

Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño
Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



Uso de Múltiples Subportadoras en Comunicaciones Ópticas Inalámbricas

TESIS

que se presenta para cubrir el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Alfredo Rodríguez Murillo

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Juan de Dios Sánchez López

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD ENSENADA

**Uso de múltiples subportadoras en comunicaciones ópticas
inalámbricas**

TESIS

Que para obtener el grado de maestría en ingeniería presenta:

Alfredo Rodríguez Murillo

Aprobada por:



Dr. Juan de Dios Sánchez López
Director de tesis



Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas
Miembro del comité



Dr. Juan Iván Nieto Hipólito
Miembro del comité



Dra. Mabel Vázquez Briseño
Miembro del comité



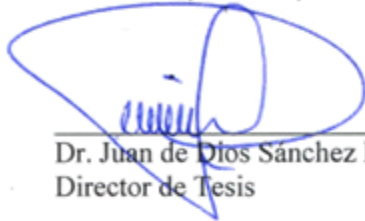
Dr. Humberto Cervantes de Ávila
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. Diciembre de 2017

Resumen de la tesis de **ALFREDO RODRIGUEZ MURILLO**, presentada como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA del programa Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MyDCI) de la UABC. Ensenada, Baja California, diciembre de 2017

“Uso de Múltiples Subportadoras en Comunicaciones Ópticas Inalámbricas”

Resumen Aprobado por



Dr. Juan de Dios Sánchez López
Director de Tesis

El presente trabajo muestra el análisis cualitativo y descriptivo de un sistema de comunicaciones ópticas inalámbrico basado en el uso de subportadoras ópticas, el cual tiene como objetivo de desarrollar una metodología y un entendimiento del mismo que permita su implementación para usos didácticos y de investigación, así como la evaluación de esta tipo de sistema de comunicaciones. El sistema utiliza la técnica de Multicanalización por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) el cual se basa en el empleo la transformada de Fourier Rápida y su inversa (FFT/IFFT) para generar las frecuencias ortogonales lo cual ocurre en el dominio digital. Estas subportadoras son a su vez trasladadas a la radiofrecuencia para modular en intensidad un haz láser el cual es usado como portadora óptica. Se aprecia buen desempeño para órdenes de modulación digital de la subportadora menores de 8 (8PSK/8QAM) para valores de índice de cintilación ≤ 0.3 .

Palabras clave: OFDM, Frecuencias ortogonales, subportadoras, Comunicaciones ópticas inalámbricas, Transformada de Fourier Rápida.

Ensenada, Baja California, Diciembre de 2017

Dedicatoria

A las personas más importantes en mi vida.

Mi familia, mi novia y mis amigos.

Sin su apoyo incondicional no llegaría tan lejos.

Uno a uno, todos somos mortales. Juntos, somos eternos.

—Apuleyo

Agradecimientos

Al Dr. Juan de Dios Sánchez López, por guiarme en el mejor camino para mi desarrollo en esta obtención de grado.

A mis maestros, por enseñarme nuevos conocimientos.

A los miembros de comité, por su retroalimentación y tiempo para dar revisión a mi trabajo.

El que lee mucho y anda mucho, ve mucho y sabe mucho.

—*Miguel de Cervantes Saavedra.*

Contenido

CAPITULO I	10
I.1 Introducción.....	10
I.2 Antecedentes.....	12
I.3 Hipótesis	15
I.4 Objetivos.....	15
I.4.1 Objetivo general.....	15
I.4.2 Objetivos específicos.....	16
I.5 Importancia del estudio	16
I.6 Estructura de capítulos.....	17
CAPÍTULO II	19
II. TÉCNICAS DE MODULACIÓN MULTIPORTADORAS	19
II.1 Fundamentos de los sistemas de portadoras múltiples.....	19
II.2 DFT	26
II.3 FFT/IFFT	29
II.4 Extensión cíclica	30
CAPITULO III	32
CANAL ÓPTICO INALÁMBRICO O NO GUIADO	32
III.1 TIPO DE CANAL	32
III.1.1 Turbulencia atmosférica	32
III.1.2 Fluctuaciones del índice de refracción.....	34
Capitulo IV	37
OFDM en Comunicaciones Ópticas Inalámbricas con Modulación de Intensidad por Subportadoras	37
IV.1 Introducción.....	37
IV.2 Sistemas de comunicaciones ópticas	37
IV.3 Sistemas de comunicaciones ópticas modulados en intensidad y detección directa	38
IV.4 Modulación de intensidad por medio de subportadoras moduladas por OFDM MPSK/MQAM	39

Capítulo V	44
SIMULACIÓN Y RESULTADOS.....	44
V.1 Introducción	44
Capítulo VI	59
Conclusiones y observaciones.....	59
VI.1 Conclusiones	59
VI.2 Trabajo futuro.....	60
Bibliografía	62

CAPITULO I

I.1 Introducción

Las telecomunicaciones han sido un gran auge para poder comunicar a dos o más personas que relativamente se encuentran alejadas una de otra. Medios como la televisión, la radio, el telégrafo, el teléfono (incluyendo la telefonía móvil) y el internet han mantenido en profunda comunicación e información a cada persona que tiene acceso a uno o todos los medios anteriormente mencionados, facilitando con ello la íntegra transferencia de información entre dos o más puntos. Las comunicaciones ópticas, a comparación de los medios previamente mencionados, han venido siendo utilizados desde hace siglos atrás, un claro ejemplo son las señales de humo que los antiguos nativos de Norteamérica utilizaban para informar a otros sobre un posible peligro o cualquier otro tipo de información, aunque historiadores describen que este tipo de comunicación es aún más antiguo. Así mismo, el uso de espejos reflectores para poder comunicarse entre embarcaciones en la Europa antigua también fue un medio de comunicaciones ópticas, aún más antiguo que las señales de humo.

En la actualidad, las comunicaciones ópticas han venido evolucionando desde la invención del fotófono en 1880 por Alexander Graham Bell [1]; este aparato transformaba la voz en pulsos de luz, auxiliado por espejos y la luz solar, y los enviaba a una corta distancia. A pesar de ser un sistema nuevo y conceptualmente correcto, no fue realmente implementado debido a la falta de fuentes de luz adecuadas con la que trabaja el sistema, creando pérdidas o mala comunicación entre el transmisor y receptor, y a consecuencia de ello, la idea fue abandonada tiempo después. Tuvo que

pasar poco más de medio siglo, cuando en 1953, el físico y profesor Charles Hard Townes [1], quien con ayuda de diversos estudiantes de posgrado y basados en los fundamentos para el desarrollo de estos dispositivos propuestos por Albert Einstein, crearon el primer concepto del láser, el máser, el cual, a diferencia del primero, este trabajaba en la región de las microondas. El primer láser construido fue fabricado y patentado por Theodore Maiman, aproximadamente siete años después.

Desde la invención del láser, la tecnología óptica ha venido creciendo día con día; la implementación del láser en el área de las comunicaciones y telecomunicaciones le dio a los científicos e ingenieros a retomar la aplicación del uso de la luz para transmitir información, y durante su estudio e implementación, dieron lugar a nuevas tecnologías e innovaciones tales como la fibra óptica y el uso de nuevos materiales para la fabricación de mejores láseres. El láser ha sido el siguiente gran paso para la transmisión de grandes cantidades de datos a mayores velocidades que cualquier otro medio.

En tiempos modernos, la implementación de las tecnologías ópticas para las telecomunicaciones se han beneficiado en la reducción en sus costos debido a que los materiales utilizados también han reducido sus costos para su fabricación, volviéndolos más accesibles y con ello poder ser una opción óptima y de gran fidelidad para tener un medio de comunicación y transferencia de datos a gran velocidad.

Las comunicaciones ópticas inalámbricas han venido creciendo prácticamente a la par de las comunicaciones ópticas desde el desarrollo del láser, los primeros registros en donde fueron implementados los sistemas de COI datan de los años de 1980 en base a

desarrollos militares de comunicación con mayor seguridad para la intercomunicación entre embarcaciones e intercomunicación de aeronaves con el suelo.

En su mayoría, este tipo de sistemas de comunicación contaban con las siguientes características [1]:

- Su diseño fue hecho para intercomunicación a largas distancias (entre 50 y 1000 *km*).
- Utilizaban ya sea láseres de alto poder ($1 - 200 W$) de CO_2 de $10\mu m$ de longitud de onda, láser Nd-YAG de $1.06\mu m$, láser GaAs de $0.85\mu m$ o láser diodo/amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA) de $1.5\mu m$.
- Se implicaban en sistemas complejos de rastreo, receptores de detección múltiple u óptica adaptativa para compensar la turbulencia atmosférica.
- No siempre se consideraban seguros para la vista.

Este tipo de sistemas, además del estudio de los comportamientos del láser en un canal atmosférico, han dado lugar a un sinnúmero de adelantos en diversos campos de estudio en los campos de propagación de señales por medios ópticos, procesamiento de señales y tecnologías de detección, permitiendo un gran aumento en el desarrollo de las COI comerciales.

I.2 Antecedentes.

En los últimos años, el crecimiento comercial y el uso de las comunicaciones ópticas inalámbricas (COI) han crecido exponencialmente, esto debido al gran potencial

que esta tecnología puede ofrecer, tales como una gran capacidad, excelente seguridad, gran transferencia de datos, de fácil y económica instalación, sus extremadamente grandes anchos de banda ($\sim 0.1 - 1 \text{ Gbit/s}$ o más), el carente uso de licencias para la utilización de su espectro y otras características más que resultan ser mucho más atractivas que las tecnologías inalámbricas de radiofrecuencia (RF) [1]–[3]. Estos últimos, en su mayoría, auxiliados con módems inalámbricos, pueden conectar hasta treinta usuarios “ligeros” (e-mail, acceso a la red, etc.), compartiendo el ancho de banda entre cada uno de los usuarios, sin embargo, la conectividad puede degradarse si uno o varios usuarios realiza una transferencia de archivos, un video streaming o inclusive si se conecta por medio de un videojuego [1]. En estos casos, la implementación de un sistema de comunicaciones ópticas inalámbricas resulta una solución tecnológica óptima, debido a que la tecnología óptica solo puede ofrecerle tal demanda de ancho de banda.

Existen diversas alternativas de solución para el problema de la “última milla”, las cuales se basan en tres tipos de tecnologías de transmisión: cable de cobre, enlaces de radiofrecuencia (RF) y enlaces ópticos inalámbricos.

La ventaja principal que cuentan las comunicaciones ópticas es el incremento potencial en la tasa de transferencia de información, el cual está directamente relacionado con el ancho de banda de la portadora modulada, la cual está limitada generalmente a una fracción fija de la propia portadora [4].

Una segunda ventaja al utilizar las comunicaciones ópticas es la compactación de sus estaciones. Una antena óptica de 6 pulgadas de diámetro para el uso de un sistema óptico con una frecuencia de $6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ tiene una ganancia efectiva de 122 dB ,

mientras que un sistema RF de 1 GHz requeriría una antena de un diámetro mayor a 200 pies para generar alrededor de 60 dB [4].

