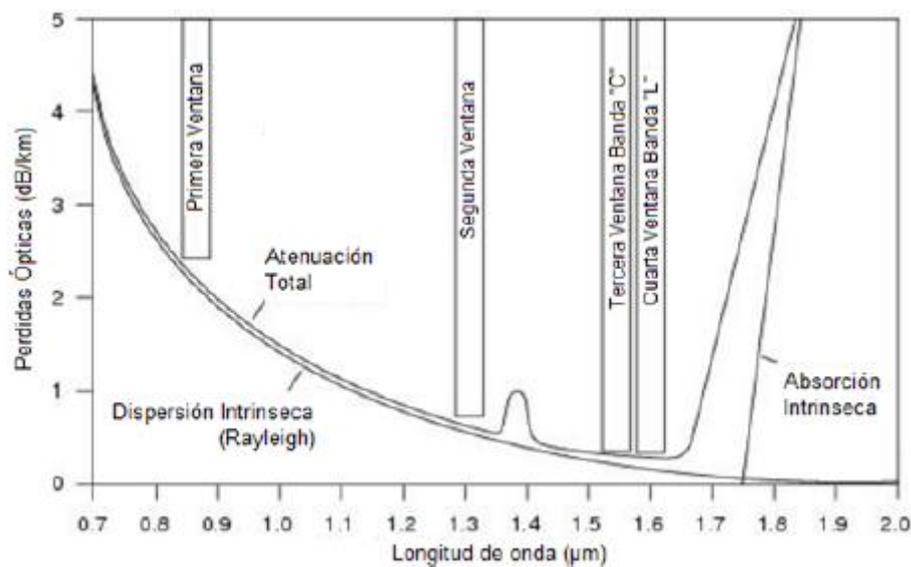


Figura 2. 23 Pérdidas en Fibra óptica en función de la longitud de onda
Fuente: (Arvizu, y otros, 2014)

2.5.1 Perdidas en un Canal no guiado

A medida que la luz emitida por el láser del transmisor se propaga por el aire este presenta perdidas y se representa por la ecuación 2.10.

$$P. pro = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) dB \quad (2.10)$$

Donde:

d = distancia entre el emisor y receptor

λ = longitud de onda del láser emisor

2.5.2 Perdidas por turbulencia

Estas son provocadas por efectos atmosféricos como el centello que produce cambios en la intensidad del haz de luz del emisor, se describe mediante la ecuación 2.11.

$$P. tur = 10 \log \left(1 + \left(\frac{\Omega_o}{\Omega_{tur}} \right) \right) dB \quad (2.11)$$

Donde:

$$\Omega_o = \left(\frac{2\lambda}{\pi DITX} \right) \quad (2.12)$$

$DITX$ = diámetro de lente del trasmisor

$$\Omega_{tur} = \left(\frac{\lambda}{\pi \rho_o} \right) \quad (2.13)$$

ρ_o = radio de coherencia

2.5.3 Perdidas por Apuntamiento

Se produce por un mal alineamiento entre los elementos emisores y receptores de luz, por esta razón la potencia recibida es menor a la enviada, se representa mediante la ecuación 2.14.

$$P. apunt = 44.3229 \left(\frac{\phi_c}{\Omega_o} \right)^2 dB \quad (2.14)$$

Donde:

$$\phi_c = \frac{\lambda}{2DITX} \text{ rad} \quad (2.15)$$

ϕ_c = ángulo máximo del haz de luz del emisor

2.5.4 Pérdidas Atmosféricas

Se da cuando el haz de luz se propaga por el aire y se atenúa debido a la absorción y esparcimiento. Está dado por la Ley de Beer indicada en la ecuación 2.16.

$$P_{atm} = 10 \log(\tau) \text{ dB/km} \quad (2.16)$$

Donde:

τ = es la transmitancia de la atmósfera que depende de la distancia del enlace y longitud de onda del emisor.

Para el caso del aire limpio donde no hay impurezas las pérdidas atmosféricas tienen un valor de 0.4 dB/Km (Pino & Fernando, 2017).

Un factor climático a tener en cuenta es la neblina, la Ley de Koschmieder representar las pérdidas que provoca este efecto, se indica en la ecuación 2.17) (Sánchez, 2017).

$$P_{neblina} = e^{\left[\left(\frac{3.91}{v}\right)\left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q} d\right]} \text{ dB/Km} \quad (2.17)$$

$$q = \left\{ \begin{array}{l} 1.6 \text{ si } V \geq 50 \text{ Km} \\ 1.3 \text{ si } 6 \leq V \leq 50 \text{ Km} \\ 0.16 + 0.34V \text{ si } 1 \leq V \leq 6 \text{ Km} \\ V - 0.5 \text{ si } 0.5 \leq V \leq 1 \text{ Km} \\ 0 \text{ si } V < 0.5 \text{ Km} \end{array} \right.$$

Donde:

V = Visibilidad de la niebla en Km

q = factor de difusión

d = distancia entre el emisor y receptor

λ = longitud de onda del láser emisor

En el caso de la lluvia, La ITU presenta una forma para determinar las pérdidas que esta produce, se indica en la ecuación 2.18

$$P_{lluvia} = \left\{ \begin{array}{l} 0.509 R^{0.63} \text{ si } R < 3.8 \frac{mm}{h} \\ 0.319 R^{0.63} \text{ si } 3.8 \leq R \leq 7.6 \frac{mm}{h} \\ 0.365 R^{0.63} \text{ si } R > 7.6 \frac{mm}{h} \end{array} \right\} \text{dB} \quad (2.18)$$

Donde:

R = precipitación (mm/h).

2.6 Elementos Ópticos del Sistema FSO

Los principales elementos ópticos que conforman un sistema FSO son: el emisor de luz, el receptor de luz y las antenas ópticas

2.6.1 Láser

Este elemento es encargado de enviar la información a través del aire en sistemas FSO. El láser tiene una potencia mayor a la de un diodo emisor de luz LED, razón por la cual la luz emitida alcanza mayores distancias (Arvizu, y otros, 2014).

Debido al comportamiento que tiene la luz láser al propagarse en el aire, dos ventanas son usadas para comunicaciones FSO, la primera que va desde 3 μm a 5 μm y la segunda está entre 8 μm a 14 μm , ya que en estas ventanas las pérdidas indicadas anteriormente son menores (Caizaluisa, 2008).

El emisor está restringido a trabajar con una longitud de onda no mayor a 1550 μm . Los rayos láser no son puntuales por esta razón a medida que viaja en el espacio y llegan al receptor se ensanchan formando un cono, a este fenómeno se conoce como divergencia. En la figura 2.25, se puede apreciar que solo un porcentaje de la luz emitida es captada por el receptor y el resto de luz se desperdicia.

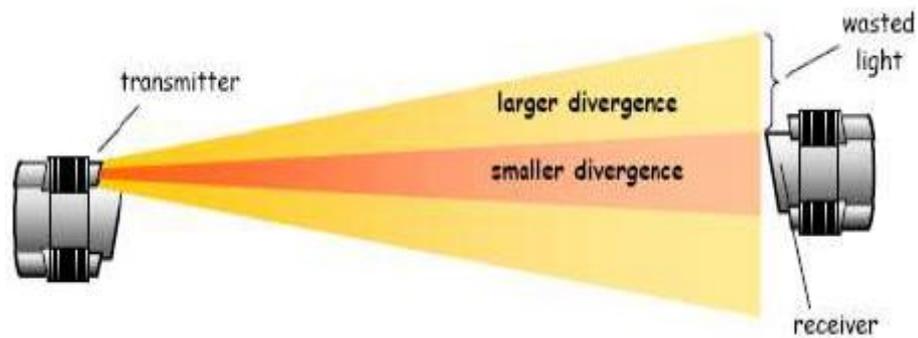


Figura 2. 24 Divergencia en función de la distancia recorrida entre Tx-Rx.
 Fuente: (Caizaluisa, 2008)

2.6.2 Fotodetectores

Son los elementos encargados de captar la luz emitida por el láser, se encuentra en el receptor, los más conocidos son los APD (Avalanche photodiodes), cuya función es la detección directa mientras que los PIN son utilizados para una detección coherente (Arvizu, y otros, 2014)

Los fotodetectores PIN más robustos están compuestos por 4 elementos que conforman un arreglo, a este se denomina QPIN cuya función es convertir la luz captada a niveles de voltaje, el voltaje total a la salida de este elemento es la suma que aporta cada uno de los elementos PIN del fotodetector, esto se indica en la figura 2.26.

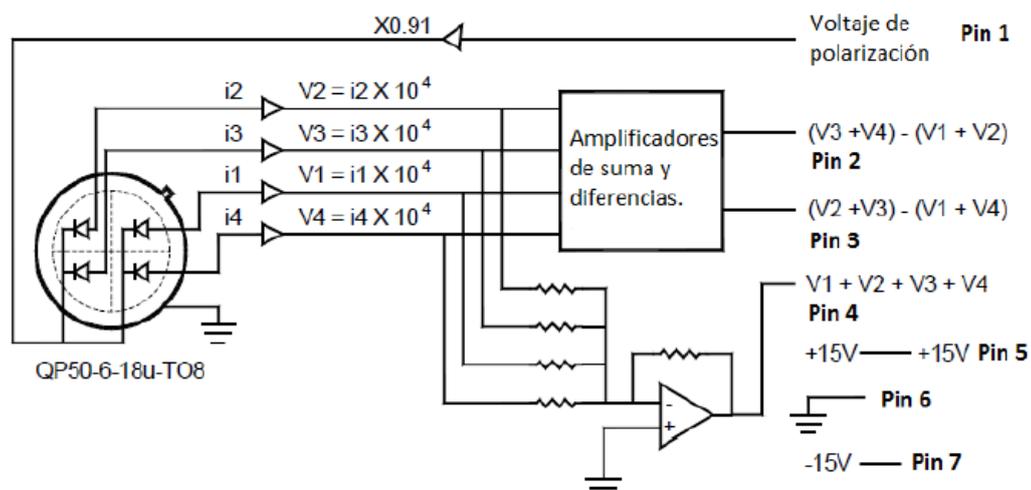


Figura 2. 25 Fotodetector QPIN
 Fuente: (Arvizu, y otros, 2014)

En cuanto a características los dos son similares, la diferencia del APD es que la ganancia de avalancha es elevada, de esta manera el emisor necesita trabajar con niveles de voltaje elevados mientras que los PIN no necesitan esta ganancia, ya que esta se obtiene por el oscilador local formado por un láser ubicado en el receptor por lo tanto el emisor se energiza con voltajes menores, esto se muestra en la figura 2.27 (Arvizu, y otros, 2014).

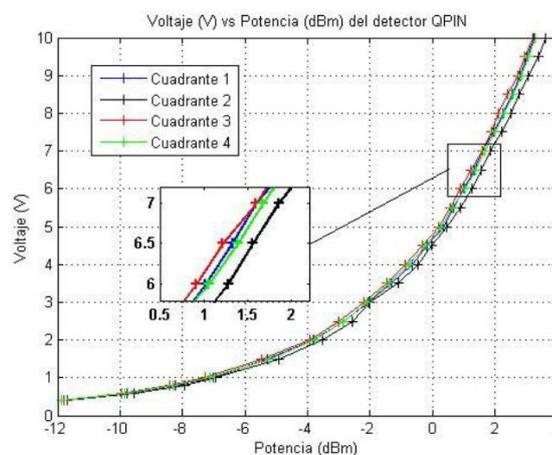


Figura 2. 26 Potencia vs voltaje en Fotodetector QPIN
Fuente: (Arvizu, y otros, 2014)

2.6.3 Antenas Ópticas

Estas son encargadas de direccionar la luz emitida por el emisor para disminuir el efecto de dispersión, permitiendo que el receptor reciba mayor cantidad de luz, tanto el emisor como el receptor utilizan este tipo de antenas. El haz de luz emitido por láser pasa por un lente de tipo convergente como se muestra en la figura 2.28 (a) o un lente de tipo divergente como en la figura 2.28 (b), que permite redirigir y focalizar el haz a ser transmitido (Arvizu, y otros, 2014).

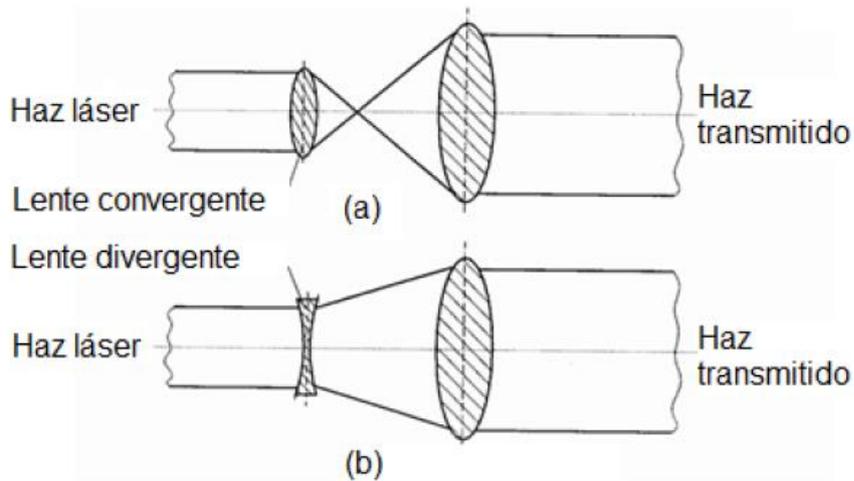


Figura 2. 27 Tipo de antenas Emisoras
 Fuente:(Arvizu Mondragón et al., 2014)

En el receptor se ubica este tipo de antenas antes del elemento detector de luz, cuya función es recibir el haz emitido y direccionar la mayor cantidad de luz al fotoreceptor, como se muestra en la figura 2.29.

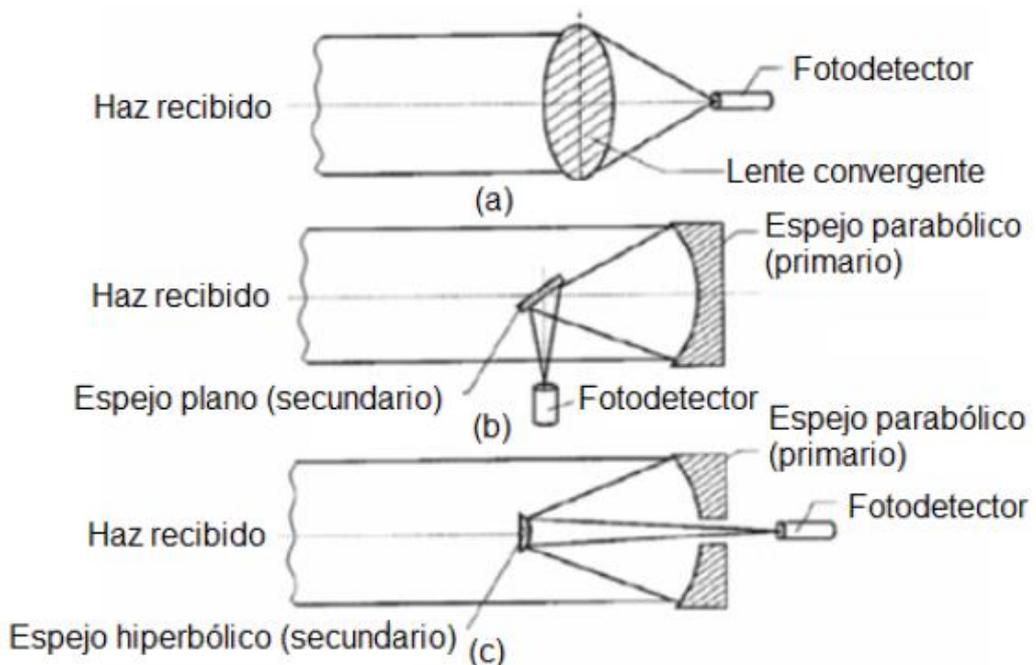


Figura 2. 28 Tipo de antenas Receptoras
 Fuente: (Arvizu, y otros, 2014)

CAPÍTULO III

Diseño del sistema MIMO FSO Propuesto

Para el diseño del sistema se presenta dos alternativas en cuanto a la modulación óptica a usar, el primero con modulación directa de intensidad y otro con modulación externa (Khwandah, y otros, 2015).