Gracias a estas ventajas, las COI pueden adaptar muy altas transferencias de datos de más de 100 GHz, y mientras las tecnologías ópticas maduran, los sistemas COI pueden realizarse con mayor arquitectura.

En la tabla 1 se hace una comparación de las diferentes tecnologías de acceso, donde se puede observar que las tecnologías de transmisión que presentan más afinidad a los sistemas de fibra óptica en relación a su velocidad de transmisión de bit son los sistemas de ondas milimétricas y los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricos.

Tabla 1. Comparación entre tecnologías de acceso de banda ancha

Tecnología de acceso:	Tasa de transmisión:	Distancia límite: (típicas)	Comentarios:
Fibra óptica.	10 Gbps por longitud de onda.	Hasta 100 km sin Regeneración.	Distancias interoceánicas con regeneración.
DS.	1 a 100 Mbps (Asimétrico).	6 km.	Compromiso entre velocidad y distancia.
Cable-modem	1 a 10 Mbps.	10 km con amplificadores.	Compromiso entre velocidad y distancia.
Wi-Fi.	54 Mbps (A, C).	100 m.	Compromiso entre velocidad y distancia.

Microondas.	75 Mbps(A, C).	50 km.	Punto a punto y en red.
Óndas milimétricas.	1.55 Mbps a 1.25 Gbps.	5 km (155Mbps) 10 km (1.25Gbps).	Punto a punto y en Red. Complemento de sistemas ópticos inalámbricos.

I.3 Hipótesis

Es posible habilitar un enlace de comunicaciones ópticas inalámbricas mediante la implementación de un conjunto de técnicas tales como modulación de multiportadoras ortogonales combinado con modulaciones de multinivel. Existe una combinación de parámetros que permita la implementación de OFDM en sistemas COI que sea balanceada en cuanto a la complejidad de implementación y desempeño para un canal óptico afectado por turbulencia atmosférica.

I.4 Objetivos.

I.4.1 Objetivo general.

- En base un estudio preliminar, diseñar un subsistema de codificación-decodificación de canal, las cuales se utilizarán en conjunto con otras estrategias para mejorar el desempeño de los sistemas de comunicaciones ópticas, tales como uso de subportadoras y diversidad espacial.

I.4.2 Objetivos específicos.

- Estudio y manejo de componentes optoelectrónicos, ópticos y electrónicos.
- Análisis del estado de la técnica.
- Determinar la interacción del láser con el canal atmosférico.
- Diseñar el arreglo o estructura del receptor para comunicaciones ópticas inalámbricas.
- Proponer y desarrollar, las diferentes etapas del transmisor.
- Implementar la estructura del receptor para comunicaciones ópticas inalámbricas.
- Probar y validar, el receptor para comunicaciones ópticas inalámbricas.

I.5 Importancia del estudio

Los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas (COI) son una opción donde la red de fibra óptica no es viable (económicamente, físicamente y reglamentariamente). Por su naturaleza, no son susceptibles a ser interceptadas, lo que las hace un medio seguro de comunicaciones. Por otro lado el no requerir licencias los hace económicos y rápidos de instalar, permitiendo establecer las comunicaciones rápidamente en lugares donde han ocurrido desastres y además puede ser opción para los centros de población suburbanos mientras se justifique el uso de fibra óptica.

La región fronteriza de Baja California, por largo tiempo se ha especializado en la fabricación de equipo y artefactos electrónicos, y en la última década han surgido

empresas que desarrollan tecnología. En este marco, con los resultados de esta investigación y con el apoyo financiero de organismos de fomento nacional, se pudiera impulsar la creación de una (o varias) empresas.

Los sistemas COI sirven para transmitir datos a alta velocidad, y su implementación resulta práctica en lugares donde no se justifica la instalación de fibra óptica. También pueden utilizarse como enlaces de respaldo o enlaces temporales.

Este tipo de sistemas se puede emplear en lugares donde resulta caro implementar sistemas de fibra óptica, resultan beneficiadas las personas que requieran este tipo de comunicaciones y países emergentes. El costo de las comunicaciones ópticas inalámbricas es en promedio de alrededor del 10% del costo de un sistema de fibra óptica. Se requiere además de solo unas cuantas horas para su instalación, en resumen, los sistemas de COI pueden ser utilizados por todos los sectores de la sociedad en especial los de bajos recursos.

I.6 Estructura de capítulos.

A continuación se describirá de forma breve en que consiste cada capítulo de esta tesis, para darle al lector una idea sobre una idea general sobre él.

En el capítulo II se mencionan los principios básicos sobre la modulación multi-portadoras, sus características, sus ventajas y desventajas y parámetros de interés para su implementación en diversos tipos de comunicaciones, haciendo énfasis en las comunicaciones ópticas. Se analizan diversas técnicas, sin embargo, se hace mayor

énfasis en la técnica de modulación OFDM (*Ortogonal Frequency-Division Multiplexing*).

En el capítulo III se comentará sobre el canal atmosférico y su interacción con las señales ópticas. Se mencionan sus características, problemas asociados con las comunicaciones ópticas inalámbricas (COI) y algunos modelos útiles para el empleo en el análisis en este tipo de sistemas de comunicaciones.

En el capítulo IV se abordará la implementación de modulador y demodulador a OFDM y otros elementos del sistema a nivel simulación de acuerdo a un esquema propuesto.

En los capítulos V y VI se presentan los resultados correspondientes a la simulación, además de la conclusión a la que se ha llegado a lo largo de este trabajo de tesis. Asimismo se comentan algunas consideraciones para futuros trabajos.

CAPÍTULO II

II. TÉCNICAS DE MODULACIÓN MULTIPORTADORAS

II.1 Fundamentos de los sistemas de portadoras múltiples

El concepto de transmisión multi-portadora es atractivo como un medio efectivo de incrementar la tasa de transmisión de datos al usar diversas portadoras paralelas cada una portando relativamente una lenta tasa de datos. Es un concepto viejo que comenzó en la forma de multiplexación de subportadoras (SCM o *Sub Carrier Modulation*), pero con el espaciado de subportadora a más de la tasa de símbolos múltiple [5]. No obstante, recientemente las técnicas de modulación por múltiples portadoras ha llamado bastante la atención en diversos campos, tales como sistemas de comunicación eléctrica y radiofrecuencia (RF) cableados e inalámbricos, comunicaciones por fibra óptica, comunicaciones ópticas inalámbricas, entre otros [6]. Los sistemas de modulación por múltiples subportadoras (MSM) permiten a múltiples usuarios simultáneos del canal mediante la asignación de las subportadoras a usuarios individuales (i.e. multiplexación por división de frecuencias), y, con ello, los receptores no necesitan procesar la tasa de enlace agregado [7]. En los sistemas de comunicaciones clásicos de una sola portadora única, el período de símbolo debe ser mucho mayor que el tiempo de retardo de transmisión para evitar la interferencia entre símbolos (ISI, del inglés *Inter-Symbol Interference*) [8].

Ya que la velocidad de datos es inversamente proporcional al período del símbolo, con períodos de símbolos de larga duración significará una baja velocidad de datos e ineficiencia de comunicación. Un sistema multiportadora, como FDM (del inglés, *Frequency Division Multiplexing* o Multiplexación por División de Frecuencias), divide el ancho de banda total disponible en el espectro en sub-bandas para que múltiples portadores transmitan en paralelo [8]. Es posible lograr una velocidad de datos alta al ubicar a los espectros de las portadoras lo más cercano posible. Sin embargo, la interferencia entre portadoras (ICI, del inglés: *Inter-Carrier Interference*) ocurrirá debido a la falta de espacio para separar los portadores. Para evitar la interferencia entre portadoras, se deberán colocar bandas de guarda en entre portadoras adyacentes, lo que resulta en una velocidad de datos baja [9].

Entre todas las técnicas de comunicación de múltiples portadoras, la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) es muy reconocida y ha sido bastante adoptada en diferentes estándares de comunicación por radiofrecuencia [5], [10]. Combina una gran cantidad de portadores de baja velocidad de datos para construir un sistema de comunicación compuesto de alta velocidad de datos. La ortogonalidad brinda a las portadoras una razón válida para estar estrechamente espaciados, incluso superpuestos, sin interferencia entre ellas. La baja velocidad de datos de cada sub-portadora implica un símbolo largo períodos, lo que disminuye en gran medida la interferencia entre símbolos [8]. Desde su invención en 1960 y la subsecuente realización eficiente de las transformadas discretas de Fourier (DFT), esta emergió como un formato de modulación efectivo para combatir la interferencia inter-simbólica (ISI) de las multi-trayecto u otros efectos dispersivos [5]. OFDM (*Orthogonal Frequency*

División Multiplexing) es una forma especial de modulación de múltiples portadoras el cual está particularmente adaptado para la transmisión sobre un canal dispersivo, donde una única corriente portadora de información se transmite por muchos subcanales de tasa menor [11]. Aquí las diferentes portadoras son ortogonales una de la otra, esto es, que son totalmente independientes una de la otra. OFDM es un esquema de modulación de banda ancha que está diseñado para enfrentar los problemas de la recepción multi-trayecto. Esencialmente, el canal dispersivo de frecuencia selectiva de ancho de banda es dividido en diversos subcanales de banda angosta [12].

La técnica de modulación de OFDM ha sido empleada extensivamente en diversos estándares de sistemas de comunicaciones tales como en algunas variantes de WiFi (IEEE 802.11), transmisión de TV y audio digital, DSL (Digital Subscriber Line), etc. Las técnicas de modulación de los que tenemos mayor conocimiento son los sistemas de modulación de una sola portadora (SCM: *Single Carrier Modulation*), en los cuales una sola portadora senoidal es la que transporta los bits o una combinación de éstos (símbolos) en alguno de sus grados de libertad o parámetros (amplitud, fase, frecuencia, combinación de los anteriores, etc.). OFDM es referido como multiportadora, multi-tono y transformada de Fourier. El concepto de OFDM está basado en el esparcimiento de los datos transmitidos sobre un largo número de portadoras, cada una siendo modulada a una tasa baja y las portadoras se vuelven ortogonales de cada una al apropiadamente elegir el espaciado de frecuencia entre ellas. Un sistema multiportadora, tal como FDM, divide el total de ancho de banda disponible en el espectro en subbandas para múltiples portadoras para transmitir en

paralelo [13]. A velocidades altas de transmisión de bits, el sistema de comunicaciones es más propenso a sufrir errores de bit debido a diferentes fenómenos debido a la reducción del tiempo o duración de bit (este es inversamente proporcional a la tasa de transmisión), lo cual reduce la energía e incrementa el ancho de banda de la señal. Desde los comienzos de 1990, OFDM y su variante, los multi-tonos discretos (*Discrete Multi-tones* o DMT), han sido ampliamente empleados en numerosos estándares de transmisión inalámbricos y cableados [5].

OFDM utiliza algoritmos de la transformada rápida de Fourier (FFT) para su modulación y demodulación, y no requiere ecualización [11], [14]. Al mismo tiempo, provee alta eficiencia espectral. Estas características, junto con su inmunidad al error de ráfaga debido a las fluctuaciones de intensidad vuelven a OFDM un candidato interesante para las COI.