3.1 Sistema MIMO FSO con modulación Óptica de Intensidad y Detección Directa

A continuación, se indica cómo está conformado el transmisor y receptor para el sistema usando una modulación de intensidad directa.

3.1.1 Transmisor

El modelo del sistema propuesto comienza con stream de bits de entrada, N-bits en serie, estos se pasan a paralelo, los cuales son acumulados en una matriz Q, en la que n es el número de columnas y l es número de filas de dicha matriz, el número n (bits/símbolo) está dado por la ecuación 3.1.

$$n = \log_2(M_{QAM}) \quad (3.1)$$

Donde:

n = número de bits por columna

M-QAM= tipo de modulación = 4-QAM

Como indica la ecuación 3.1, depende del tipo de modulación a utilizar, para este caso 4-QAM, el proceso anteriormente indicado se muestra en la figura 3.1

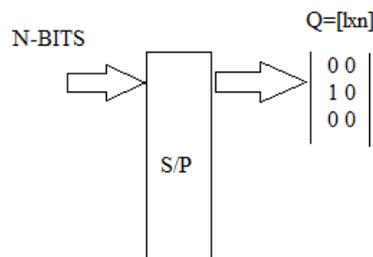


Figura 3. 1 Conversión serie a paralelo
Elaborado por: Autor

Una vez formada la matriz $Q[l \times n]$, el siguiente paso es la conversión de cada uno de los bits acumulados en las diferentes columnas a símbolos, mediante una modulación 4-QAM, con 4 posibles representaciones en el plano real e imaginario. Es decir, si en la matriz Q hay una fila formada por $[0 \ 0]$ el símbolo para este valor es $[1+j]$, ahora si la siguiente fila es $[0 \ 1]$ es $[1-j]$, para $[1 \ 0]$ es $[-1+j]$ y finalmente si es $[1 \ 1]$ es $[-1-j]$, El proceso se repite para cada una de las filas hasta llegar a l , como se muestra en la figura 3.2

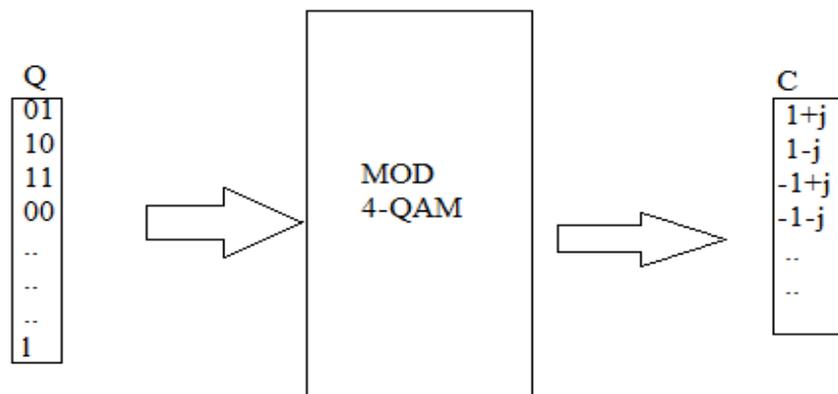


Figura 3. 2 Modulación 4-QAM
Elaborado por: Autor

El siguiente paso es mapear cada uno de los símbolos de la modulación mencionada, estos valores se acumulan en la matriz R , donde cada una de las filas alberga un símbolo específico y el resto de las columnas se completa con ceros como se muestra en la figura 3.3.

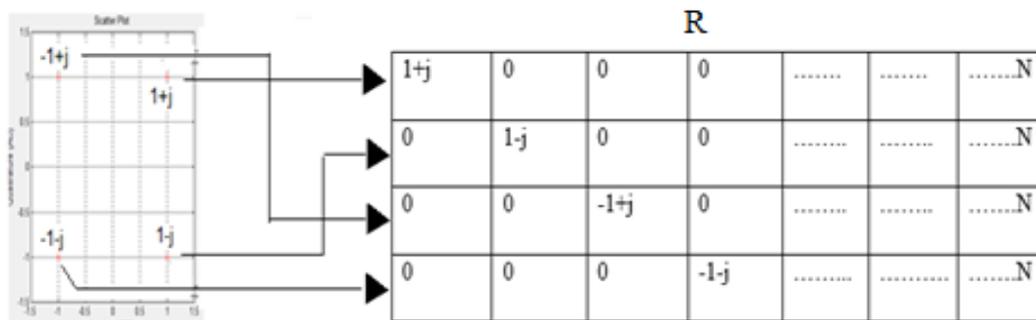


Figura 3. 3 Mapeo de Símbolos 4-QAM
Elaborado por: Autor

Al trabajar con una modulación de intensidad en el transmisor se usa una detección directa en el receptor, de esta manera se conforma el sistema conocido como IM/DD (Intensity Modulation / Direct Detection), mediante este tipo de modulación se aplica directamente una corriente que genera cambios en la intensidad, es decir la luz del emisor láser se enciende y apaga, pero no afecta parámetros de amplitud o fase, por lo tanto los valores generados a la salida del sistema OFDM para este tipo de modulación deben ser reales y positivos.

Para lograr esto, los símbolos que conforman las filas de la matriz R están en el dominio frecuencia, para pasar a dominio tiempo se realiza el proceso IFFT a cada una de las filas formadas por símbolos complejos, es decir valores reales e imaginarios, para convertir en una señal solo con valores reales se trabaja con las características de la FFT. Se forma una nueva matriz U, donde cada una de las filas son valores que contienen el conjugado de los símbolos obtenidos y acumulados en R, cabe recalcar que solo los valores imaginarios se cambian de signo, esto implica que si el símbolo tiene un valor imaginario negativo se debe cambiar a positivo o viceversa, de esta manera se forma una nueva matriz V como se muestra en la Figura 3.4.

Matrix R					Matrix U				
1+j	0	0	0	.....N	1-j	0	0	0	.....N
0	1-j	0	0	.....N	0	1+j	0	0	.....N
0	0	-1+j	0	.....N	0	0	-1-j	0	.....N
0	0	0	-1-j	.....N	0	0	0	-1+j	.....N

Figura 3. 4 Matriz V formado por R-U
Elaborado por: Autor

Con los vectores formados por la primera fila de la matriz R y U, se forma un vector S_m , en el cual se introduce 0 en las posiciones pares y en las impares el valor correspondiente a la fila de la matriz V, el proceso se repite

con cada una de las filas restantes formando la matriz W, lo indicado se representa con la ecuación 3.2.

$$S_m = [0 \ R_m(k) \ 0 \ R_m(k) \ \dots \ 0 \ U_m(k) \ 0 \ U_m(k)] \quad k = 1,3,5 \dots, N-1 \quad (3.2)$$

Donde:

m = número de fila de la matriz (transmisor)

R_m, U_m = valores de la matriz V

Con el procesamiento indicando anteriormente y aplicando IFFT a cada una de las filas de la matriz W, se obtiene la matriz Y con valores reales positivos y negativos, el diagrama de bloques de este proceso se muestra en la figura 3.5.

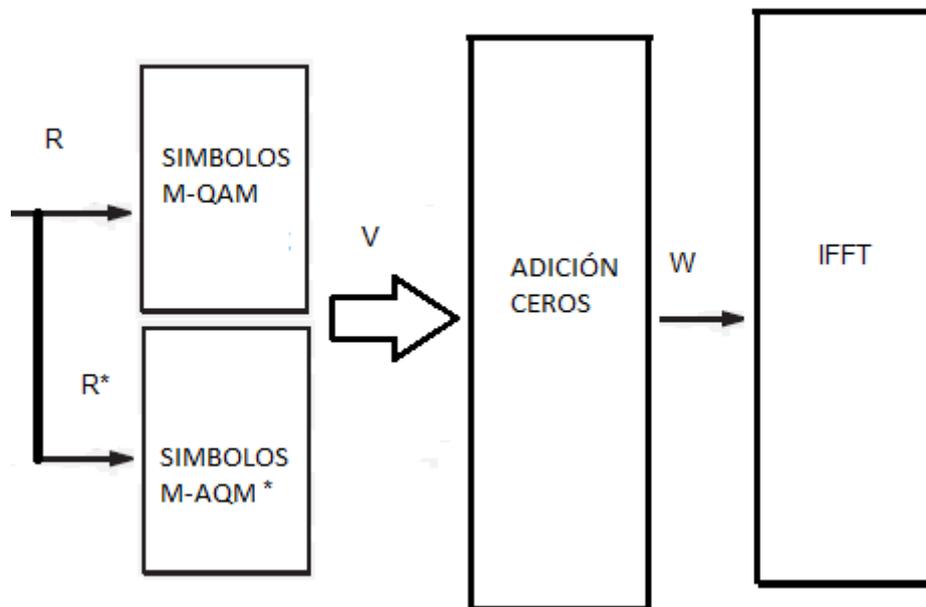


Figura 3. 5 Transformada rápida de Fourier Inversa

Elaborado por: Autor

La característica de este proceso es que los valores de la primera mitad de cada uno de los vectores que conforman las filas se repiten con signo contrario en la segunda parte, el resultado de esto se muestra en la figura 3.6.

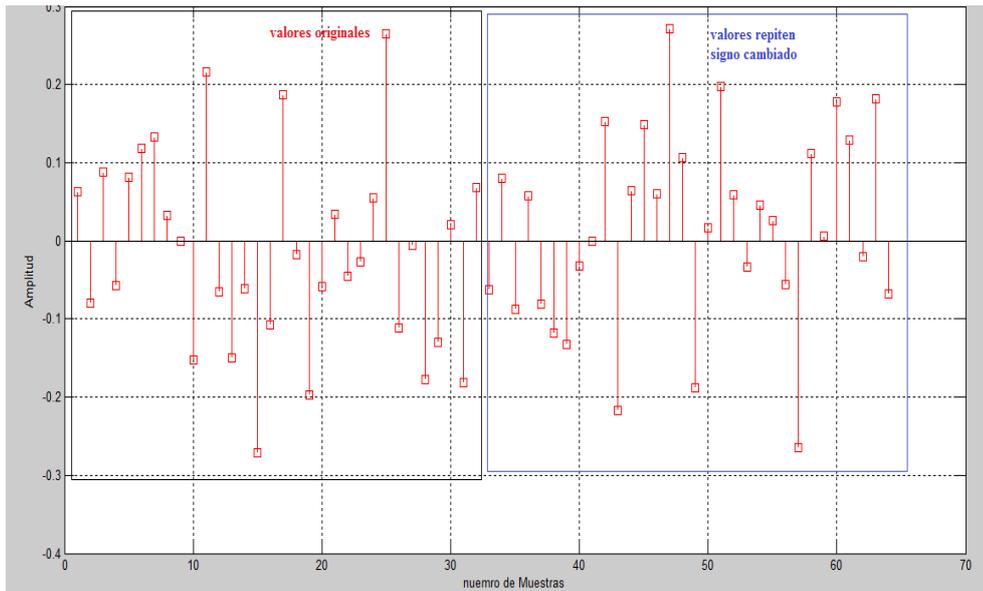


Figura 3. 6 Valores a la salida de IFFT del Transmisor 1
Elaborado por: Autor

Para cumplir la siguiente condición de la modulación óptica directa, que es obtener solo valores positivos, se elimina de cada una de las filas de la matriz Y los componentes negativos haciendo un recorte por cero, es decir que solo los componentes mayores a cero mantienen el valor, el proceso en bloques se muestra en la figura 3.7.

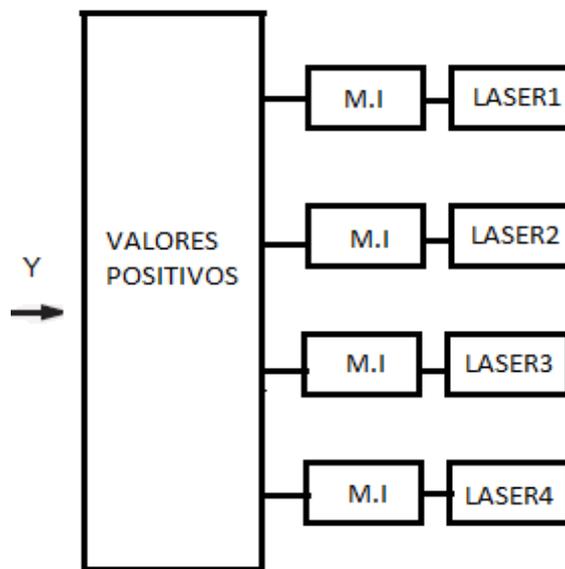


Figura 3. 7 Valores Positivos para enviar por Láser
Elaborado por: Autor

El proceso de convertir las señales digitales a señales analógicas, es decir valores de voltajes o corrientes que puedan ser modulados, se realiza mediante un DAC.

La modulación de intensidad óptica a usar es OOK (ON-OFF Keying), es decir prender y apagar la luz emitida por el láser, cuando hay una corriente superior a la de umbral, el láser se enciende “1” y se apaga “0” cuando la corriente es menor a la de umbral, la figura 3.8 muestra el diagrama de conexión para la conversión E-O (Masero, 2014).

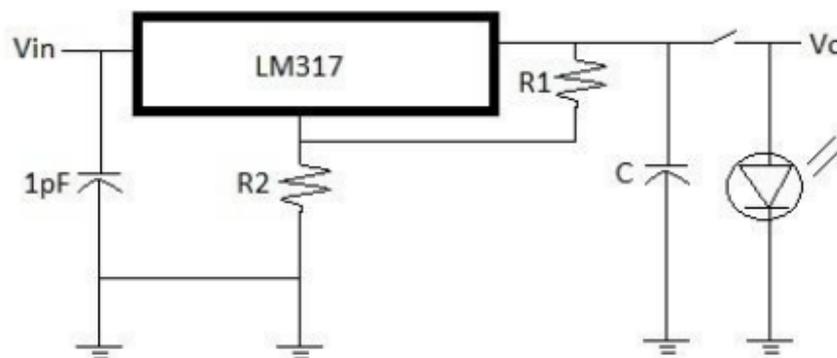


Figura 3. 8 Circuito Usado para conversión Eléctrica a óptica
Fuente: (Sánchez, 2017)

3.1.2 Receptor

El foto-receptor es el elemento que realiza la conversión óptica a eléctrica, en función de la intensidad de la luz que capta la convierte en pulsos eléctricos, es decir a mayor cantidad de luz recibida mayor será la tensión en la salida. Para que el sistema procese esta información se realiza una conversión Analógica-Digital (ADC, Analog-to-Digital Converter) transformando los valores de voltaje o corrientes a niveles lógicos. Un fotodetector APD se ilustra en la figura 3.9.

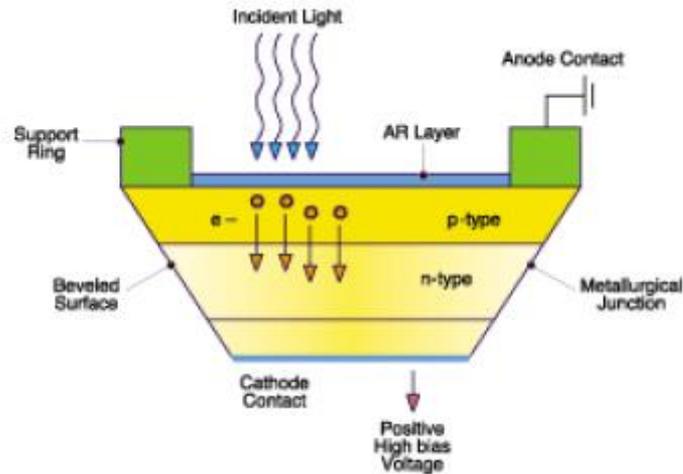


Figura 3. 9 Fotodetector tipo avalancha (APD)

Fuente: (López, 2015)

Hay que tener en cuenta que las señales se propagan por el aire, las condiciones propias de este, los elementos electrónicos para la conversión óptica-eléctrica, entre otras variables, hacen que la señal recibida presenten perturbaciones o ruido, elevando el margen de obtener información errónea, mediante Maximum Likelihood (ML) se realiza una estimación del canal, con el objetivo de tratar la señal y reducir la cantidad de errores en la información recibida, el diagrama de bloques de este proceso se muestra en la Figura 3.10.

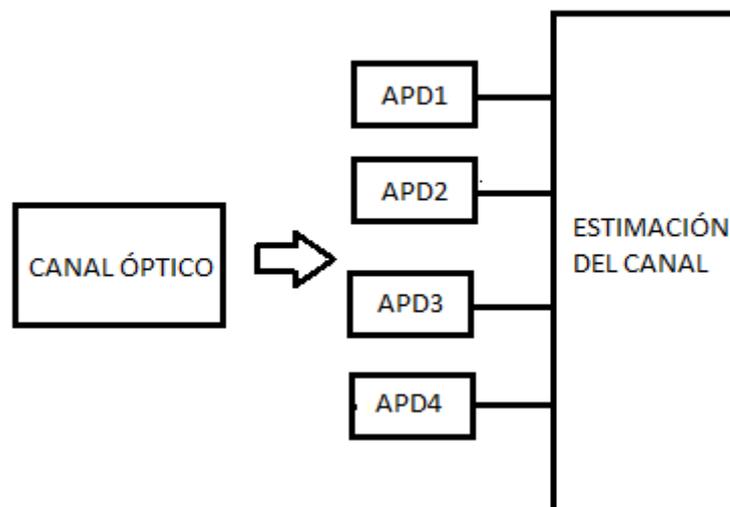


Figura 3. 10: Estimación de canal

Elaborado por: Autor

Luego se trabaja en pasos inversos a los del transmisor, es decir recuperar los valores positivos y negativos de cada una de las señales eléctricas, para ello se necesita formar 2 vectores, el primero $x1'(k)$ contiene desde (1 a $N/2$) muestras y el vector $x2'(k)$ almacena desde la muestra ($N/2+ 1$ a N). Esto se indica en las ecuaciones 3.3 y 3.4 respectivamente.

$$x1'(k) = [1 \dots \dots N/2] \quad (3.3)$$

$$x2'(k) = [(N/2 + 1) \dots \dots N] \quad (3.4)$$

Al realizar una diferencia punto a punto entre los dos vectores se obtiene un vector $x3'(k)$ con valores positivos y negativos, el cual se expresa mediante la ecuación 3.5.

$$x3'(k) = [x1'(k) - x2'(k)] \quad (3.5)$$

Luego, se duplica este vector, pero con signo negativo para obtener un vector $x4'(k)$, donde $x3'$ y $-x3'$ se concatenan, de esta manera se recupera la información enviada por cada uno de los transmisores, la figura 3.11 muestra el proceso indicado.

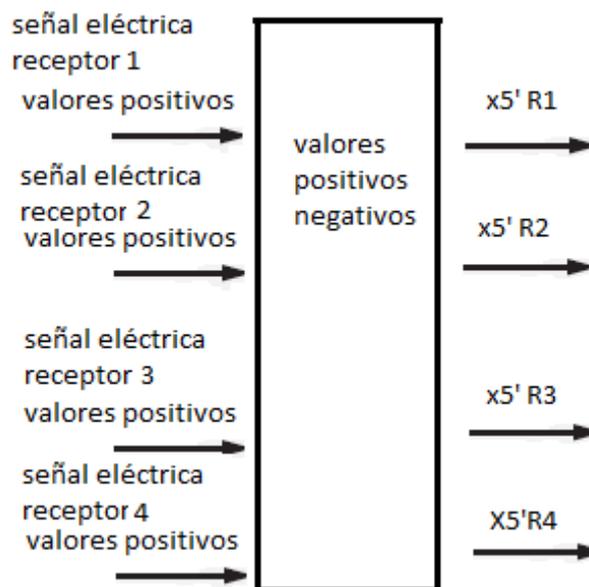


Figura 3. 11 Valores reales positivos y negativos receptados

Elaborado por: Autor

Cada uno de los vectores $x5'$ forman una matriz denominada Y' , estos valores que están en dominio tiempo se pasa a dominio frecuencia, al aplicar la transformada rápida de Fourier a cada uno de los vectores, se obtiene la matriz W' , esto se muestra en la figura 3.12.

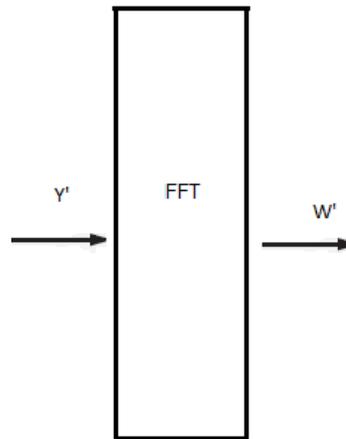


Figura 3. 12 Transformada rápida de Fourier FFT a cada uno de los Receptores
Elaborado por: Autor

Para eliminar los ceros y remover el conjugado de la matriz W' , se realiza el mapeo inverso a esta matriz, dando como resultado o un único vector C' , a todos los símbolos recuperados se aplica una demodulación 4-QAM, obteniendo valores binarios, para finalizar con una conversión paralelo-serie recuperando así la información enviada, este proceso se muestra en la figura 3.13.

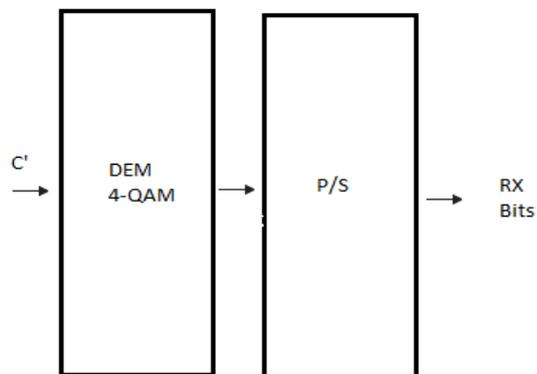


Figura 3. 13 Proceso de Demodulación y Reconstrucción de Información Receptada
Elaborado por: Autor

3.2 Sistema MIMO FSO con modulación óptica externa y detección coherente

A continuación, se indica cómo está conformado el transmisor y receptor para el sistema usando una modulación óptica externa.

3.2.1 Transmisor

Para el sistema propuesto con modulación óptica externa, los bits de información son convertidos de serie a paralelo formando dos columnas, cada uno de estos será mapeado y modulado en símbolos 4-QAM formando de esta manera 4 vectores, donde cada uno contiene información de un único símbolo, luego se realiza la IFFT, mediante la modulación óptica externa Mach-Zehnder, los láseres son los encargados de transmitir las señales ópticas simultáneamente al destino, el diagrama de bloques del transmisor se muestra en la figura 3.14

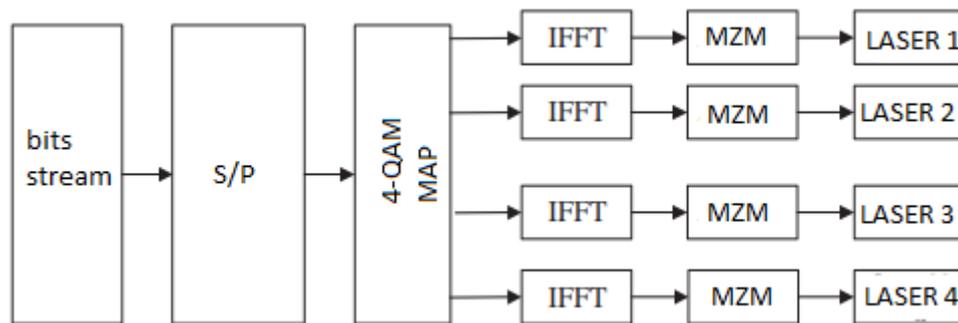


Figura 3. 14 Sistema MIMO FSO con modulación óptica externa
Elaborado por: Autor

A diferencia de la modulación óptica interna donde se necesitaba trabajar a la señal para obtener valores reales y positivos, la modulación externa Mach-Zehnder puede usar los valores que se obtiene a la salida de IFFT directamente, para ello se puede usar sistemas conocidos como Homodino, donde los valores reales se modulan por MZM y los imaginarios por otro desplazado 90 grados, este proceso se muestra en la figura 3.15 (Masero, 2014).

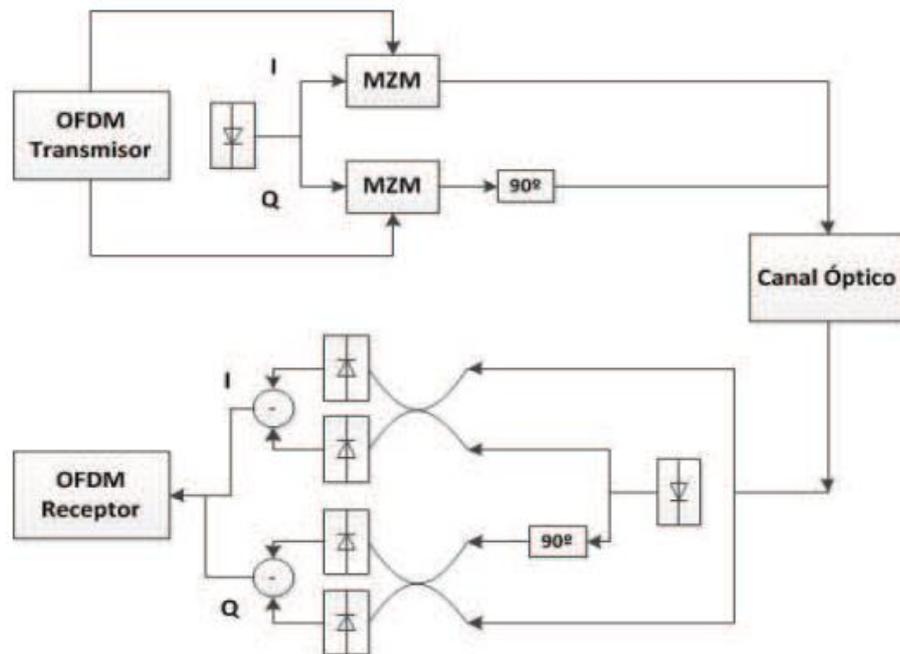


Figura 3. 15 Sistema Homodino
Fuente: (Masero, 2014)

La figura 3.15 muestra el proceso que se debe aplicar en cada uno de los 4 transmisores ópticos, además los transmisores láser usan diferentes longitudes de onda para mitigar de cierta manera la turbulencia atmosférica y elevar el rendimiento del sistema (Li, y otros, 2018).

3.2.2 Receptor

Para este proceso se usa un detector coherente por cada uno de los elementos transmisores, que recibe la señal y la convierte de óptica a eléctrica, para eliminar la información no deseada se usa un filtro pasa bajo, la señal que está en dominio tiempo se vuelve al dominio frecuencia mediante la FFT, se realiza los procesos indicados a cada uno de los receptores, posterior a esto mediante un de-mapeo de los símbolo 4-QAM, se forma un único vector con una conversión paralelo a serie y se recupera la información enviada, el diagrama de bloques de este proceso se muestra en la figura 3.16

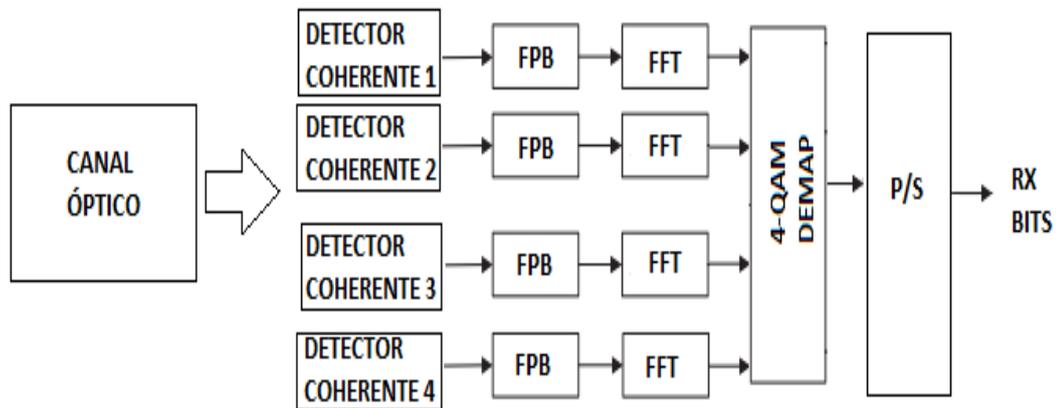


Figura 3. 16 Receptor MIMO-FSO con detección Coherente
 Elaborado por: Autor

La detección coherente usa internamente un láser con la misma longitud de onda del elemento transmisor, además de fotodetectores APD, que permite realizar transmisiones a mayores distancias (Muriel, 2018).

CAPÍTULO IV

Simulaciones y Resultados

Para el análisis de los sistemas se utiliza Matlab para la creación de los diferentes bloques que componen el emisor, el receptor y el Software OptiSystem que permite evaluar parámetros propios de un canal FSO.

4.1 Sistema MIMO FSO con modulación óptica de intensidad y detección directa.

Como se indicó en el capítulo anterior se realizará las simulaciones para un sistema con modulación óptica de intensidad y detección directa.

4.1.1 Transmisor

En la figura 4.1 se muestra cada uno de los procesos que se realiza a la señal de ingreso para transmitir la información por los diferentes elementos ópticos, para realizar la simulación del sistema se usa el Software Matlab.