Por otro lado, los sistemas de Multicanalización por División de Frecuencias Múltiples, como su nombre lo indica, usan varias portadoras en un solo canal, la información enviada es dividida entre varias de las sub-portadoras. El sistema analógico de transmisión de televisión analógica NTSC y la radio FM multiplex son ejemplos de lo anterior. Los datos enviados no tienen que ser divididos proporcionalmente entre las sub-portadoras, e inclusive pudieran ser de diferentes fuentes de información. Los sistemas FDM, requieren de un espacio entre bandas de las subportadoras para prevenir interferencia de sus espectros, lo que reduce el ancho de banda eficaz del sistema (expresado bit/s/Hz).

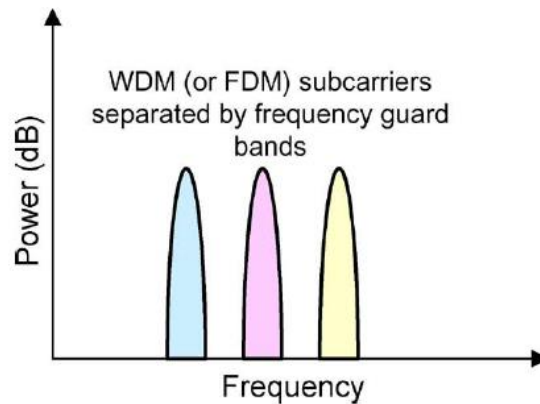


Figura 1: Señal modulada en FDM, donde se muestra el intervalo de guarda entre cada portadora, ensanchando el espectro y desperdiciando ancho de banda.

La reducción del ancho de banda total ocupado por la portadoras múltiples puede ser aplicado si se utilizan sub-portadoras que sean ortogonales entre sí. Se dice que dos señales son ortogonales si su producto punto es cero en el caso determinístico o en el caso estocástico si dos procesos son no correlacionados. Es conocido de la teoría de las señales y sistemas que las senoidales que componen la Transformada de Fourier Discreta de una señal es un conjunto base ortogonal. En esto se basa OFDM para transformar o mapear la señal de entrada en un conjunto de sub-portadoras ortogonales. En el receptor el proceso es realizado en forma inversa (IFFT).

Una de las características centrales que mantiene a OFDM aparte de las modulaciones de una sola portadora es la unicidad del procesamiento de señal [15], a la vez que provee gran capacidad de datos, transmisiones seguras, altas velocidades y fácil actualización [16].

Para entender la operación de OFDM, es esencial entender el concepto de ortogonalidad.

Ortogonalidad se define tanto para funciones de valor real y de valor complejo. Como se muestra en la ec. 1, las dos funciones $a_m^*(t)$ y $a_n(t)$ se dice que son ortogonales una con respecto a la otra sobre el intervalo $a < t < b$ si satisfacen la condición:

$$\int_a^b a_m^*(t)a_n(t)dt = 0, \quad n \neq m \tag{1}$$

Ortogonalidad también se define cuando las dos señales coexistentes son independientes una de la otra en un intervalo de tiempo específico y no interactúan una con la otra. Esto es alcanzado prácticamente con ayuda de la técnica de la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT). Ortogonalidad es una propiedad que permite que múltiples señales de información sean transmitidas perfectamente sobre un canal común, de este modo haciendo una mejor utilización del espectro. La ortogonalidad de las subportadoras es crucial para el sistema OFDM. Si la ortogonalidad se destruye, el receptor tendrá una seria tasa de error de bit (BER) debido al ICI [17].

OFDM tiene un potencial inmenso para mitigar el desvanecimiento por trayectos múltiples debido a las turbulencias atmosféricas en las COI mientras los datos se distribuyen en un gran número de portadoras ortogonales que están suficientemente espaciadas a frecuencias estrechas con bandas superpuestas.

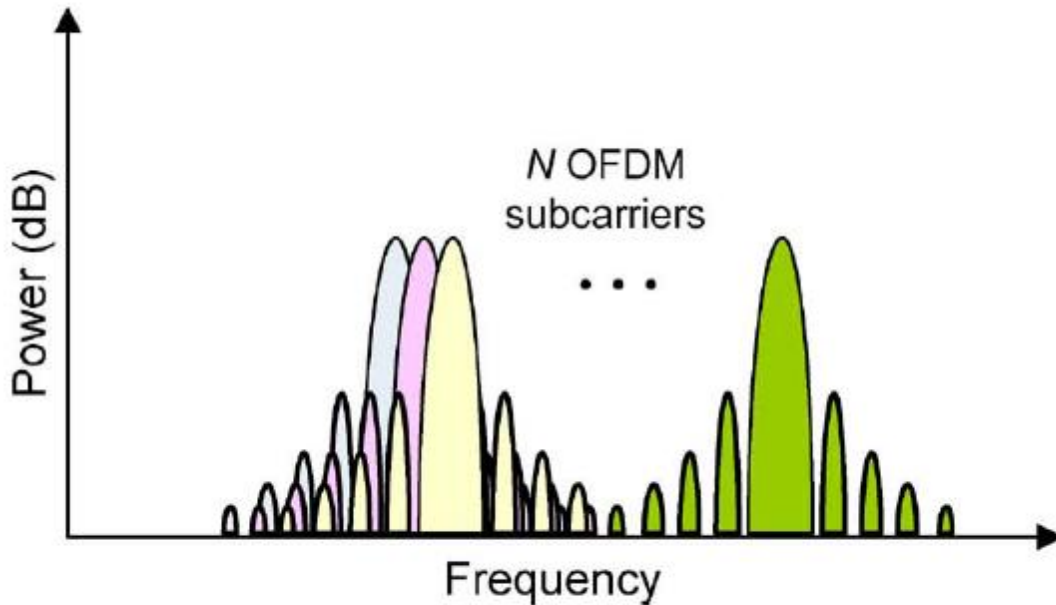


Figura 2: Espectro de una señal OFDM con N subportadoras.

En la figura se muestra una serie subportadoras que se superponen, pero debido a su ortogonalidad, la señal puede ser demodulada sin interferencia. Cada portadora en una señal OFDM tiene un ancho de banda muy angosto así la tasa de símbolo resultante es baja lo que significa que la señal tiene alta tolerancia a la propagación de retraso multitrayecto reduciendo la posibilidad de interferencia intersímbolo (ISI), la cual es el requerimiento para los sistemas de comunicaciones hoy en día [18].

OFDM es una técnica inalámbrica digital de comunicaciones de banda ancha que está basada en modulación de bloques. Se le conoce como modulación en bloques porque la estructura OFDM se separa en bloques y cada bloque tiene una duración T_s . Estos bloques contienen uno o más símbolos. Cada símbolo o grupo de símbolos será asignado a una portadora separada. OFDM acomoda las subportadoras en una forma que estos no se traslapan y mantienen la ortogonalidad entre ellas. Estas subportadoras son moduladas independientemente. Toda la información separada es

ahora transmitida en paralelo a través de múltiples portadoras. En OFDM las portadoras pueden ser colocadas tan cerca como sea posible manteniendo la ortogonalidad, de este modo haciendo una mejor utilización del espectro. El ancho del pulso coloca el límite en el espaciamiento de la subportadora. El espaciamiento de la subportadora será inversamente proporcional a la duración de símbolo, donde la duración de símbolo se denota por T_s . Mientras más larga sea la duración de símbolo, mejor será el desempeño [17].

II.2 DFT

La transformada de Fourier es una herramienta poderosa en la solución de sistemas lineales, incluyendo:

- Ecuaciones diferenciales ordinarias heterogéneas (respuesta en frecuencia, respuesta al impulso).
- Ecuaciones diferenciales parciales heterogéneas (dispersión, difracción, difusión).
- Ecuaciones de integrales lineales (deconvolución, tomografía).

Todas estas aplicaciones pueden ser realizadas de forma numérica en cuadrículas coordinadas en una o más dimensiones usando la transformada discreta de Fourier (DFT), típicamente implementada como la transformada rápida de Fourier (FFT). En adición a las anteriores aplicaciones, la FFT ofrece una aproximación

computacionalmente eficiente a una amplia gama de señales y tareas de procesamiento de imágenes y de señales [19]:

- Estimación de potencia espectral.
- Interpolación ideal de series e imágenes en el tiempo.
- Filtrado digital.
- Algoritmos de compresión.

La transformada discreta de Fourier (DFT) es una transformación lineal de un vector x_n (las muestras de señales en el dominio del tiempo) al vector X_m (el conjunto de coeficientes de componentes sinusoides de la señal en el dominio del tiempo) usando:

$$X_m = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \omega^{nm}$$

(2)

Donde N es el tamaño de los vectores, $\omega = e^{2i\pi/N}$ son las “raíces de unidad” (conocidas también como *twiddle factors*), con valores de m de $0 \leq m < N$ [20].

Durante el cálculo de la DFT, la computación de N -puntos de esta serán calculados uno por uno para cada punto.

Una sumatoria en fuerza bruta requiere un orden de N^2 operaciones para computar.

Esto rápidamente se vuelve intratable a medida que el número de muestras se vuelve

mayor [20]. Una buena táctica para poder aminorar el problema de operaciones para computar es el dividir de manera recursiva la sumatoria (2) de la siguiente manera:

$$X_m = \sum_{n=0}^{N/2-1} x_n \omega^{nm} + \omega^{mN/2} \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{n+N/2} \omega^{nm} \quad (3)$$

O de esta manera:

$$X_m = \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n} \omega^{2nm} + \omega^m \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n+1} \omega^{2nm} \quad (4)$$

En (3) y (4) se puede observar que cualquier DFT puede ser construida partiendo de la suma de dos DFT más pequeñas, ahorrándonos un costo computacional proporcional a $N \log_2 N$. No obstante, se debe trabajar con tamaños de vector que sean potencias de dos [20], [21].

Las expresiones anteriores no son más que dos de los tipos de descomposición más conocidos llamados división por decimación en frecuencia (3) y división por decimación en tiempo (4). La decimación en frecuencia (DIF) comienza con una entrada de orden normal y genera una salida de orden de bits inversa, mientras que la decimación en tiempo (DIT) comienza con una entrada de orden de bits en reversa y genera una salida de orden normal [22].

II.3 FFT/IFFT

La transformada rápida de Fourier (FFT) es un algoritmo eficiente para computar la transformada discreta de Fourier (DFT) y requiere un número menor de computaciones que la evaluación directa de la DFT. Desde que las comunicaciones digitales son campos bastante activos, la complejidad del algoritmo de la transformada discreta de Fourier (DFT) se ha vuelto un factor significativo en el impacto de los costos computacionales globales. En lugar de la implementación directa de la ecuación (2), el algoritmo FFT factoriza recursivamente una DFT de punto largo en diversas DFT de punto pequeño para poder reducir todas las operaciones [22]. La FFT e IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) son los bloques principales en un sistema OFDM [17], [23].

IFFT es utilizada para generar símbolos OFDM. Esta convierte las señales del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo y se utiliza en el transmisor para encargarse de este proceso de conversión.