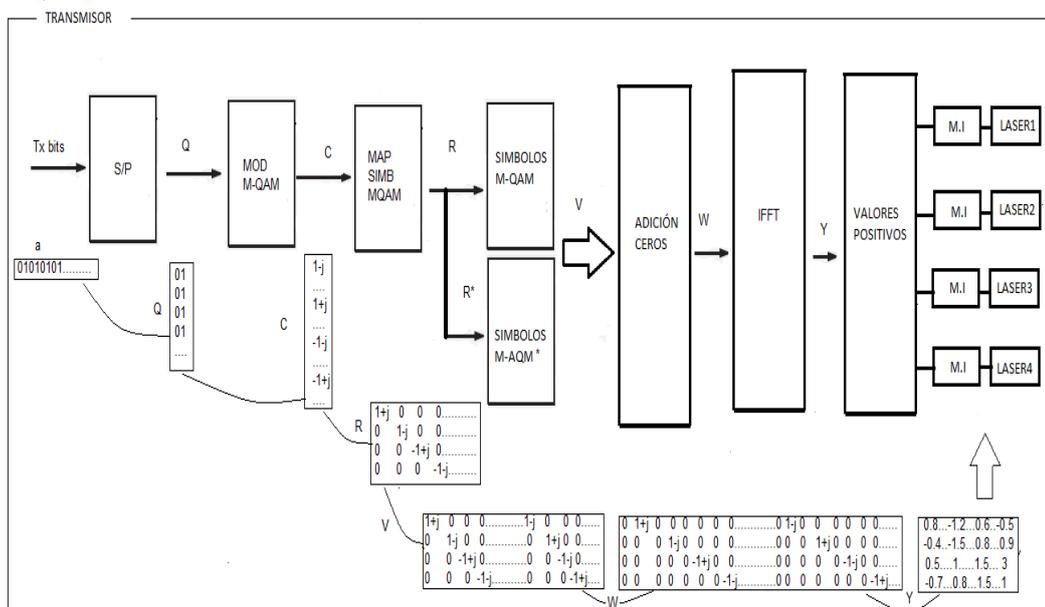


Figura 4. 1 Transmisor MIMO-FSO con Modulación óptica de intensidad

Elaborado por: Autor

La entrada de bits que está en serie se convierte en paralelo formando un vector con dos valores, a cada uno de estos valores se realiza un mapeo y modulación 4-QAM, la constelación de esta se muestra en la figura 4.2.

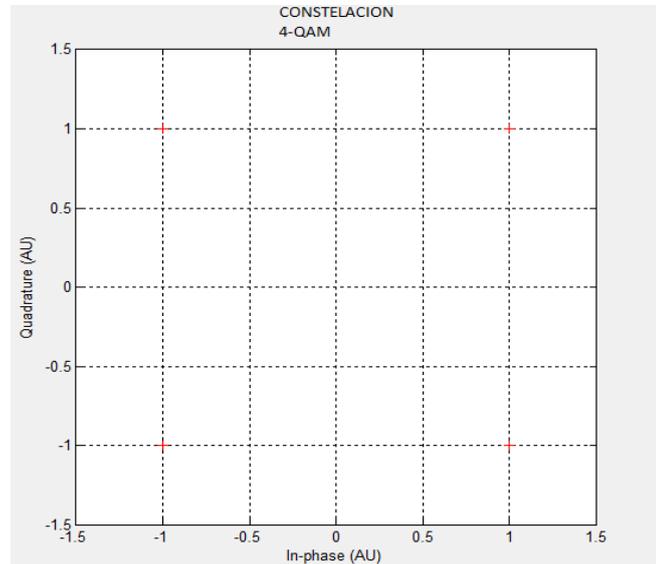


Figura 4. 2 Constelación de modulación 4-QAM
Elaborado por: Autor

A cada uno de los vectores se realiza el proceso de simetría hermética y adición de ceros, al aplicar la IFFT se obtiene valores reales en dominio tiempo, cumpliendo con la condición de los sistemas ópticos de modulación Interna, en la figura 4.3 se muestra los valores a la salida de la IFFT.

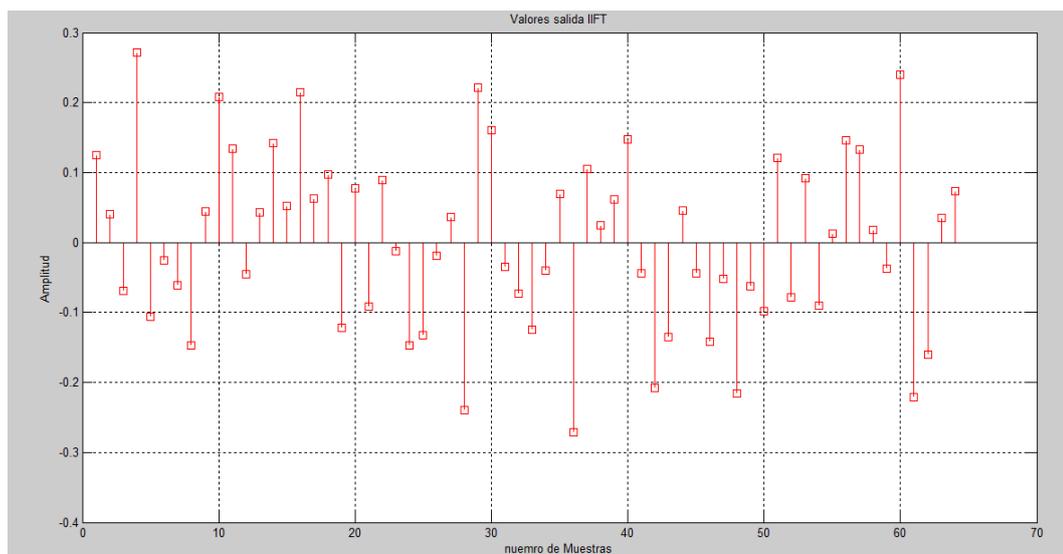


Figura 4. 3 Valores a la salida de la IFFT
Elaborado por: Autor

Mediante los procesos anteriormente indicados y las propiedades de la transformada rápida de Fourier, la señal que se obtiene se caracteriza porque la muestra (1 a la $N/2$) se repiten desde la muestra ($N/2+1$ a la muestra N), pero con signo cambiado como indica la figura 4.4.

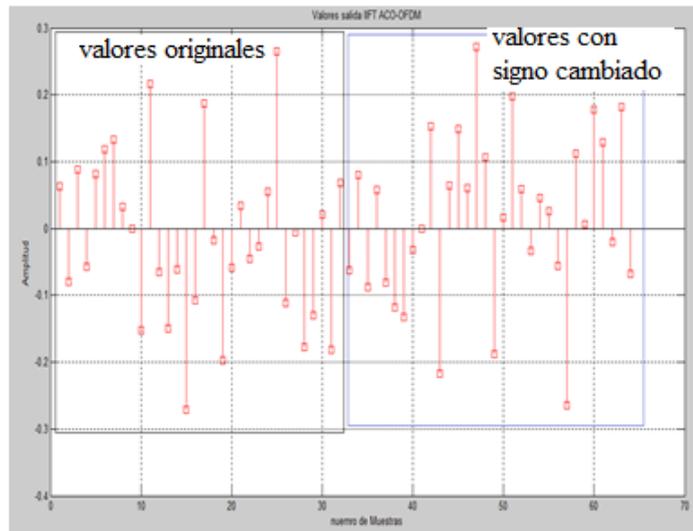


Figura 4. 4 Valores repiten en la segunda mitad del vector con signo cambiado
Elaborado por: Autor

Finalmente se realiza un cruce por cero donde los valores negativos se eliminan, pero la información no se pierde ya que estos valores se repiten en la segunda mitad de las muestras y así obtener solo valores positivos cumpliendo con la segunda condición de las comunicaciones ópticas de intensidad interna, teniendo la información lista para enviar por cada uno de los 4 emisores ópticos. Este proceso se muestra en la figura 4.5.

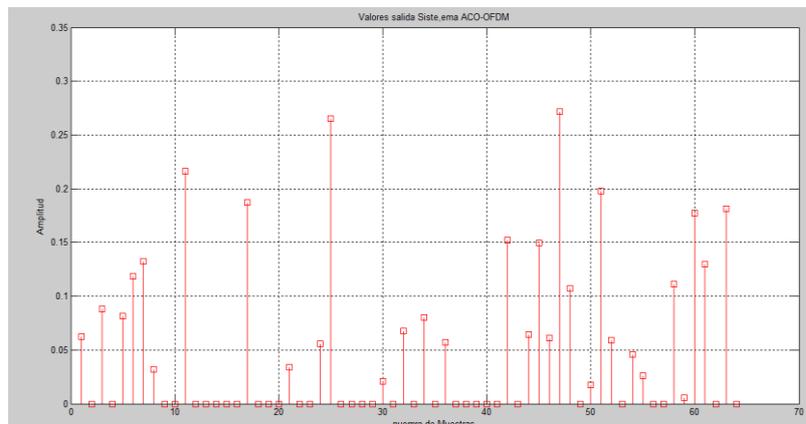


Figura 4. 5 Valores acondicionados para modulación óptica Interna
Elaborado por: Autor

4.1.2 Receptor

Para simular la distorsión y efecto que produce un canal en la señal enviada se usa un canal de tipo AWGN (Additive White Gaussian Noise), cuya característica es introducir un ruido Gaussiano Blanco, para eliminar o reducir el efecto que tiene este sobre las señales, en el receptor se ha realizado un clasificador y detector mediante Maximum-Likelihood (ML) cuya función es reducir este efecto, el diagrama de bloques del receptor se muestra en la figura 4.6.

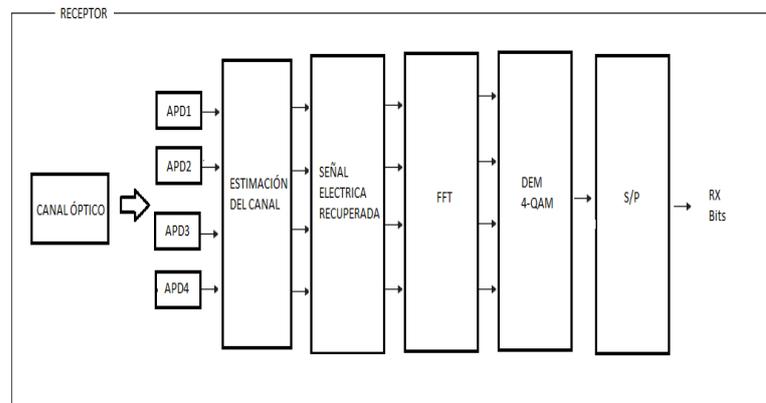


Figura 4. 6 Receptor MIMO-FSO con Detección Directa
Elaborado por: Autor

La figura 4.7 muestra la distribución de probabilidad en el receptor 1, luego de pasar por el proceso de estimación del canal.

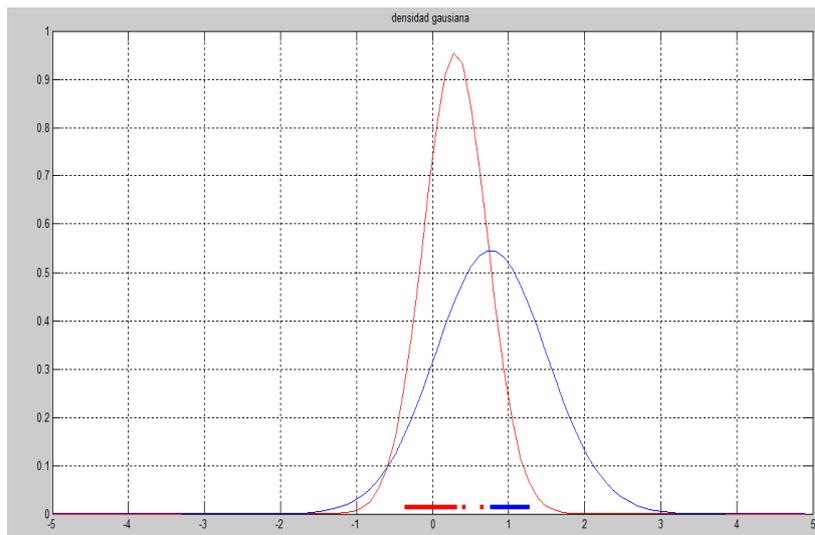


Figura 4. 7 Distribución de Probabilidad en el receptor 1
Elaborado por: Autor

El siguiente paso es reconstruir la señal eléctrica compuesta por valores reales positivos y negativos para cada uno de los receptores, la señal recuperada se muestra en la figura 4.8.

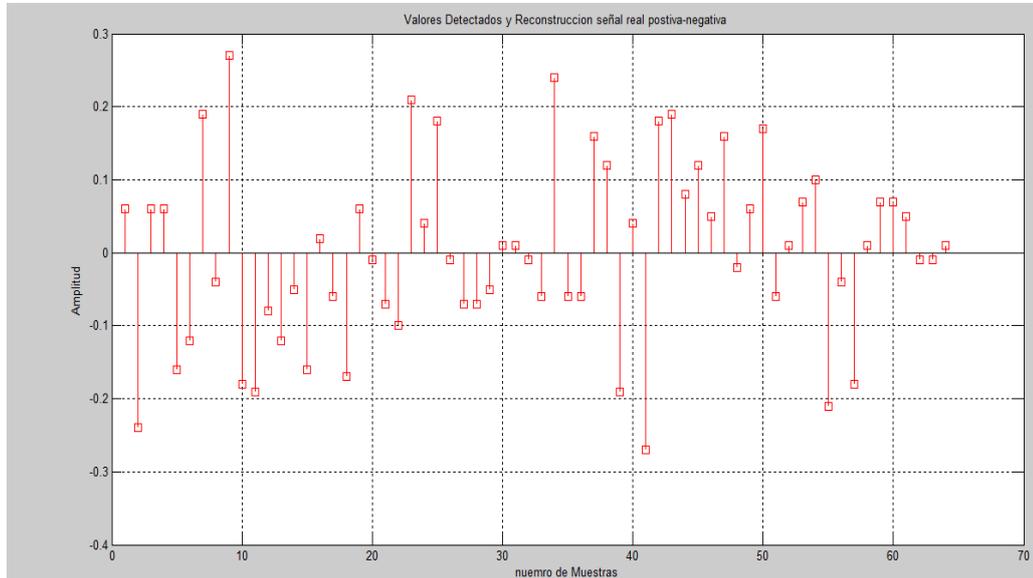


Figura 4. 8 Valores recuperados Positivos y Negativos
Elaborado por: Autor

Posterior a estos datos se realiza la trasformada rápida de Fourier, la figura 4.9 muestra los valores recuperados en el receptor encargado de captar los símbolos de $(-1+1j)$ y 0 , como se puede observar los símbolos se distorsionan por el efecto propio del canal.

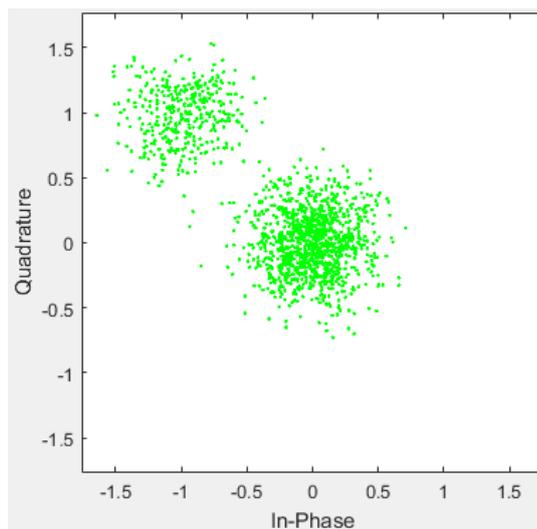


Figura 4. 9 Valores receptados del símbolo $(-1+1j)$ y 0
Elaborado por: Autor

La figura 4.10 muestra los símbolos recuperados $(-1-1j)$ y 0 .