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X_m \omega^{-nm}$$

(5)

Comparando esta ecuación con la ecuación (1), se puede apreciar que los cambios que se han incorporado en la ecuación IFFT han sido al agregar un factor de escalamiento de $1/N$ y reemplazando el valor de la raíz de unidad (*twiddle factor*) ω^{nm} con su complejo conjugado ω^{-nm} [23].

La transformada rápida de Fourier inversa correlaciona los datos de entrada en el dominio de la frecuencia con sus funciones base ortogonales, que son sinusoides a ciertas frecuencias. Esta correlación es equivalente al mapeo de los datos de entrada en sus funciones bases sinusoidales. Esto provee una completa configuración de espectro. La FFT e IFFT son los bloques más importantes en el sistema OFDM y sus rendimientos tienen un gran efecto sobre todo el sistema. IFFT incrementa la velocidad de procesamiento y disminuye la complejidad computacional. IFFT escala la potencia de la señal hacia abajo por IFFT de tamaño N , así que degrada la tasa de error de bit (BER). Por lo tanto, para mejorar la potencia BER se utiliza un bloque de escalamiento [17].

II.4 Extensión cíclica

Los sistemas OFDM convencionales evitan la ecualización temporal por completo utilizando un intervalo de guarda entre sus bloques para mitigar o eliminar la interferencia inter-símbolo (ISI) y la interferencia inter-portadora (del inglés: *Inter-Carrier Interference, ICI*). Dicho intervalo de guarda, conocido como extensión cíclica o prefijo cíclico (del inglés: *Cyclic Prefix, CP*), además de mitigar la ISI e ICI, ayuda a preservar la ortogonalidad entre las subportadoras [24], [25]. El CP es una copia de las últimas N muestras de la IFFT, las cuales se colocan al comienzo del marco OFDM [25]. La introducción del CP volvió a los sistemas OFDM más resistentes a la dispersión en el tiempo [26], básicamente este absorbe el retraso de propagación del canal y cualquier error de temporización de bloque en el receptor [23]. Es importante elegir el mínimo necesario para maximizar la eficiencia del sistema [27].

Como se explicó con anterioridad, el CP es una característica crucial de OFDM usada para combatir la ISI e ICI, introducidas por el canal multi-trayecto por donde la señal está siendo propagada. La idea básica es el replicar una parte de la forma de onda OFDM en el dominio del tiempo de la parte trasera a la delantera para crear un periodo de guarda. La duración del periodo de guarda debe ser mayor que la propagación de retardo en el peor de los casos del entorno multi-trayecto objetivo [26]. La longitud relativa del CP depende de la relación entre la dispersión del retardo del canal y la duración del símbolo OFDM [21]. La separación de los símbolos OFDM por medio del CP ayudan de igual manera a que los receptores puedan demodular los datos de manera más sencilla [28]. Lo anterior tiene dos efectos positivos: previene la ISI porque actúa como periodo de guarda entre símbolos sucesivos, y convierte la convolución lineal con la respuesta del canal a una convolución cíclica. La convolución cíclica en el dominio del tiempo es equivalente a la multiplicación por escalar en el dominio de la frecuencia, lo que resulta en que las sub-portadoras permanezcan ortogonales y no exista el ICI. Existen dos razones para insertar un CP. Asumiendo que el CP es más largo que la respuesta al impulso de los canales, la convolución entre los datos y la respuesta al impulso del canal actuará como una convolución circular y la interferencia del símbolo anterior solo afectará al CP. El CP entonces será descartado en el receptor y la convolución circular realiza una ecualización en el receptor más fácilmente. Sin embargo, si el número de muestras en el CP es más largo, la tasa de transmisión de datos disminuirá significativamente, ya que el CP no porta ningún tipo de dato útil. Así, es importante elegir el CP mínimo necesario para maximizar la eficiencia del sistema [29].

CAPITULO III

CANAL ÓPTICO INALÁMBRICO O NO GUIADO

III.1 TIPO DE CANAL

III.1.1 Turbulencia atmosférica

La turbulencia atmosférica degrada el desempeño de un enlace óptico inalámbrico, sobre todo cuando la longitud del enlace es mayor que 1 Km. [30]. Variaciones de la temperatura y presión producen a su vez variaciones en el índice de refracción a lo largo de la trayectoria del enlace [30], [31], [32]. Dichas variaciones pueden ocasionar a su vez fluctuaciones en la amplitud y fase de la señal recibida (titilación o centelleo) [33]. Se han realizado diversos estudios desde los trabajos iniciales de Kolmogorov sobre el comportamiento de la atmósfera turbulenta y sus efectos en el índice de refracción, principalmente para la condición conocida como turbulencia débil [34]. En esta teoría (de Kolmogorov y sus diferentes variantes) se describe la turbulencia por medio de remolinos, donde los remolinos más grandes se dividen en remolinos más pequeños sin pérdida de energía, hasta que finalmente se disipan por viscosidad [35], [36]. El tamaño de los remolinos va desde unos pocos metros a pocos milímetros, denotados como escala exterior y escala interior respectivamente [9]. Tatarski [32], [35], [37], aplicó la teoría de Kolmogorov para analizar el comportamiento de campos electromagnéticos a través de medios turbulentos. De lo anterior se han obtenido diferentes modelos estadísticos que describen los efectos de la turbulencia en las comunicaciones ópticas, por ejemplo, en

sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricos con modulación de intensidad y detección directa han sido ampliamente utilizados modelos de canal donde las variaciones de la intensidad obedecen a una distribución estadística *lognormal* [34], [38], aunque solo para el régimen de turbulencia débil.

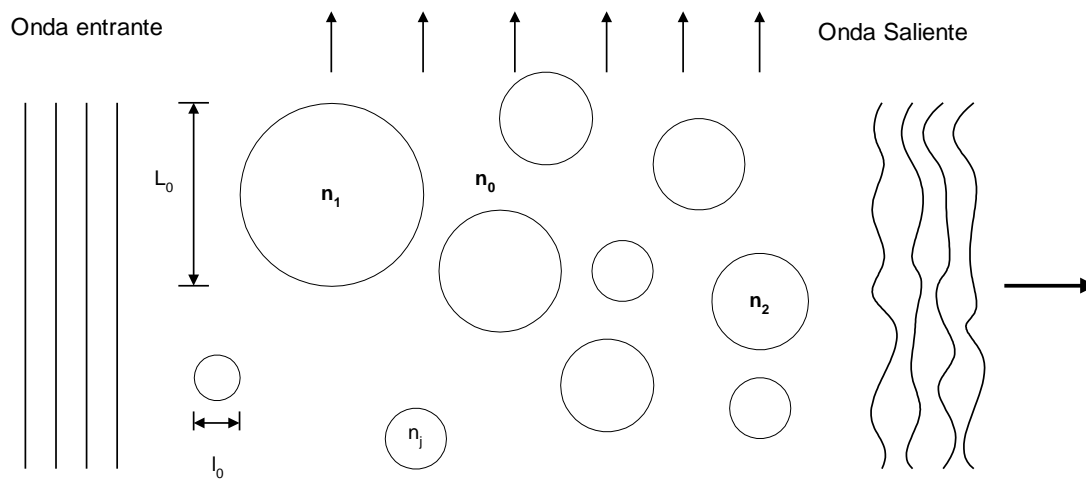


Figura 3. Remolinos con índices de refracción estadísticamente diferentes usados para modelar las variaciones del índice de refracción en la atmósfera turbulenta.

El flujo para tamaños de escalas L , dentro del intervalo $l_0 \leq L \leq L_0$, es extremadamente turbulento, con gradientes de velocidad ocurriendo en todas las posibles direcciones, en una forma aleatoria, tanto espacial como temporal. Con propósitos de análisis, se puede visualizar a la atmósfera como un conjunto de masas informes o remolinos de fluido homogéneo, con tamaños que van desde l_0 a L_0 , los cuales tienen similares temperaturas y presiones.

III.1.2 Fluctuaciones del índice de refracción

Un parámetro importante de la medida de la turbulencia atmosférica que afecta a un canal óptico es la constante de estructura del índice de refracción del aire C_n^2 . El significado físico de la constante estructura del índice de refracción C_n^2 , es una medida de la fuerza de las fluctuaciones del índice de refracción. Si se tiene conocimiento de la constante de estructura de temperatura C_T^2 , C_n^2 puede ser determinado por medio de:

$$C_n^2 = \left(79 \times 10^{-6} \frac{P}{T} \right)^2 C_T^2 \quad (17)$$

En cortos intervalos de tiempo, a una distancia de propagación fija y una altura constante sobre el suelo puede ser asumido que C_n^2 es prácticamente constante.

Valores de $C_n^2 = 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ o menor son consideradas como turbulencia débil y valores hasta $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ o más como turbulencia fuerte. Se puede considerar que a en intervalos de tiempo cortos, trayectorias y altura fija, C_n^2 es constante. Lo anterior para trayectorias verticales, C_n^2 varía en función de la altura.

Otra medida de turbulencia es la varianza de Rytov, la cual relaciona tanto la constante de estructura del índice de refracción con la longitud de la trayectoria del haz:

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$$

Con $k=2\pi/\lambda$ y L es la distancia de la trayectoria del haz.

En algunas situaciones de interés práctico se busca la fuerza de la turbulencia como una predicción sobre que el parámetro de la función estructura del índice de refracción C_n^2 , variará como una función de la distancia de propagación.

Otra cantidad importante en la medición de las fluctuaciones ocasionadas a la luz que viaja por un canal atmosférico es la varianza del logaritmo de la amplitud $\langle \chi^2 \rangle$, la cual para una onda plana es [32], [34]:

$$\langle \chi^2 \rangle = \sigma_\chi^2 = 0.307 C_n^2 L^{11/6} k^{7/6}$$

Se ha demostrado que la ecuación anterior es una buena aproximación para valores de $\sigma_\chi^2 < 1$. La varianza del logaritmo de la intensidad es relacionada con la varianza del logaritmo de la amplitud por [35]:

$$\sigma_{\log I}^2 = \langle |\ln I - \langle \ln I \rangle|^2 \rangle = 4\sigma_\chi^2$$

y

$$\sigma_{\ln I}^2 = 1.23 C_n^2 L^{11/6} k^{7/6} = \sigma_R^2$$

Donde σ_R^2 es conocida como la varianza de Rytov. La varianza de Rytov para una onda plana infinita nos da información sobre la fuerza de las fluctuaciones de irradiancia y por lo tanto nos da una idea de la fuerza de la turbulencia atmosférica. En la tabla

siguiente se muestran la relación entre los valores de la varianza de Rytov y la fuerza de las fluctuaciones.

Tabla 2: Valores típicos de la turbulencia correspondientes a niveles de turbulencia débil, y fuerte.

Fuerza de las fluctuaciones de la irradiancia	Varianza Rytov
Débil	$\sigma_R^2 < 0.3$
Intermedia	$\sigma_R^2 \sim 1$
Fuerte	$\sigma_R^2 \gg 1$

Capítulo IV

OFDM en Comunicaciones Ópticas Inalámbricas con Modulación de Intensidad por Subportadoras.

IV.1 Introducción

En este capítulo se describen los principios fundamentales de los sistemas de comunicaciones ópticos inalámbricos, en particular los sistemas con detección directa, sobre los cuales se enfoca el presente trabajo de tesis. Los sistemas de comunicaciones ópticas, utilizan como portadora un haz de láser, el cual se envía por el canal que puede ser fibra óptica o espacio libre (ya sea atmosférico interior o exterior y espacio profundo), el cual al llegar al receptor es convertido en una señal eléctrica por un fotodetector.

IV.2 Sistemas de comunicaciones ópticas

Los receptores de comunicaciones ópticas pueden ser divididos en dos tipos básicos [39] receptores no coherentes y receptores coherentes. Los receptores no coherentes son receptores que detectan la intensidad de la señal (y por lo tanto la potencia); son también conocidos como receptores de detección directa. Estos receptores son relativamente sencillos y son usados cuando la información transmitida es enviada por las variaciones de la intensidad del campo recibido, a lo que se le conoce como modulación de intensidad. Por otro lado, se tienen los receptores ópticos coherentes, en los cuales el campo óptico recibido es mezclado por el campo óptico generado por un láser local, haciendo más complejo el receptor pero con un mejor

desempeño dadas las mismas condiciones. A continuación, se describirán brevemente los receptores ópticos incoherentes particularmente los modulados en intensidad y con detección directa en el receptor.

IV.3 Sistemas de comunicaciones ópticas modulados en intensidad y detección directa

Uno de los tipos más representativos de los sistemas de comunicaciones ópticas actuales se basan en la modulación de intensidad (MI), la cual es convertida en una señal eléctrica en el receptor por medio de un foto-receptor, lo que es conocida como detección directa (DD). Los sistemas de detección directa pueden ser los que utilizan algún esquema de modulación de pulsos tales como la modulación *On-Off-Keying* (OOK), modulación por posición de pulsos (del inglés *Pulse Position Modulation*, PPM) o por el uso de una subportadora. La operación básica del receptor que utiliza detección directa es como sigue: el campo eléctrico de la luz recibida E_s es convertido en el receptor directamente a corriente eléctrica por medio de un foto-receptor, tal como se explicó líneas arriba. La fotocorriente es directamente proporcional al cuadrado de E_s y, por lo tanto, a la potencia óptica recibida P_r , esto es:

$$i(t) = \mathcal{R}P_r(t)$$

Donde \mathcal{R} es la responsividad del foto-detector. En la **figura 4.1** se muestra el diagrama a bloques de este tipo de sistema.

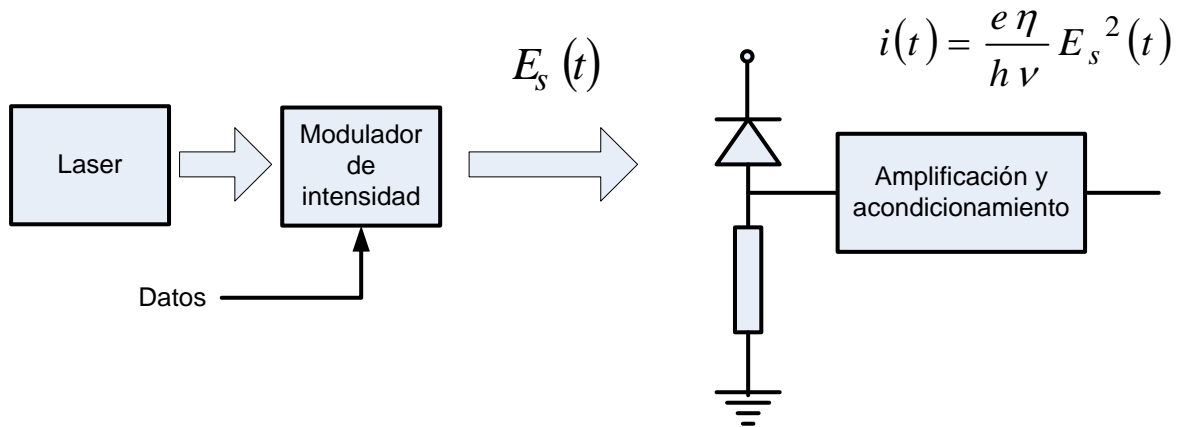


Figura 4.1 Modulación de intensidad/detección directa

IV.4 Modulación de intensidad por medio de subportadoras moduladas por OFDM MPSK/MQAM

La modulación de intensidad por medio de subportadoras es ampliamente usado en sistemas de comunicaciones ópticas de distribución analógicos y digitales y consiste en modular en intensidad la señal óptica por medio de una señal de radiofrecuencia (RF) o subportadora, ya sea directamente sobre la fuente óptica o por medio de un modulador externo [40]. Para estos sistemas, el ancho de banda óptico ocupado es el mismo que el de la señal de banda base [41]. En el transmisor, los datos son modulados por una portadora de RF en el caso de una única portadora, o por muchas en el caso de utilizar múltiples subportadoras; la portadora óptica es puede ser modulada directamente en el caso de que el oscilador óptica que la genera sea un LED o un láser o bien utilizando un modulador externo. Como se explica en párrafos anteriores, la modulación OFDM puede ser vista como modulación de múltiples subportadoras ortogonales, las cuales son generadas por la IFFT de los datos modulados en formatos MPSK o MQAM. En la **figura 4.2** se muestra el diagrama

básico del sistema de comunicaciones ópticas inalámbricas con intensidad modulada por una subportadora OFDM-MPSK/MQAM.

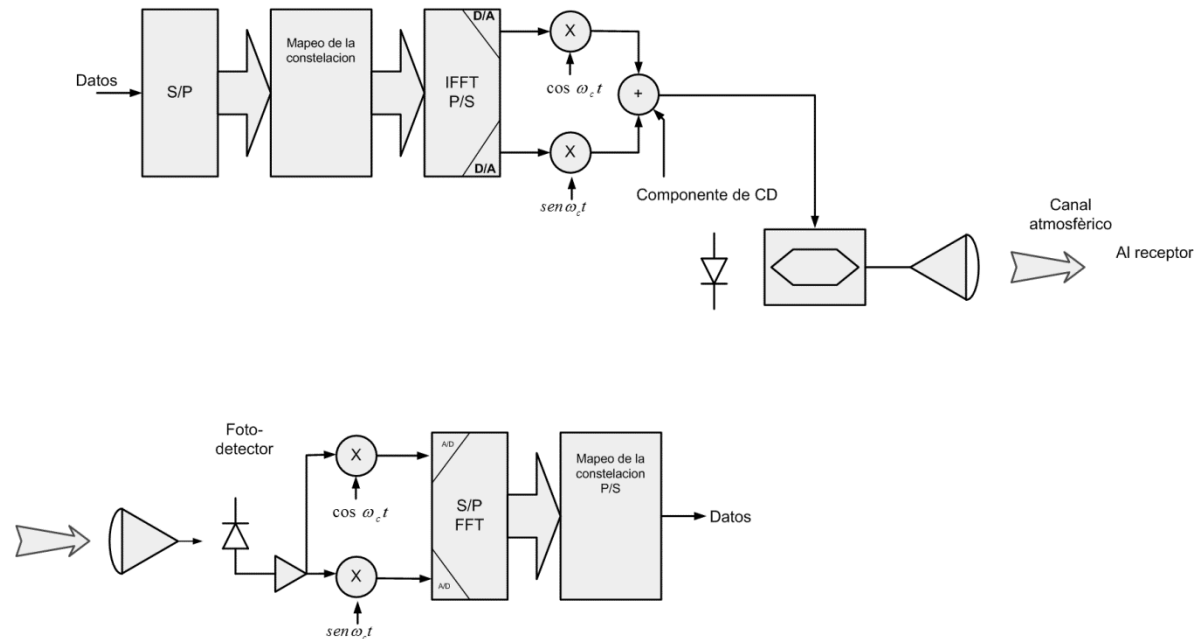


Figura 4.2 sistema de comunicaciones ópticas inalámbricas con intensidad modulada por una subportadora OFDM-MPSK/MQAM con detección directa.

La señal transmitida puede ser representada como:

$$s(t) = s_{OFDM}(t) + componente_CD$$

Donde

$$s_{OFDM}(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} p(t - kT) \times IFFT(de_N_datos) \times señal_portadora$$

Siendo $p(t - kT)$ la función pulso.

$$i(t) = \Re P_r [1 + \beta s_{OFDM}(t)] + n(t)$$

Con \Re como responsividad en A/W , β como índice de modulación y $n(t)$ como ruido aditivo gaussiano. La señal $i(t)$ está compuesta por una componente en fase, la cual es procesada como una señal de RF típica para obtener la información transmitida.

La corriente foto-detectada está compuesta por componentes en fase y cuadratura, es decir:

$$i(t) = I_{FASE} + I_{CUADRATURA}$$

Con

$$I_{FASE} = \Re P_r p(t) s_{OFDM_real}(t) \cos(\omega_c t) + n_I(t)$$

$$I_{CUADRATURA} = \Re P_r p(t) s_{OFDM_imag} \sin(\omega_c t) + n_Q(t)$$

Estos componentes son trasladados a banda base en cada uno de las ramas y digitalizados para su posterior procesamiento y recuperación de los datos.

A manera de describir la forma de operar del sistema mostrado en la **figura 4.2**, los datos mostrados se “mapean” de forma que forman la constelación formados por valores para parte real y para parte imaginaria. Lo anterior se ilustra en la **figura 4.3** para (QPSK).

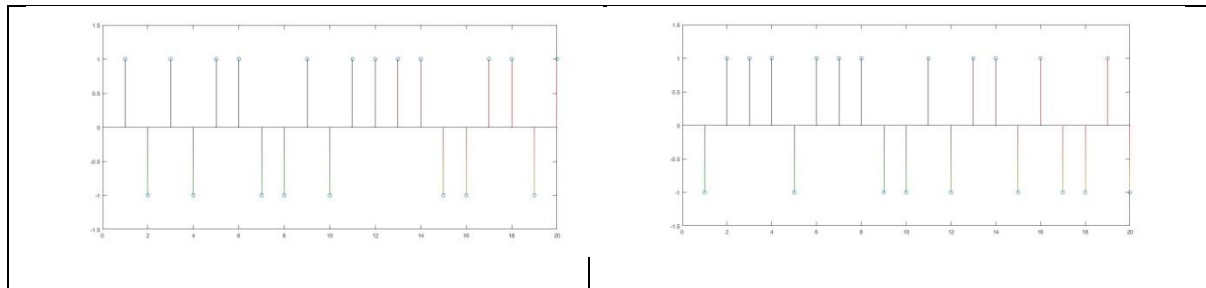


Figura 4.3 Datos a la salida de la etapa de mapeo; a) parte real, b) parte imaginaria.

Con estos valores se obtiene la transformada de Fourier inversa IFFT (parte real y parte imaginaria). En la **figura 4.4** se muestra parte de la secuencia obtenida.