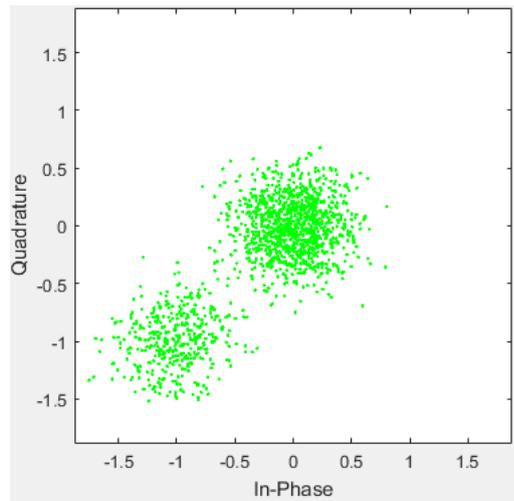


Figura 4. 10 Valores receptados del símbolo $(-1-1j)$ y 0
Elaborado por: Autor

La figura 4.11 muestra los símbolos recuperados $(1-1j)$ y 0

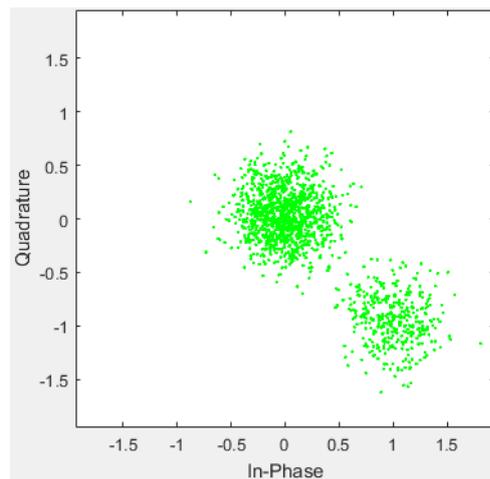


Figura 4. 11 Valores receptados del símbolo $(1-1j)$ y 0
Elaborado por: Autor

La figura 4.12 indica los símbolos recuperados $(1+1j)$ y 0 .

Vale la pena recalcar y recordar que en el emisor cada uno de los transmisores toma un único símbolo de la modulación 4-QAM, por lo tanto, el receptor se encarga de recuperar el mismo símbolo enviado, el cual, al ser recuperado, pero al simular un escenario real y un canal con ruido, provoca el esparcimiento en los símbolos receptados.

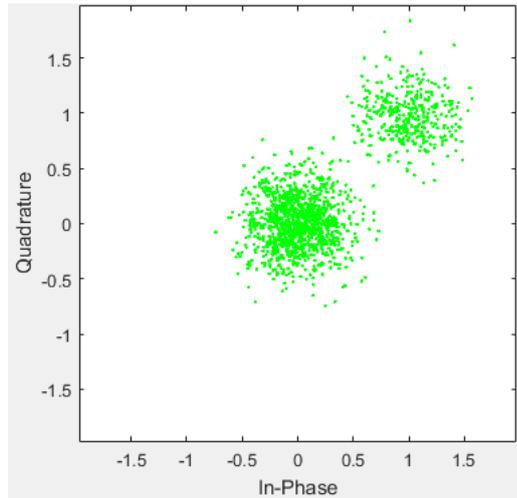


Figura 4. 12 Valores receptados del símbolo (1+1j) y 0
Elaborado por: Autor

Finalmente, a estos símbolos se realiza la demodulación 4-QAM, y mediante la conversión paralela a serie se recupera la información enviada, para evaluar el rendimiento del sistema se obtiene la BER, en función de la relación señal a ruido SNR en dB, la figura 4.13 muestra lo indicado.

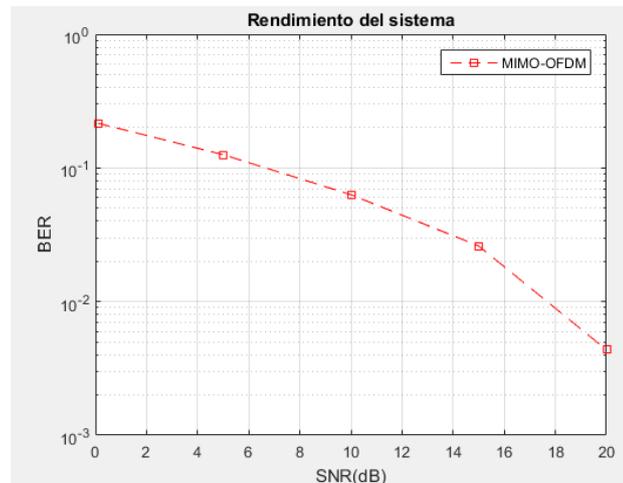


Figura 4. 13 Rendimiento del Sistema MIMO-FSO con IM/DD
Elaborado por: Autor

Además, para evaluar el rendimiento con otro sistema se ha comparado con un sistema óptico SISO es decir con un solo transmisor y receptor, la figura 4.14 muestra el comportamiento de los sistemas. Para ello la tabla 4.1 indica los parámetros usados para la evaluación del sistema.

Tabla 4. 1 Parámetros usados para la simulación

Nº Bits	3000
Modulación	4-QAM
IFFT	1024
Nº Transmisores	4
Canal AWGN	1.20dB
Nº Receptores	4
Estimación canal	ML
FFT	1024
De-modulación	4-QAM

Elaborado por: Autor

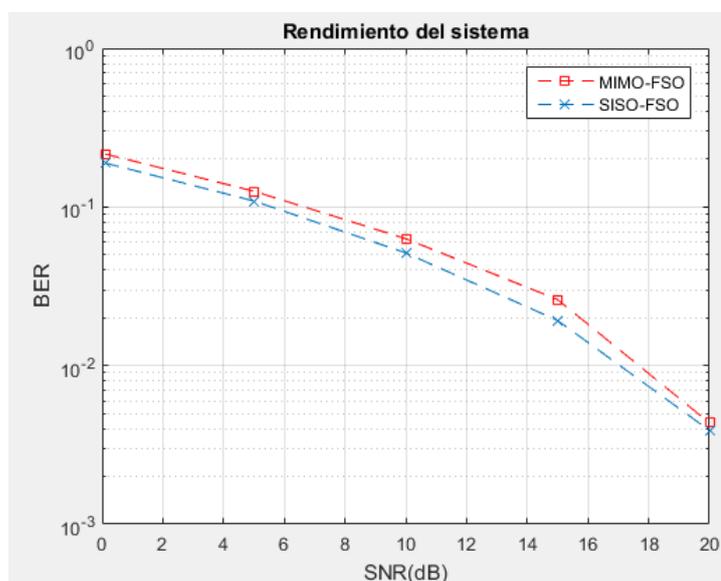


Figura 4. 14 Rendimiento del Sistema MIMO-FSO con SISO-FSO

Elaborado por: Autor

Como se observa en la figura 4.14 a medida que la relación señal a ruido aumenta la tasa de error es menor, en el sistema SISO el rendimiento es mejor ya que al tener un solo receptor y transmisor es más robusto a la presencia del ruido. Con los algoritmos elaborados para el sistema

propuesto se eleva el rendimiento siendo una opción a tener en cuenta para las comunicaciones inalámbricas ópticas. ya que al trabajar con 4 receptores y emisores puede aumentar la velocidad 4 veces en comparación con un sistema MIMO.

4.2 Sistema MIMO FSO con Modulación Óptica Externa y Detección Coherente

Al igual que lo indicado en el capítulo anterior se realizará las simulaciones para un sistema con modulación óptica externa y detección coherente.

4.2.1 Transmisor

Para el transmisor indicado en la figura 3.15 los bits de entrada son pasados a paralelo, mapeados y reagrupados en grupos de 2, cada uno de estos bits representarán un único símbolo cuando son modulados en 4-QAM, formando por lo tanto 4 vectores.

La figura 4.15 muestra la constelación de los símbolos $(1+1j)$ y 0

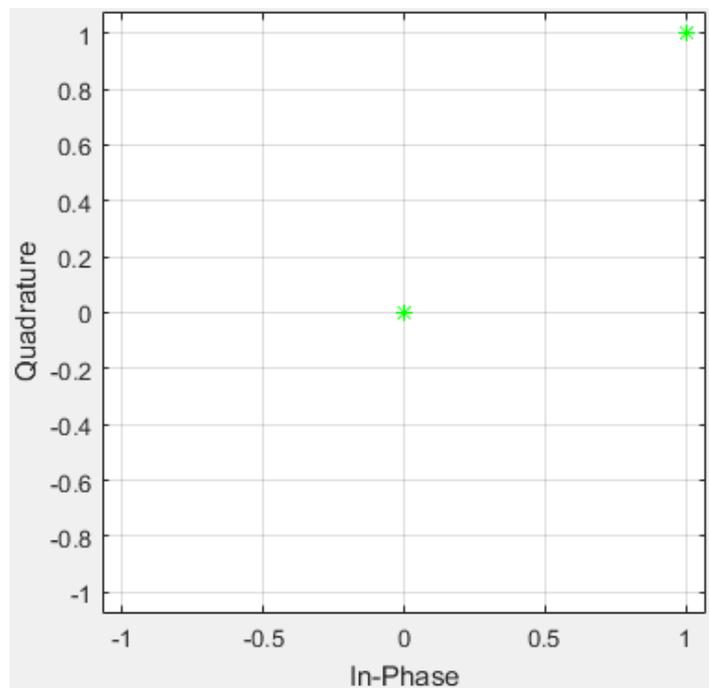


Figura 4. 15 Constelación de símbolos $(1+1j)$ y 0 para TX-1
Elaborado por: Autor

La figura 4.16 muestra la constelación de los símbolos $(1-1j)$ y 0

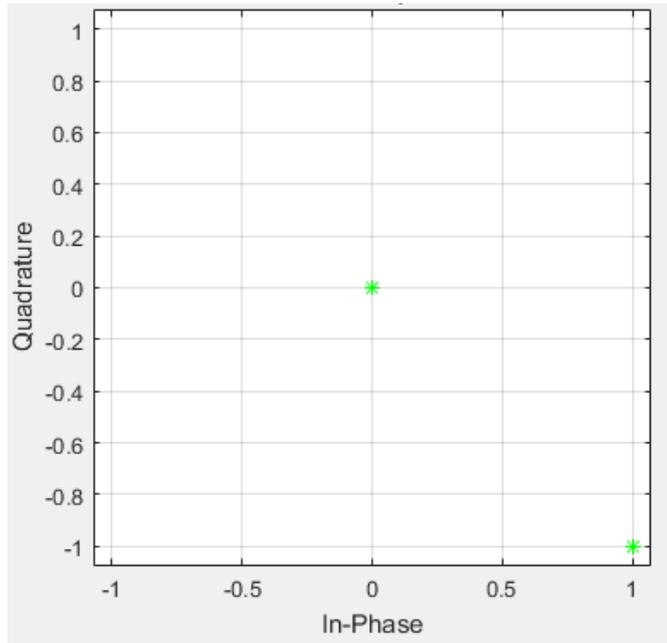


Figura 4. 16 Constelación de símbolos $(1+1j)$ y 0 para TX-2
Elaborado por: Autor

La figura 4.17 indica la constelación de los símbolos ubicados en la cuadratura $1j$, en fase -1 y 0 .

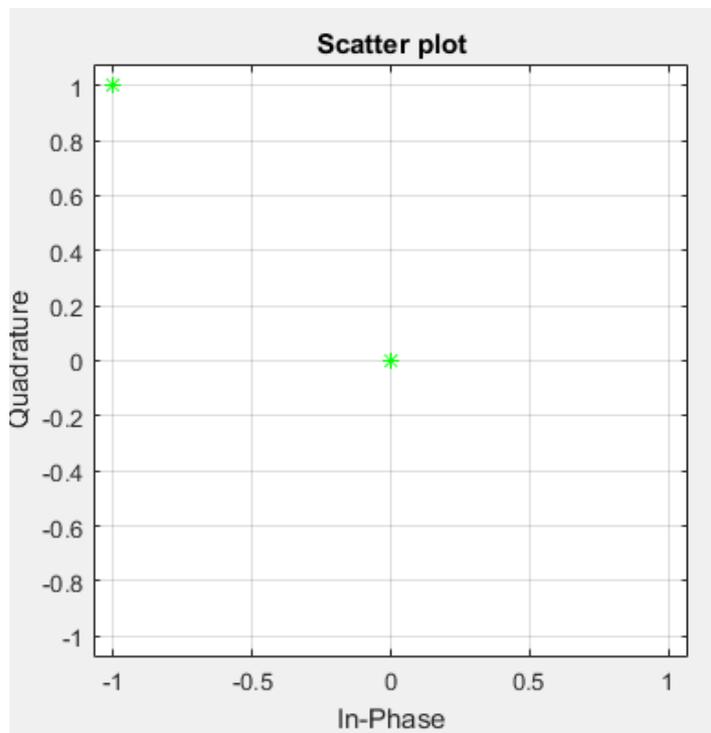


Figura 4. 17 Constelación de símbolos $(-1+1j)$ y 0 para TX-3
Elaborado por: Autor

En la figura 4.18 se muestra la constelación de los símbolos ubicados en la cuadratura $-1j$ en fase -1 y 0 .

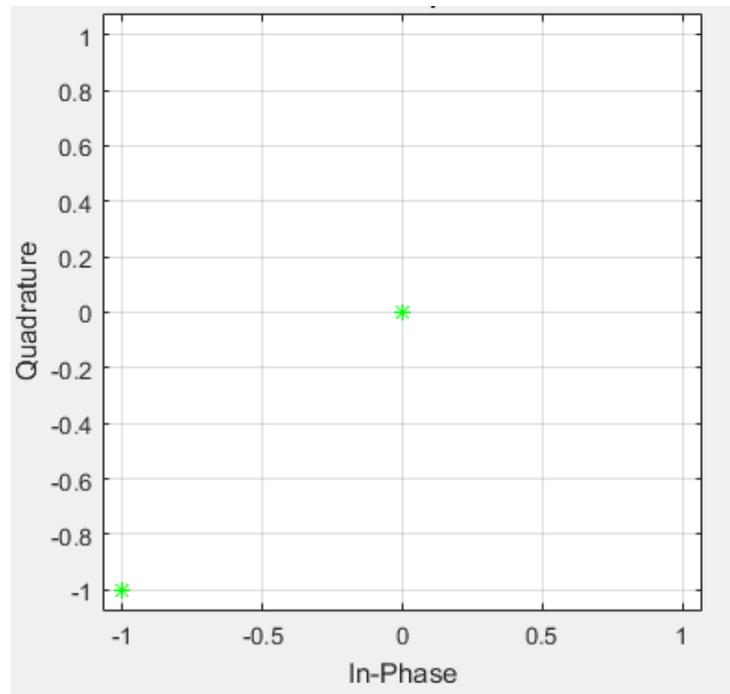


Figura 4. 18 Constelación de símbolos $(-1+1j)$ y 0 para TX-4
Elaborado por: Autor

Luego, a cada uno de estos vectores conformados por un determinado símbolo se aplica la transformada de Fourier, para realizar la conversión eléctrica a óptica, se aplica la modulación externa Mach Zehnder, este proceso se realiza en el Software Optisystem 16.