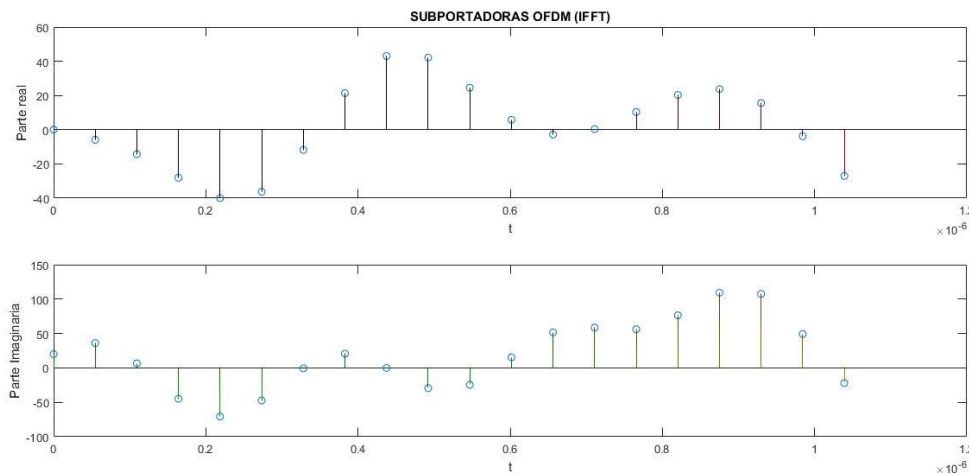


Figura 4.4 Subportadoras generadas por la IFFT

El espectro de las señales OFDM, las cuales se obtuvieron de la conversión digital – analógica y multiplicada la parte real de la IFFT y multiplicadas por las señales coseno y seno con una portadora de $f_c = 91.429\text{MHz}$ se muestra en la **figura 4.5**.

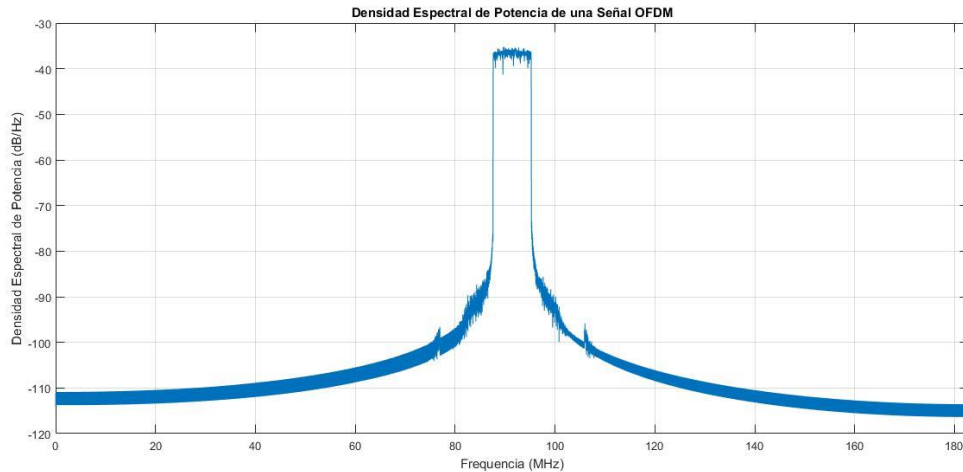


Figura 4.5 Densidad espectral de potencia de una señal OFDM

La señal transmitida es recibida por medios ópticos en el espacio libre, la cual es afectada por la turbulencia antes de llegar al receptor. En este, la señal es fotodetectada y filtrada, obteniéndose la señal de radiofrecuencia modulada (subportadora) con modulación OFDM-MPSK o OFDM-MQAM, para posteriormente realizar una conversión analógica-digital, conversión de datos serie a paralelo, realización de la FFT para la obtención de los datos y al final realizar una multicanalización de los datos.

Capítulo V

SIMULACIÓN Y RESULTADOS

V.1 Introducción

En el presente capítulo se presentan los resultados de la simulación del sistema propuesto en el capítulo anterior. En la primera parte se presentan las gráficas de los resultados de la evaluación del sistema vía simulación en lo relacionado con las constelaciones de los diferentes esquemas de modulación propuestos para diversos valores de razón señal a ruido y ruido de turbulencia atmosférica. También se presenta los resultados de la simulación en términos de tasa de error de bit.

V.2 Evaluación del sistema por observación del diagrama de constelación

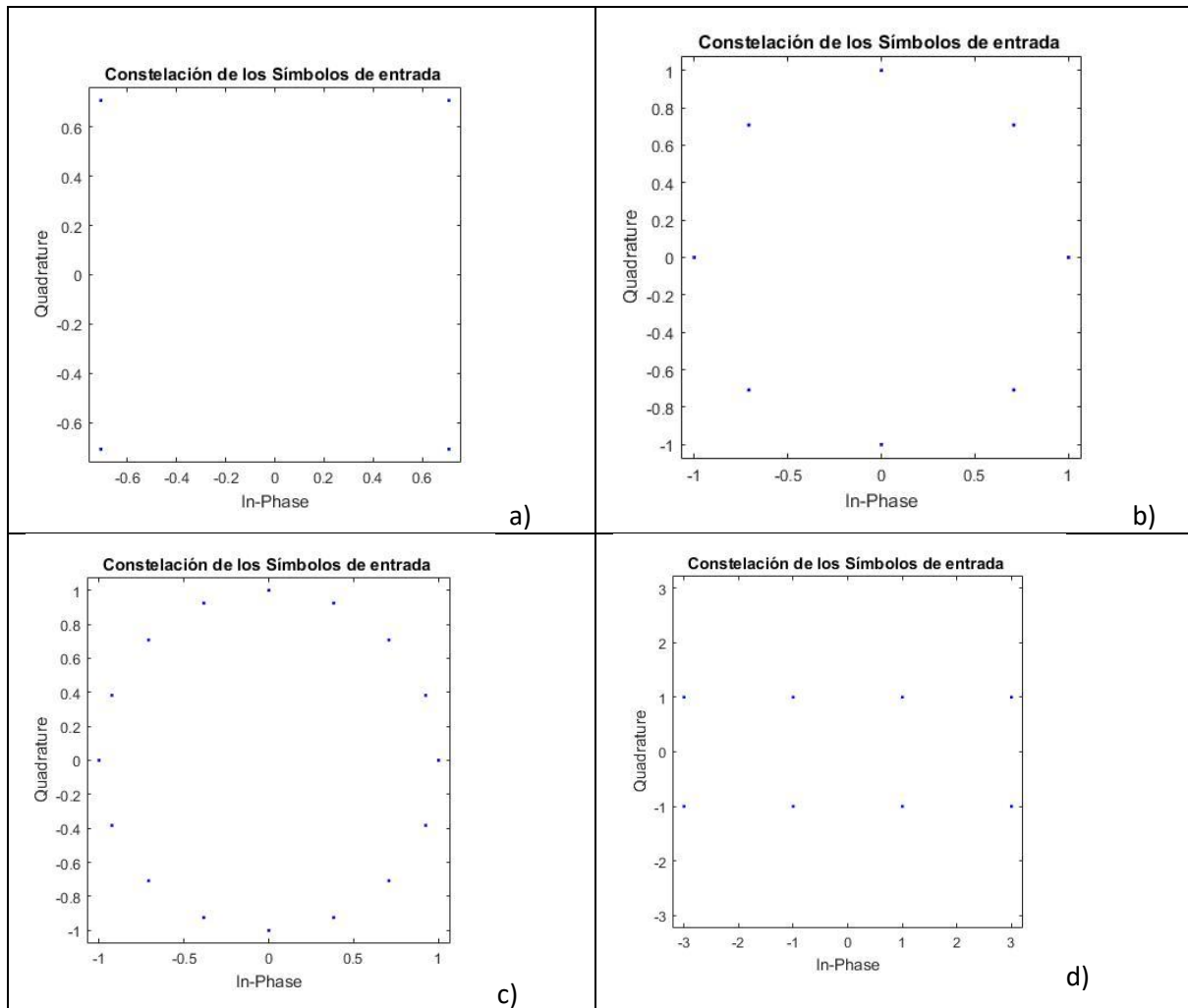
El diagrama de constelación es una representación de una señal en el plano complejo en términos de su amplitud y fase y nos da una valoración de la distorsión y otros fenómenos que afectan a la señal de comunicaciones recibida. El diagrama de constelación nos muestra los puntos requeridos para cada símbolo transmitido y la dispersión y deformación nos indican que la señal será detectada incorrectamente al ser la distancia al centro del símbolo erróneo más corta, ocasionando error en el receptor.

En la **figura 5.1** se muestran las constelaciones para señales QPSK, 8PSK, 16PSK, 8QAM y 16QAM, las cuales son generadas por los datos de entrada en la simulación en Matlab.

Las simulaciones se realizaron considerando los datos mostrados en la tabla 3 y se muestran como resultados las constelaciones para las diferentes condiciones de turbulencia atmosférica, la cual se considera el régimen de turbulencia débil ($\sigma_1^2 < 1$).

Tabla 3. Valores de los distintos parámetros considerados en las simulaciones.

Parámetro	valor
Tamaño de la IFFT , N	128
Intervalo de Guarda $G=N/4$	32
Tasa de datos	155 Mbit/s
Razón señal a ruido, S/N	2 y 10 dB
Indice de cintilación σ_1^2	10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} , 3×10^{-1} , 7×10^{-1}



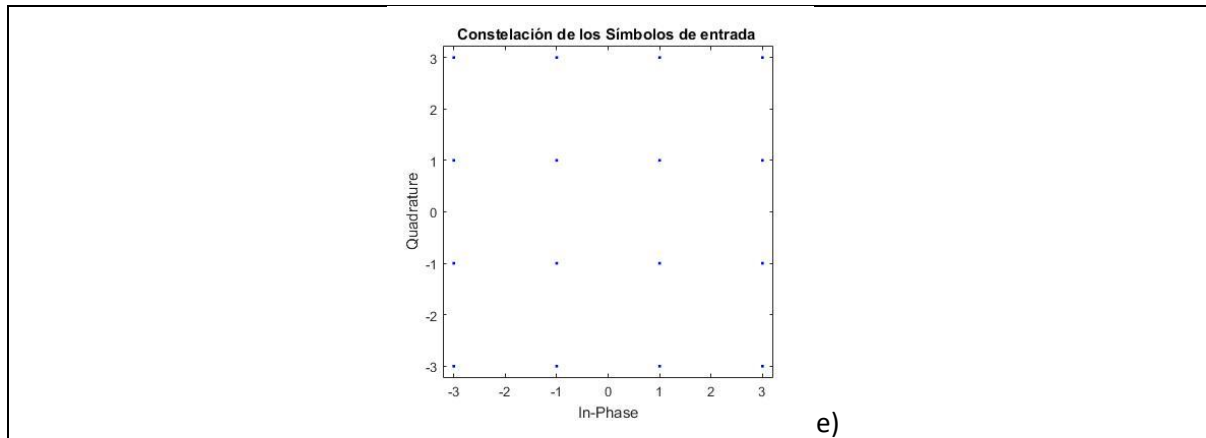
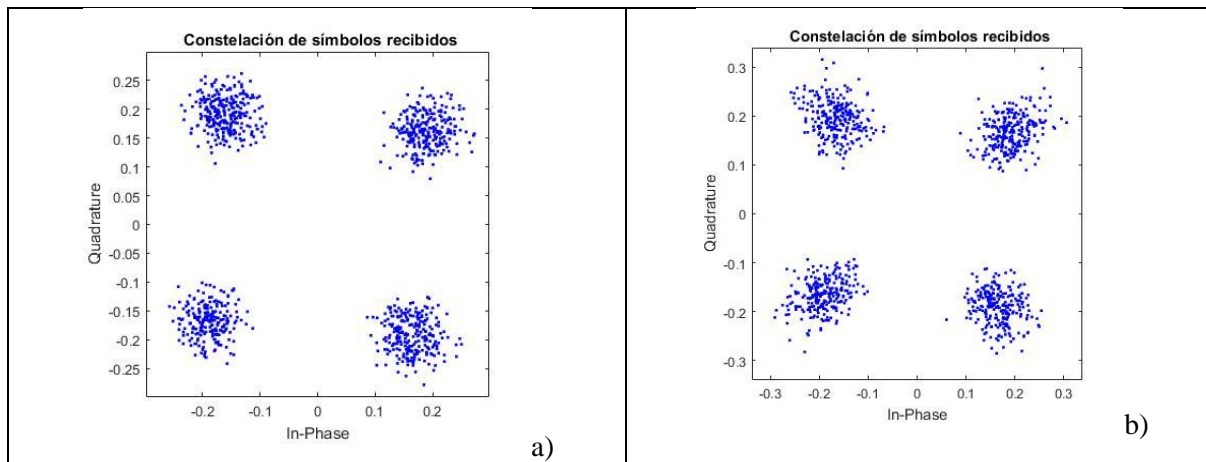


Figura 5.1 Constelaciones para: a) OFDM-QPSK, b) 8PSK, 16PSK, 8QAM, 16QAM.

En la **figura 5.2** se presentan los gráficos de constelación para OFDM con modulación 4PSK para la razón señal a ruido S/N de 2 dB y para diferentes valores del índice de cintilación. Se puede observar que el efecto de la turbulencia sobre la señal recibida para valores de σ_I^2 , prácticamente “destruyen” la forma de la constelación, impidiendo una detección adecuada.



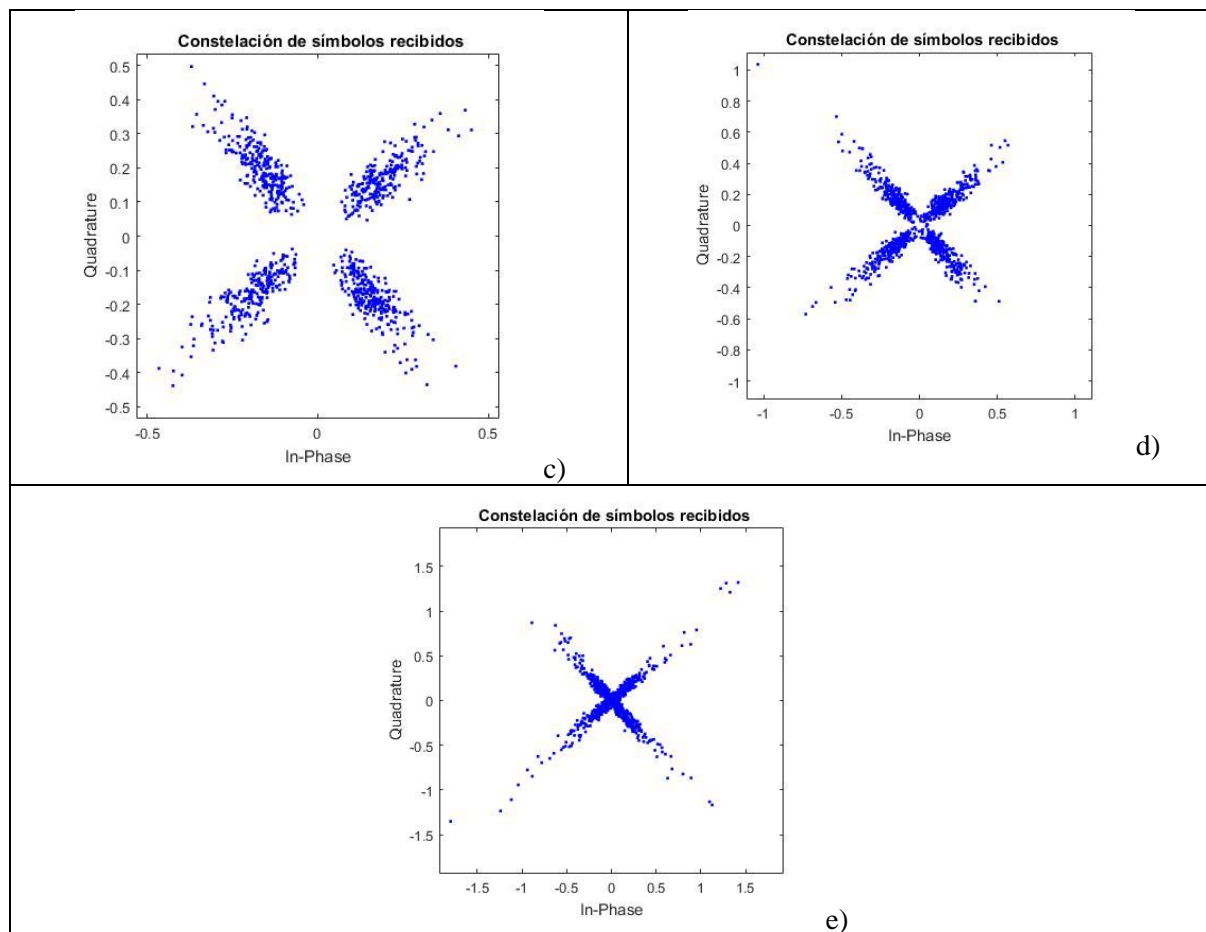


Figura 5.2 Constelación para OFDM-QPSK en el receptor con $S/N=2\text{dB}$ y para σ^2 : a) 10^{-3} , b) 10^{-2} , c) 0.1 , d) 0.3 , e) 0.7

En la **figura 5.3** se observan los diagramas de constelación para 8PSK, observando que el efecto causado a esta es mayor al haber una distancia entre símbolo menor, ocasionando que los símbolos se traslapen por efecto de la baja razón S/N, así como el de la turbulencia, lo que *a priori* ocasionará un menor desempeño en términos de error de bit.

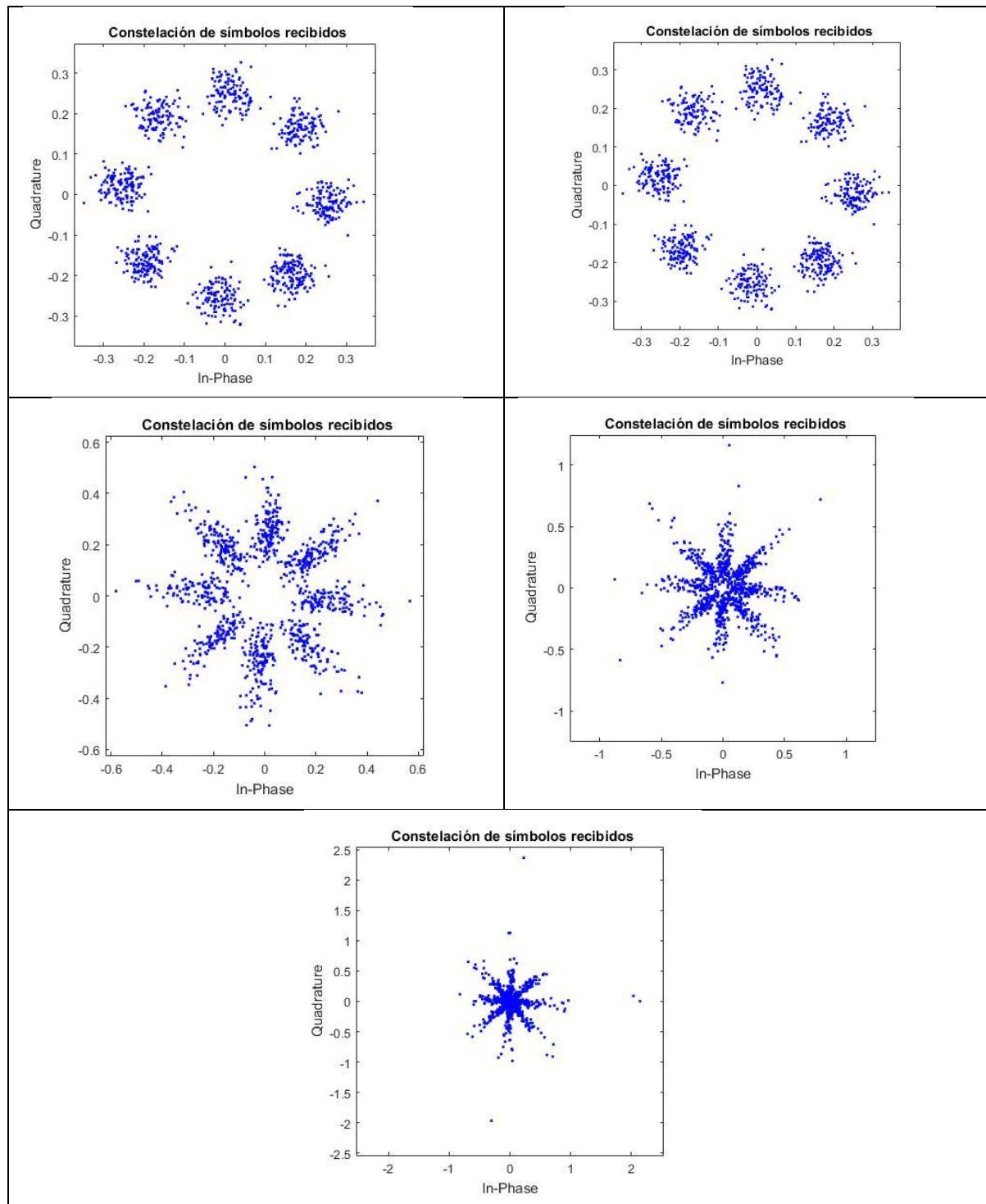


Figura 5.3 Constelación para OFDM-8PSK en el receptor con $S/N=2\text{dB}$ y para σ_i^2 : a) 10^{-3} , b) 10^{-2} , c) 0.1, d) 0.3, e) 0.7

Se puede observar que el efecto de la variación de la intensidad debido a la cintilación

se refleja como una dispersión de cada símbolo de la constelación tanto en la portadora en fase como en la portadora en cuadratura a partir de valores $\sigma_1^2 > 0.01$ y para valores de $\sigma_1^2 > 0.3$ hace difícil la diferenciación entre los símbolos al traslaparse los límites entre símbolos para las modulaciones OFDM-4PSK y OFDM-8PSK. Para 16PSK se observa en la **figura 5.4** que los límites entre los símbolos son indistinguibles entre sí aún para valores bajos del índice de cintilación σ_1^2 lo que se traducirá en un pobre desempeño.