La modulación externa se muestra en la figura 4.19 donde los valores a transmitir están compuestos por un generador de pulsos NRZ (No Return Zero), simulando que estos son los valores obtenidos a la salida de IFFT, a estos se aplica MZM, y se repite el proceso para cada uno de los 4 emisores, la tabla 4.2 indica los parámetros del láser seleccionado para el transmisor 1

Tabla 4. 2 Parámetros de laser Tx-1

Longitud de onda de laser 1	1490nm
Potencia	10 dBm

Elaborado por: Autor

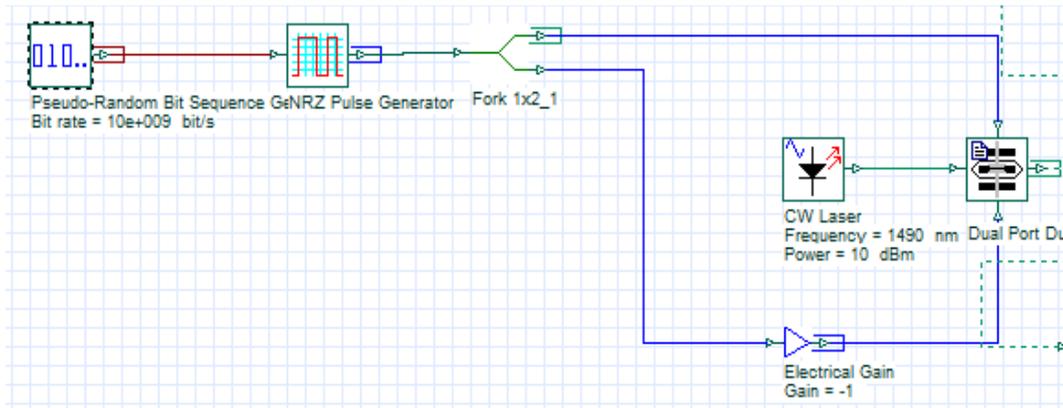


Figura 4. 19 Modulación MZM para Transmisor 1

Elaborado por: Autor

La figura 4.20 indica la configuración realizada para el transmisor 2, mientras que la tabla 4.3 muestra la longitud de onda y potencia que se utiliza para el láser del transmisor 2

Tabla 4. 3 Parámetros de laser Tx-2

Longitud de onda de laser 2	1450nm
Potencia	10 dBm

Elaborado por: Autor

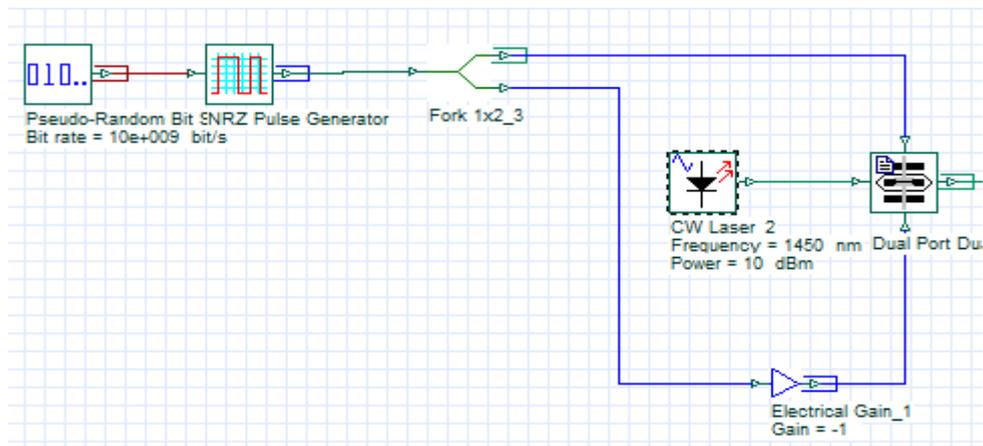


Figura 4. 20 Modulación MZM para Transmisor 2

Elaborado por: Autor

La tabla 4.4 muestra los parámetros del láser usado en el transmisor 3 mientras que la figura 4.21 muestra la configuración del MZM para TX-3.

Tabla 4. 4 Parámetros de laser Tx-3

Longitud de onda de laser 3	1390nm
Potencia	10 dBm

Elaborado por: Autor

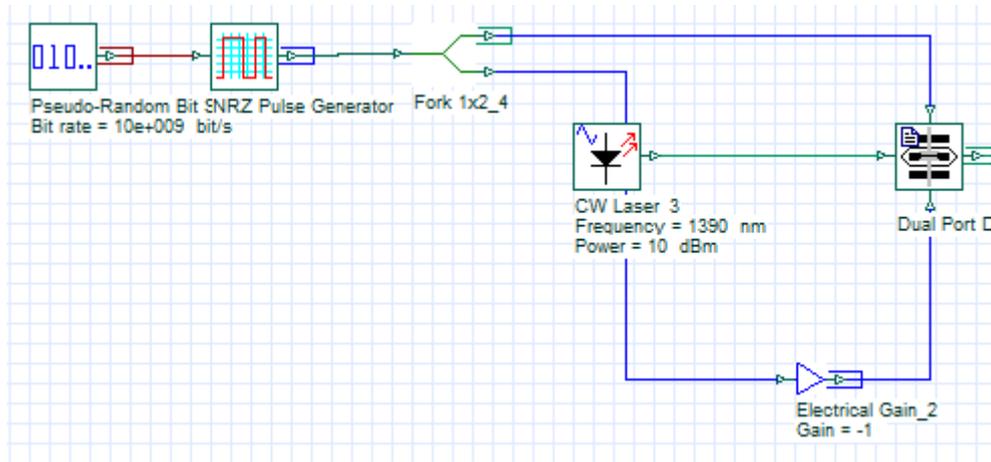


Figura 4. 21 Modulación MZM para Transmisor 3

Elaborado por: Autor

La tabla 4.5 indica los parámetros del láser usado en el transmisor 4 y la figura 4.22 muestra la configuración del MZM que se usa para el Tx-4

Tabla 4. 5 Parámetros de laser Tx-4

Longitud de onda de laser 4	1350nm
Potencia	10 dBm

Elaborado por: Autor

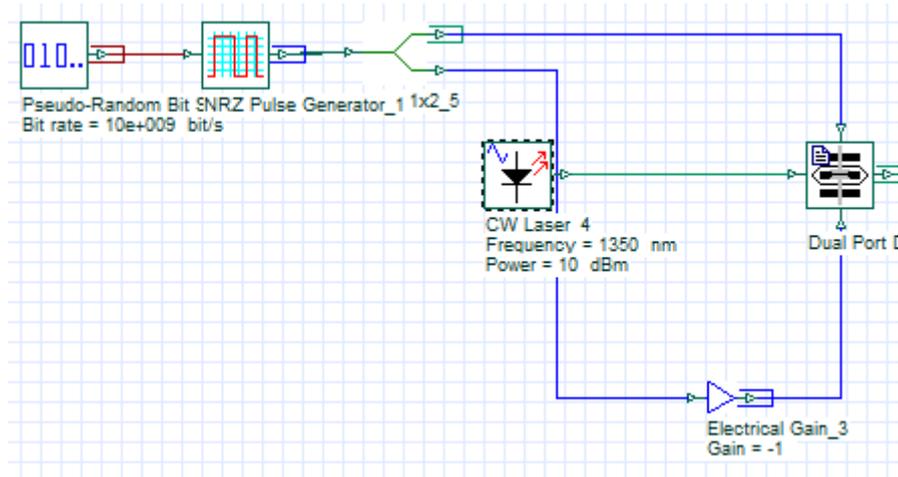


Figura 4. 22 Modulación MZM para Transmisor 4

Elaborado por: Autor

El software simula un canal propio para comunicaciones ópticas inalámbricas en el espacio libre o canal FSO, se puede seleccionar distancia entre emisor y receptor, pérdidas de propagación, etc. Entre las características ópticas están las antenas, se puede modificar diámetro de apertura, divergencia, etc. Permite evaluar y modificar estos parámetros para identificar cómo se comporta el sistema en diferentes condiciones.

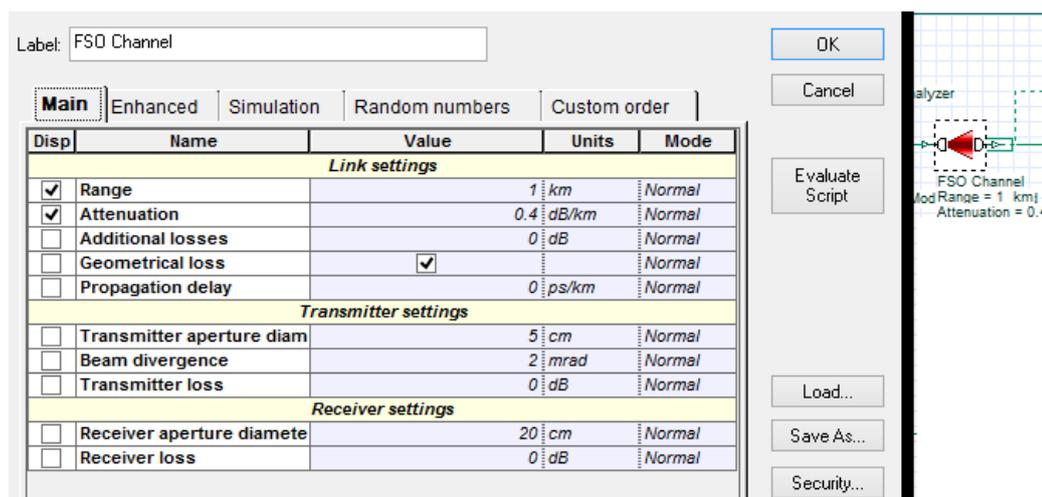


Figura 4. 23 Parámetros del Canal FSO en OptiSystem 16

Elaborado por: Autor

4.2.2 Receptor

En el receptor óptico se realiza una detección coherente conformada por un láser local y dos fotodetectores tipo Avalanche APD, de esta manera se realiza el proceso de la conversión óptica a eléctrica, esto se muestra en la figura 4.24. Además, las características del láser y fotodetector para el receptor 1 se indican en la tabla 4.6

Tabla 4. 6 Parámetros de receptor 1

Longitud de onda de laser local	1490nm
Potencia	1 dBm
Foto-detector	APD
Ganancia	3
Receptividad	10 A/W

Elaborado por: Autor

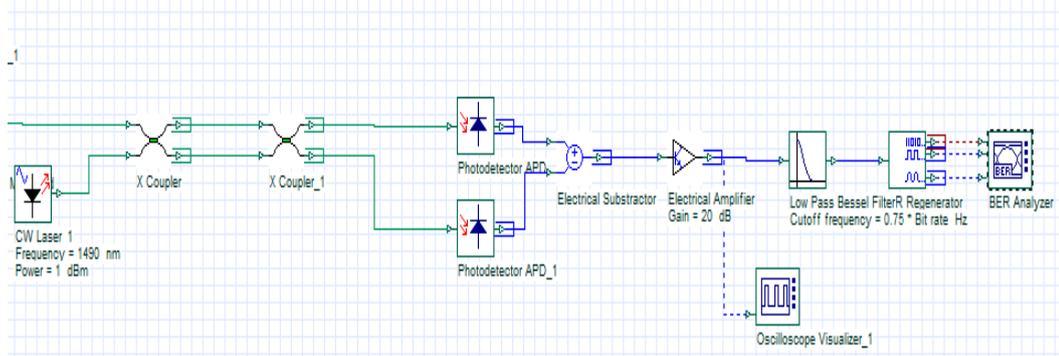


Figura 4. 24 Detección Coherente realizada para Receptor 1

Elaborado por: Autor

La figura 4.25 muestra la configuración del receptor 2, además las características de los elementos ópticos usados se indican en la tabla 4.7

Tabla 4. 7 Parámetros del receptor 2

Longitud de onda de laser local	1450nm
Potencia	1 dBm
Foto-detector	APD
Ganancia	3
Receptividad	10 A/W

Elaborado por: Autor

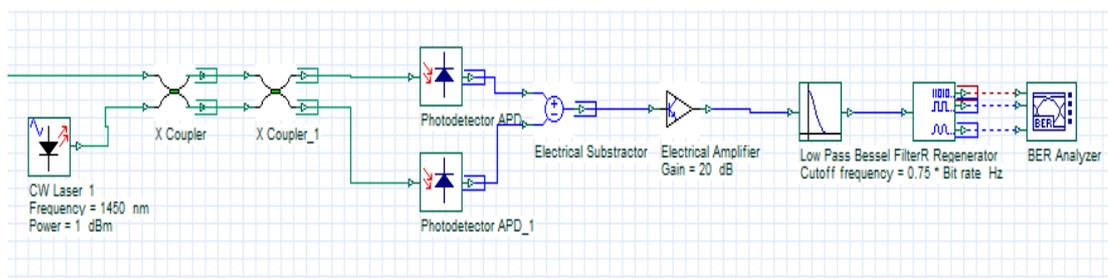


Figura 4. 25 Detección Coherente realizada para Receptor 2

Elaborado por: Autor

Para evaluar el comportamiento se analiza la tasa de error por bit (BER, Bit Error Rate), mediante un diagrama de ojo se puede verificar cómo se comporta el sistema óptico bajo diferentes escenarios. La figura 4.26 muestra la eficiencia del sistema a una distancia de 1Km, con los

parámetros de emisor y receptor indicados en la tabla 4.2 y 4.6 respectivamente

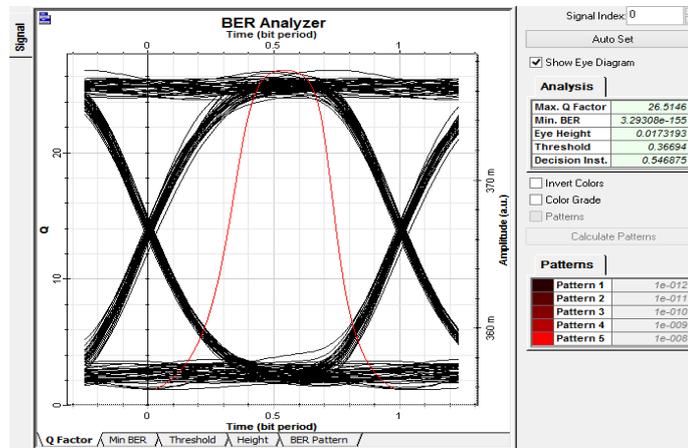


Figura 4. 26 Tasa de Error de Bit para un enlace FSO de 1Km
Elaborado por: Autor

Como se puede observar tiene una tasa de error muy baja, el factor Q muy elevado, además que la apertura del ojo es excelente, por lo tanto, a esta distancia responde muy bien el sistema.

En la figura 4.27 se mantiene los parámetros de la tabla 4.2 y 4.6 pero la distancia en el enlace aumenta a 3 Km, como se puede observar la factor Q disminuye por lo tanto la BER aumenta y la apertura del ojo se cierra, a esta distancia el rendimiento del sistema disminuye considerablemente.

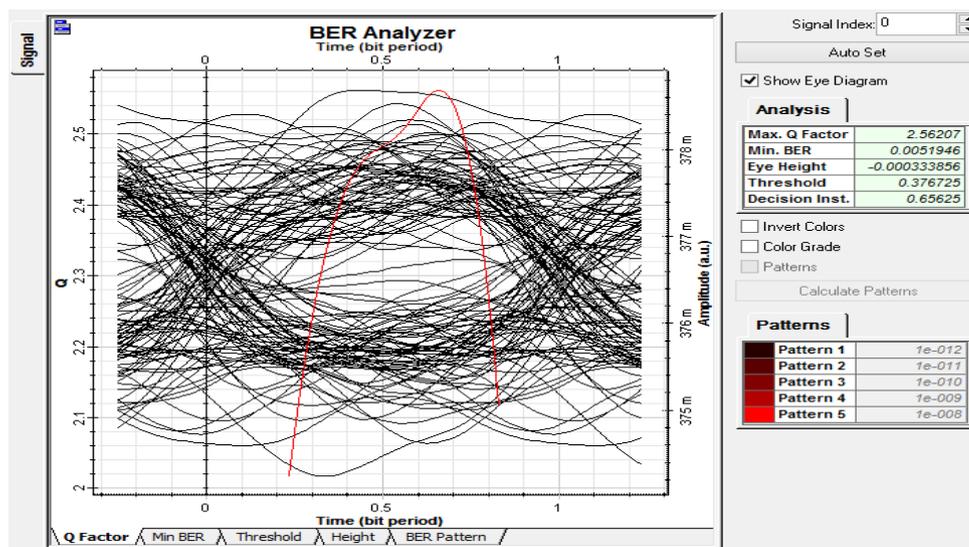


Figura 4. 27 Tasa de Error de Bit para un enlace FSO de 3Km
Elaborado por: Autor

Para el siguiente análisis los parámetros del emisor y receptor siguen sin cambiar, la distancia se mantiene en 3 Km, pero ahora varían parámetros en las antenas, se aumenta el diámetro del lente en 4 veces en el emisor y receptor como se indica en la figura 4.28

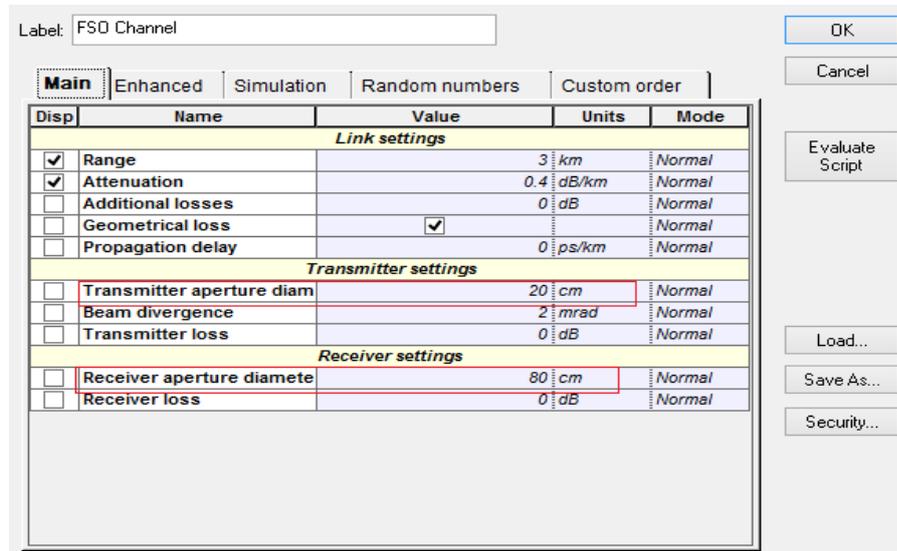


Figura 4. 28 Cambio en apertura de lente Transmisor y Receptor
Elaborado por: Autor

Al aumentar el tamaño de la antena se mitiga la perdida por esparcimiento, recuperando la eficiencia en el sistema como se ve en la figura 4.29, con un factor Q elevado, una buena apertura en el ojo y la BER muy baja, mejorando la eficiencia.

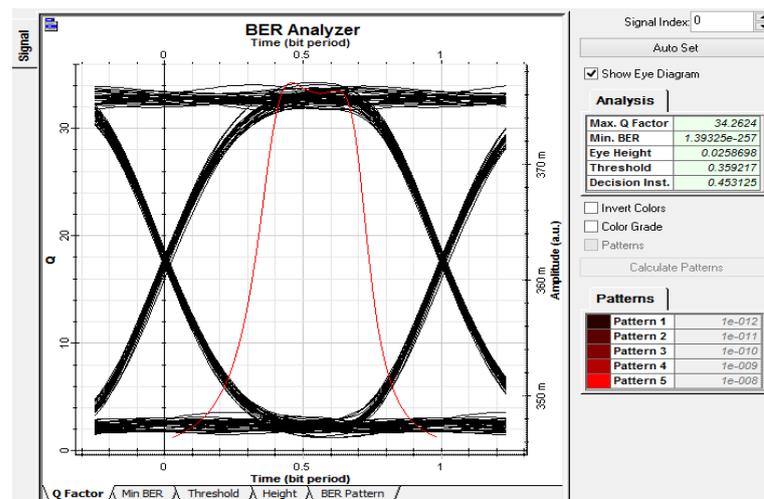


Figura 4. 29 BER para enlace FSO de 3Km con parámetros de antenas modificados
Elaborado por: Autor

Cada señal al pasar por el proceso anteriormente indicado están en dominio tiempo se debe pasar al dominio frecuencia mediante FFT, la figura 4.30 muestra los símbolos $(1+1j)$ recuperados por el receptor 1

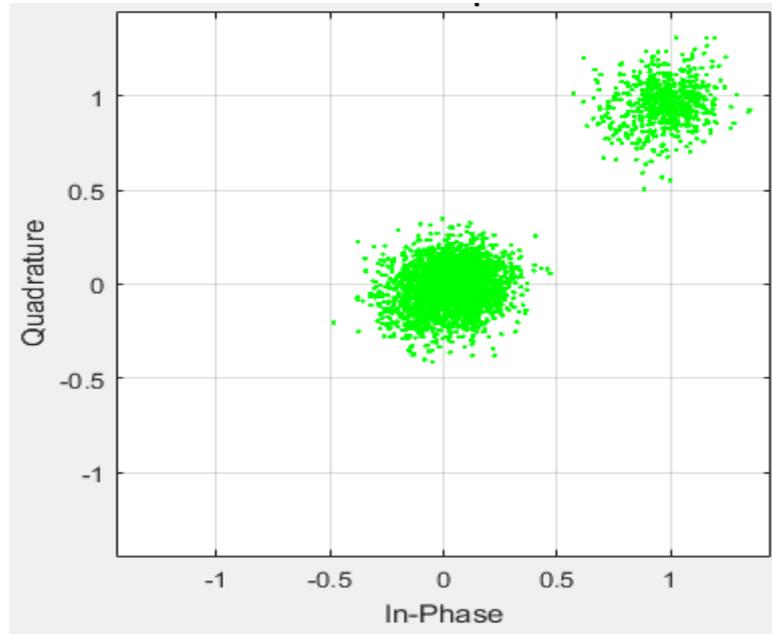


Figura 4. 30 Símbolos recuperados $(1+1j)$ y 0
Elaborado por: Autor

La figura 4.31 muestra los símbolos $(+1,-1j)$ recuperados por el receptor 2

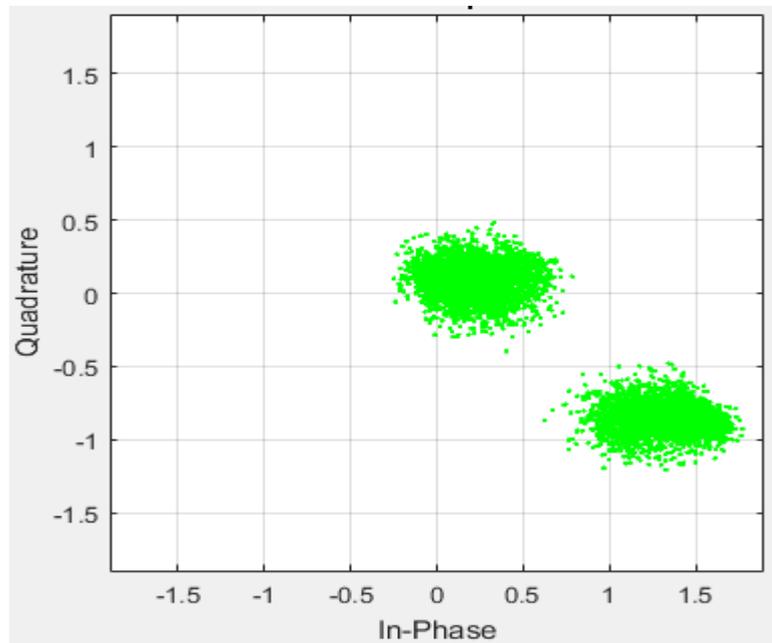


Figura 4. 31 Símbolos recuperados $(1-1j)$ y 0
Elaborado por: Autor

Los símbolos $(-1+1j)$ recuperados por el transmisor 3 se muestra en la figura 4.32.

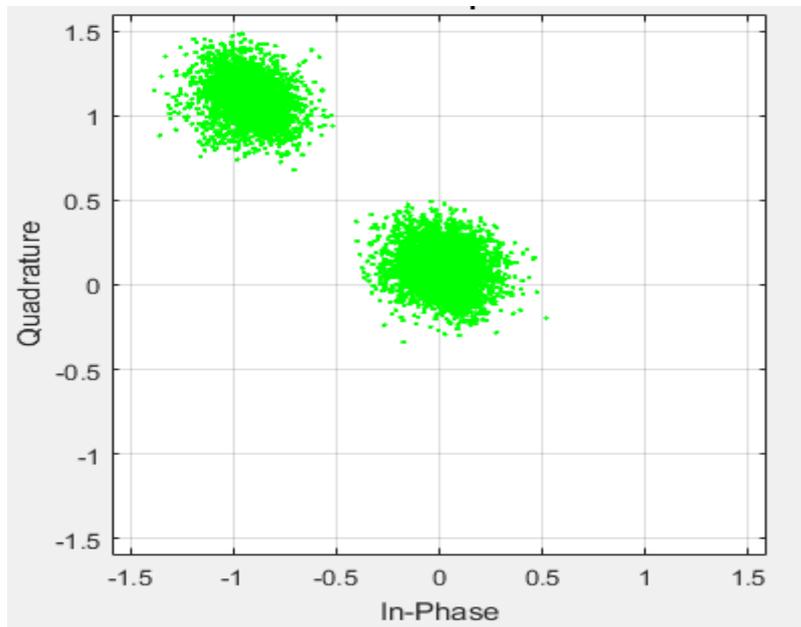


Figura 4. 32 Símbolos recuperados $(-1+1j)$ y 0
Elaborado por: Autor

Mientras que los símbolos $(-1-1j)$ recuperados por el receptor 4 se muestra en la figura 4.33.

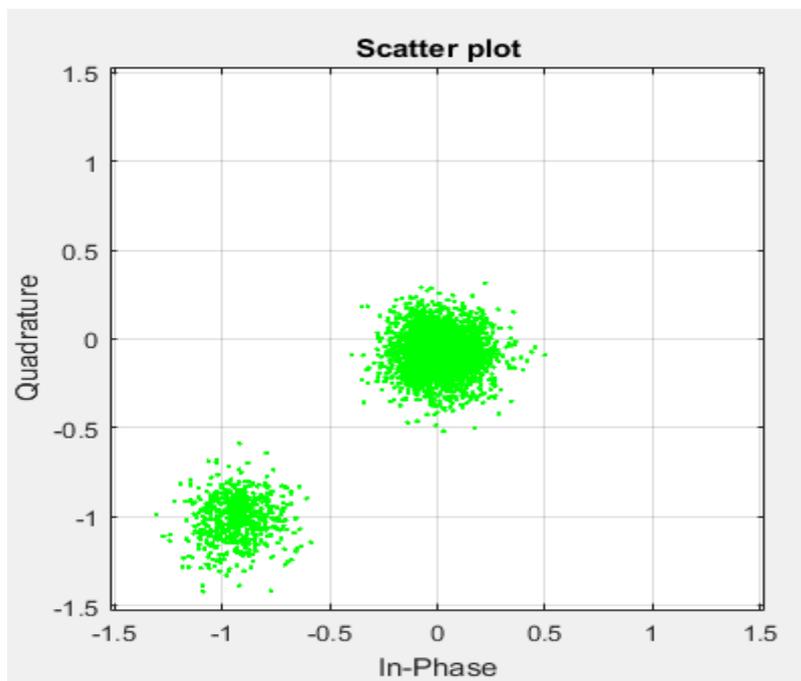


Figura 4. 33 Símbolos recuperados $(-1-1j)$ y 0
Elaborado por: Autor

Como se realizó con el sistema propuesto en la sección 4.1, se analiza el sistema bajo diferentes escenarios, primero se envía una señal tomada de un electrocardiograma, esta pasa por cada uno de los procesos anteriormente indicados, para simular el canal en el Software Matlab se usa el modelo de un canal Rician ya que este se aproxima a un canal con línea de vista (LOS), el parámetro K indica la relación de potencia entre la trayectoria directa y otras trayectorias dispersas en dicho canal.

La figura 4.34 muestra la señal enviada mientras que la figura 4.35 muestra la señal recibida con un $K=5$.

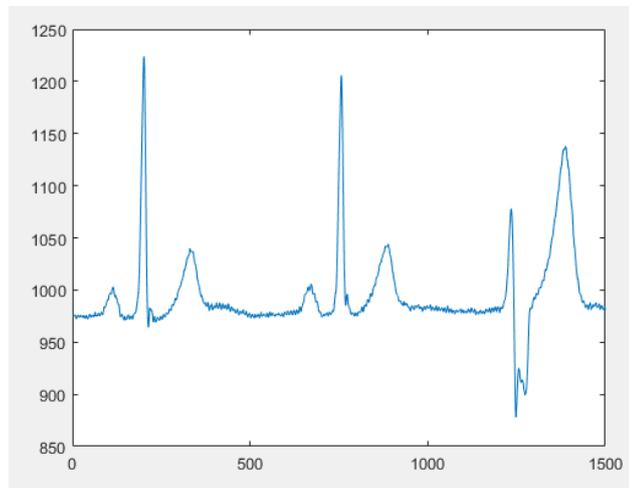


Figura 4. 34 Señal enviada
Elaborado por: Autor

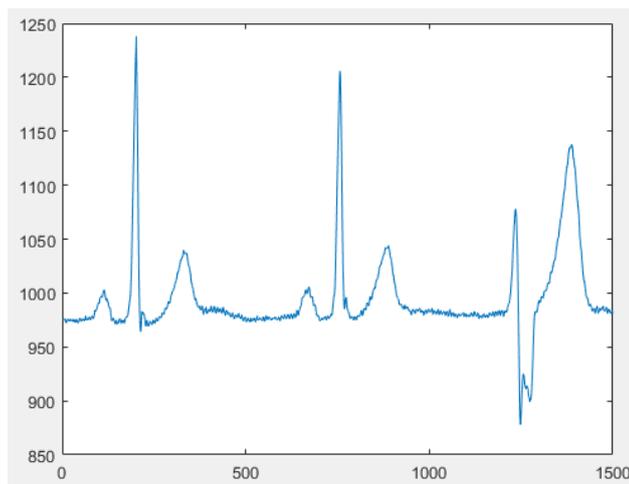


Figura 4. 35 Señal Recibida con $K=5$
Elaborado por: Autor

La figura 4.36 muestra la señal recibida con un $K=2$

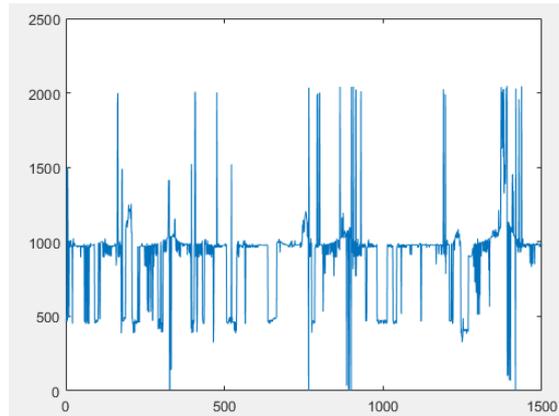


Figura 4. 36 Señal Recibida con $K=2$
Elaborado por: Autor

Mientras que la figura 4.37 muestra la señal recibida con un $K = 3$

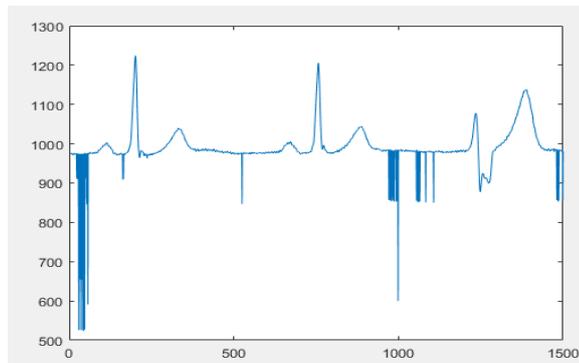


Figura 4. 37 Señal Recibida con $K=3$
Elaborado por: Autor

También se realiza la evaluación con una señal de audio, la figura 4.38 muestra la señal de audio enviada, se trabaja con las mismas condiciones tanto en el sistema como en el canal.

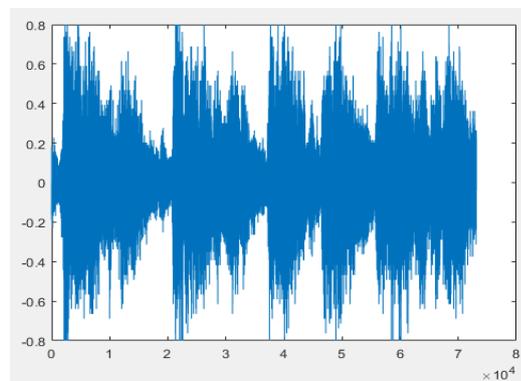


Figura 4. 38 Señal de Audio enviada
Elaborado por: Autor

La figura 4.39 muestra la señal a la salida con un factor $K=1$ en el canal Rician.

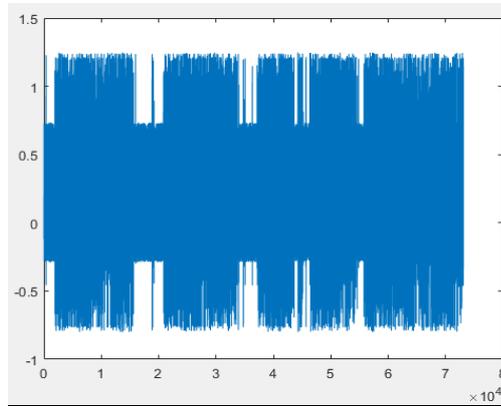


Figura 4. 39 Señal de Audio Receptada con $K=1$
Elaborado por: Autor

La figura 4.40 indica la señal receptada con un factor $K=3$

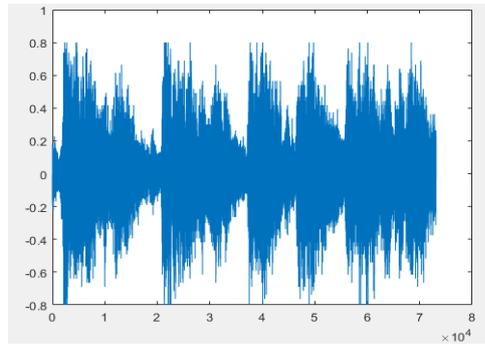


Figura 4. 40 Señal de Audio Receptada con $K=3$
Elaborado por: Autor

Mientras que la figura 4.41 indica la señal que es respectada con $K=5$

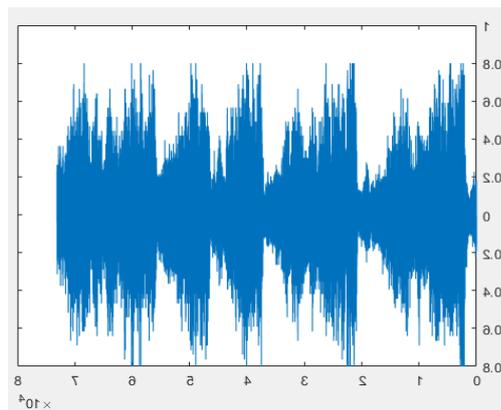


Figura 4. 41 Señal de Audio Receptada con $K=5$
Elaborado por: Autor

Conclusiones

En base a los fundamentos técnicos estudiados se ha realizado dos modelos como propuesta para el sistema MIMO-FSO, uno que consiste en una modulación óptica interna y otra con una modulación óptica externa usando el modelo Mach-Zehnder, El primer modelo consiste en procesos más largos y por lo tanto de mayor procesamiento computacional tanto en el emisor como en el receptor por las características propias de estos sistemas. Mientras que con una modulación externa el sistema se vuelve más simple y las acciones se realizan con mayor velocidad y eficiencia, además que con la modulación externa se puede alcanzar mayores distancias solventando así inconveniente en la implementación de los Sistema Ópticos en el espacio libre

Para el primer Modelo con modulación interna se ha evaluado el sistema bajo condiciones de un canal Rician que caracteriza a un canal LOS, para mitigar los efectos de este canal y recuperar la mayor cantidad de información se ha optado por técnicas de clasificación y corrección de errores en el receptor que son muy eficientes, obteniendo excelentes resultados y receptando la mayor información de las señales transmitidas.

El modelo con modulación externa Mach- Zehnder ha permitido evaluar el sistema bajo condiciones propias de un canal FSO donde se pudo variar parámetros como: distancia, pérdidas, entre otros y se comprobó cómo estos afectan directamente a la eficiencia del sistema, pero al modificar parámetros como: tamaño de antenas ópticas, potencia en los emisores y receptores se puede mitigar estos efectos inclusive alcanzar distancias más largas sin afectar la tasa de error por bit BER

El sistema MIMO elaborado ha presentado un elevado rendimiento al realizar las pruebas con una señal de audio, una señal de un electrocardiograma y stream de bits. En comparado a un sistema SISO bajos las mismas condiciones y escenarios no presenta un incremento

notable en cuanto a la tasa de error por bit, además que la característica propia del sistema permite que tanto los emisores como receptores trabajen independientemente aumentando la velocidad en cuatro veces en relación a un sistema normal.

Recomendaciones

Se recomienda el uso de sistemas ópticos con modulación externa para ambientes Outdoor ya que permite tener un mayor alcance y es más robusto ante la presencia de perturbaciones externas.

A la salida de los diodos emisores, así como en la entrada de los fotoreceptores de luz es recomendable el uso de antenas ópticas para garantizar un mejor apuntamiento entre estos elementos, evitando de esta manera el esparcimiento del haz de luz transmitido y mejorar el rendimiento del sistema

Se recomienda el uso de softwares especializados para telecomunicaciones como es OptiSystem ya que dentro de este se encuentran elementos propios para los sistemas ópticos en el espacio libre como son: canal, antenas ópticas, entre otros, que permiten evaluar al sistema en diferentes condiciones y aproximar al comportamiento real del mismo.

Para garantizar las comunicaciones y en base a los resultados obtenidos es recomendable usar este sistema para distancias de 7 a 8 kilómetros con los parámetros establecidos, aunque se puede aumentar la distancia, pero dependerá de la aplicación a usar, tamaño y la potencia de los elementos ópticos que garantice una tasa de error baja.

En el sistema que usa la modulación óptica externa se recomienda usar diferentes longitudes de ondas para cada uno de los elementos transmisores, además sincronizar la longitud de onda del emisor con cada uno de los receptores, de esta manera evitar el esparcimiento y la interferencia co-canal.

Glosario de términos

MIMO: Multiple Input Multiple Output

FSO: Free Space Optical

OWC: Optical Wireless Communication

Li-Fi: Light Fidelity

VCL: Visible Light Communication

LOS: Line of Sight

QAM: Quadrature Amplitud Modulation

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OSM-OFDM: Optical Spatial Modulation-OFDM

NDCO-OFDM: Modulación Espacial Óptica-OFDM sin componente DC

CO-OFDM: Modulación Coherente Óptica-OFDM

MMZ: Modulación Match-Zehnder

CWL: Continuous Wave Laser

DML: Directly Modulated Laser

NIR: Infrarrojo Cercano

NWIR: Infrarrojo Medio

LWIR: Infrarrojo Lejano

EIR: Extremo Infrarrojo

APD: Avalanche Photo-Diode

Referencias bibliográficas

- Aguilar, A. (2014). *Modelización del diodo led, diseño y construcción de la interfaz del transmisor y receptor para un sistema de comunicación de luz visible mediante un diodo de luz blanca*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6871>
- Arvizu, A., López, J., Murrieta, J., Morán, L., Muraoka, R., & Santos, J. (2014). *Desarrollo de un Sistema de Comunicaciones Ópticas Clásicas en Espacio Libre con Aplicación en Comunicaciones Cuánticas*. Obtenido de Nova scientia vol.6 no.12 León oct. 2014: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052014000200013
- Barrami, F., LeGuennec, Y., Novakov, E., & Busson, P. (2014). *An optical power efficient asymmetrically companded DCO-OFDM for IM/DD systems*. Obtenido de 23rd Wireless and Optical Communication Conference (WOCC): <https://ieeexplore.ieee.org/document/6839934>
- Caizaluisa, E. (2008). *Diseño de una red con tecnología láser free space optics (FSO), para el campus de la Escuela Politécnica Nacional y su compración con la red de fibra óptica*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- De los Ángeles, J. (2014). *Estudio y simulación de un sistema ACO-OFDM para comunicaciones ópticas inalámbricas*. Sevilla: Universidad de Sevilla. Obtenido de). Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12198>
- Khan, I., & Hossain, R. (2017). *Effectiveness of LED index modulation and non DC biased OFDM for optical wireless communication*. Obtenido de IEEE International Conference on Telecommunications and Photonics (ICTP): <https://ieeexplore.ieee.org/document/8285935/authors#authors>

- Khwandah, S., Cosmas, J., Glover, I., Lazaridi, P., Prasad, N., & Zaharis, Z. (2015). *Direct and External Intensity Modulation in OFDM RoF Links*. Obtenido de IEEE Photonics Journal (Volume: 7 , Issue: 4 , Aug. 2015): <https://ieeexplore.ieee.org/document/7158985>
- Li, J., Bai, Z., Yang, Y., Pang, K., Sun, S., Han, T., & Kwak, K. (2018). *Performance Analysis of MIMO CO-OFDM FSO System under Joint Effect Channel*. Obtenido de 18th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT): <https://ieeexplore.ieee.org/document/8587959>
- Li, Y., Tsonev, D., & Haas, H. (2013). *Non-DC-biased OFDM with Optical Spatial Modulation*. Obtenido de 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC): <https://ieeexplore.ieee.org/document/6666185/authors#authors>
- Lobatón, M. (2005). *Que es FSO (Free Space Optics)*. Obtenido de <https://www.oocities.org/es/cedenolx/tenlae/fso/resumen.htm>
- López, A. (2015). *Diseño e implementación de un prototipo de comunicación de luz visible (VLC)*. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.
- Macho, A. (2012). *Estudio y Caracterización de un Modulador Electroóptico Mach-Zehnder*. Obtenido de Archivodigital UPM: <http://oa.upm.es/cgi/export/32771/>
- Masero, V. (2014). *Evaluación de la modulación OFDM en sistemas de comunicaciones ópticas*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Muriel, M. (2018). *Coherent Detection*. Obtenido de Archivo Digital UPM: <http://oa.upm.es/49607/>
- Murillo, J. (2012). *Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación (2da ed.)* (2da ed.). Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Peñafiel, B. (2017). *Simulación de la transmisión de información a través fibra óptica con modulación 16-QAM a una distancia de 10km y*

tasa de transmisión de 20Gbps. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.

Peñaherrera, E. (2014). *Modelización del diodo led, diseño y construcción de la interfaz del transmisor y receptor para un sistema de comunicación de luz visible mediante un diodo de luz blanca*.

Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana.

Pérez, G. (sf). *Espectro electromagnético*. Obtenido de ESPECTROMETRIA.COM:

https://www.espectrometria.com/espectro_electromagnetico

Sánchez, D. (2017). *Simulación de la respuesta impulsiva en canales FSO*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Smith, S. (1999). *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. San Diego: California Technical Publishing.

Srikanth, S., Sriram, P., & Sriram, D. (2015). *Performance analysis of OFDM employing free space optical communication system*.

Obtenido de 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS):

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7125002/authors#authors>

Suárez, J. (2014). *Técnicas de transmisión óptica en el espacio libre (FSO) : fundamentos teóricos, tecnologías y aplicación*. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Van de Beek, J. (1998). *Synchronization and Channel Estimation in OFDM Systems*. Obtenido de Universitetstryckeriet, Luleå.:

<http://www.sm.luth.se/csee/sp/research/thesis/bee98t.pdf>

Zhang, X., Dimitrov, S., & Sinanovic, S. (2012). *Optimal Power Allocation in Spatial Modulation OFDM for Visible Light Communications*.

Obtenido de IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring): <https://ieeexplore.ieee.org/document/6239965>

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Jesús Estuardo Peñafiel Peñafiel**, con C.C: # **0301580965** autor/a del trabajo de titulación: **Diseño de un Sistema Múltiples Entradas Múltiples Salidas para comunicaciones ópticas en espacio libre (FSO) como alternativa en los enlaces inalámbricos de última milla**, previo a la obtención del título de **Magíster en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, a los 11 días del mes de agosto del 2020



Jesús Estuardo Peñafiel Peñafiel

C.C: 0301580965



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA		
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN		
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Diseño de un Sistema Múltiples Entradas Múltiples Salidas para comunicaciones ópticas en espacio libre (FSO) como alternativa en los enlaces inalámbricos de última milla	
AUTOR(ES)	Jesús Estuardo Peñafiel Peñafiel	
REVISOR(ES)/TUTOR	MSc. Edgar Quezada Calle; MSc. Luis Córdova Rivadeneira / MSc. Manuel Romero Paz	
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	
FACULTAD:	Sistema de Posgrado	
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones	
TITULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones	
FECHA DE PUBLICACIÓN:	Guayaquil, a los 11 días del mes de agosto del 2020	No. DE PÁGINAS: 79
ÁREAS TEMÁTICAS:	Comunicaciones Ópticas Inalámbricas, Sistemas FSO, Espectro Electromagnético, Comunicaciones Luz Visible, Comunicaciones Ópticas en el espacio Libre, Modulación Óptica	
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Sistema, MIMO-FSO, Canal FSO, Microondas, Infrarrojo, Li-Fi	
RESUMEN/ABSTRACT:	La creciente demanda en el uso de Internet, la necesidad por acceder a un servicio de buena calidad en lugares donde muchas veces el acceso es limitado, hace mirar a las Comunicaciones Ópticas en el espacio libre como una alternativa, el presente trabajo analiza los fundamentos teóricos de estos sistemas, para luego elaborar un diseño, el mismo que consta de dos modelos, uno con modulación óptica interna y otro con modulación óptica externa. Para ejecutar el diseño y evaluar el rendimiento se utiliza el software Matlab realizando de esta manera pruebas con diferentes señales y en diferentes escenarios, el software Optisystem 16 permite simular un canal FSO, donde se puede variar: distancia, atenuación, pérdidas entre otro, de esta manera evaluar cómo se comporta ante estas perturbaciones y determinar eficiencia de estos sistemas o indicar los parámetros a cambiar para mejorar la misma. Para esta investigación se trabajará los métodos de análisis, síntesis y modelación, para de esta manera determinar la eficiencia del sistema.	
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO AUTOR/ES:	Teléfono: +593-995791338	E-mail: penafieljesus6@gmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Romero Paz Manuel de Jesús	
	Teléfono: +593-994606932	
	E-mail: manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA		
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		