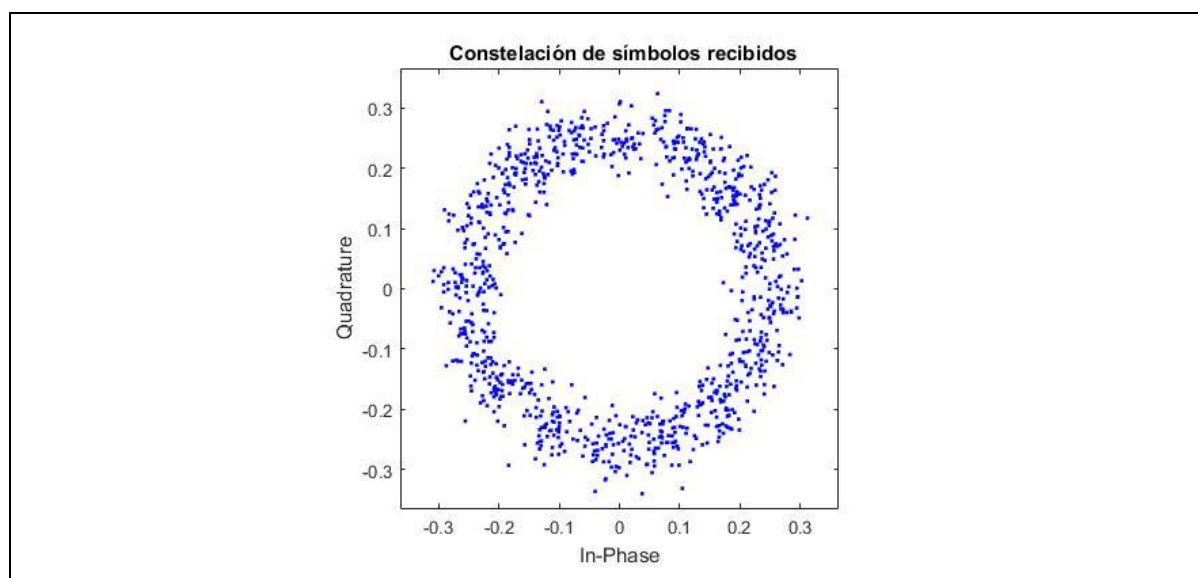
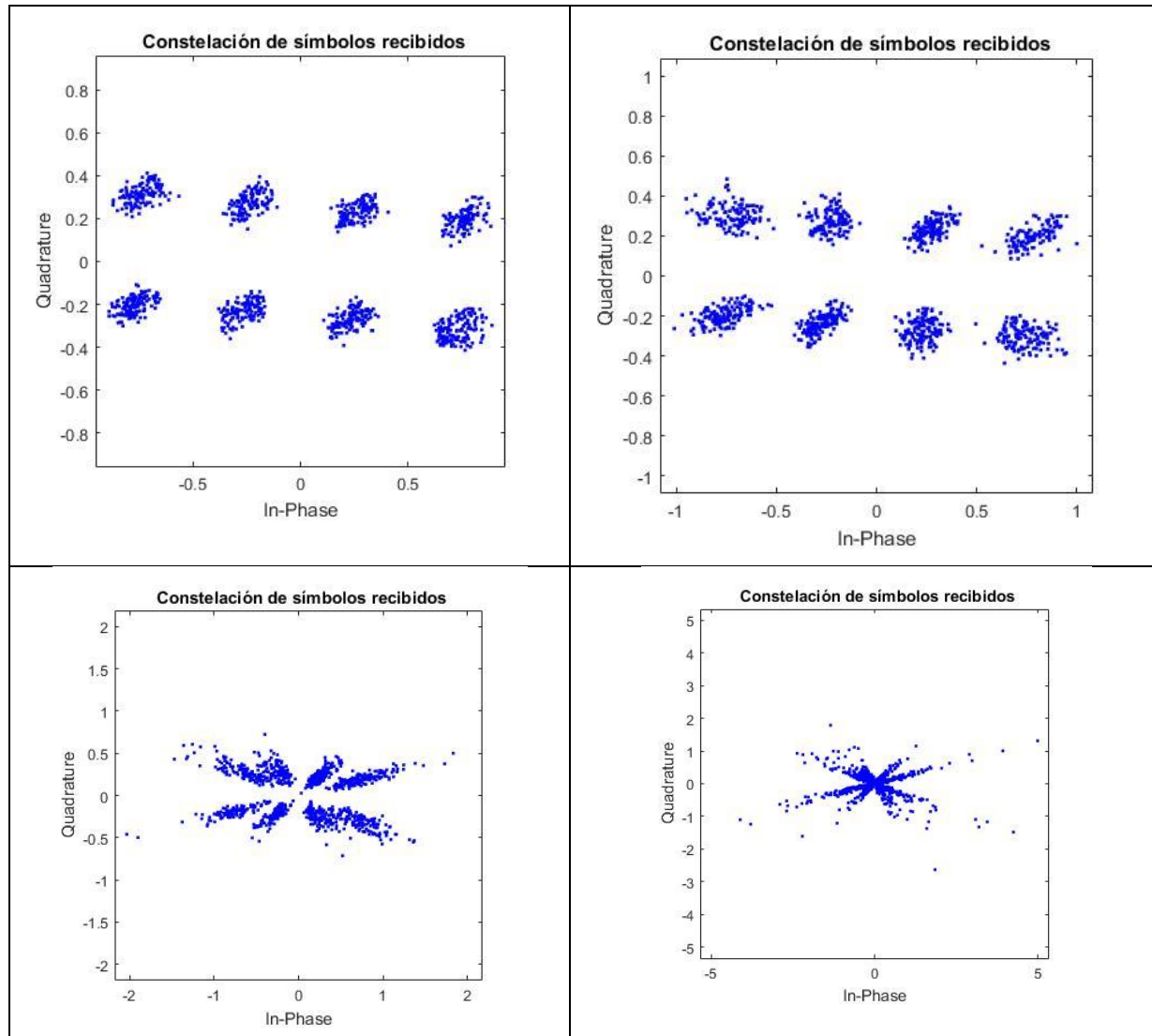


Figura 5.4 Constelación para 16 PSK en el receptor con $S/N=2\text{dB}$ y para $\sigma_1^2=10^{-3}$.

Los diagramas de constelación para las modulaciones de amplitud en cuadratura (MQAM) se muestran a continuación para una razón señal a ruido de $S/N = 2\text{dB}$ y para $M = 8$ y 16 para los diferentes valores de índice de cintilación. En la **figura 5.5** se muestran los diagramas de constelación de 8QAM para $S/N = 2\text{ dB}$ y para diferentes valores del índice de cintilación. Se observa de los diagramas de constelación que para valores de $\sigma_1^2 = 0.1$ comienzan a empalmarse las “manchas” para diferentes símbolos transmitidos. En la **figura 5.6** se observa que el traslape entre los diferentes símbolos

transmitidos y afectados por la turbulencia son indiferenciables para valores de $\sigma_l^2 = 10^{-1}$.



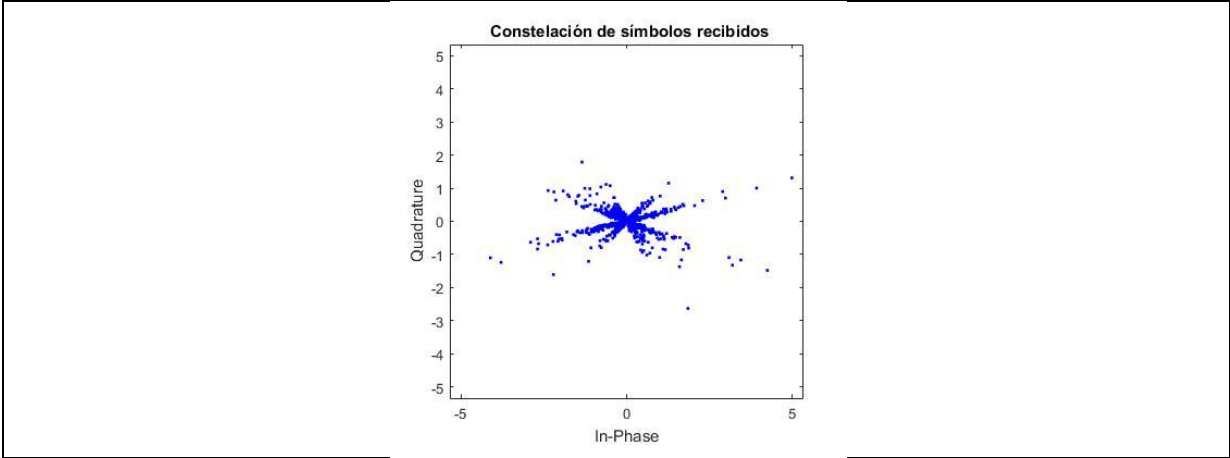
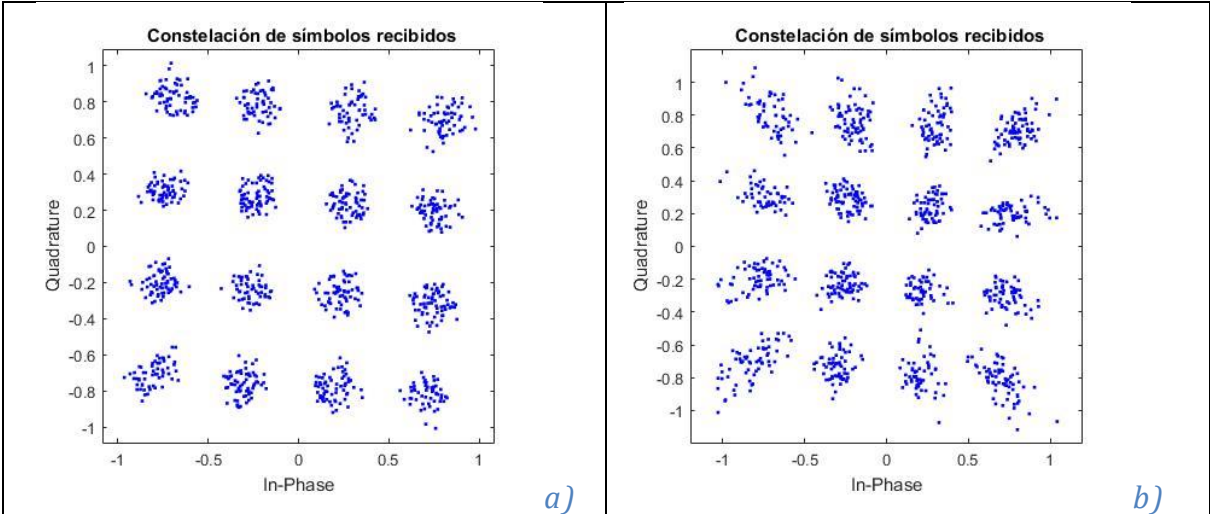


Figura 5.5 Constelación para OFDM-8QAM en el receptor con $S/N=2dB$ y para σ^2 . a) 10^{-3} , b) 10^{-2} , c) 0.1, d) 0.3, e) 0.7.



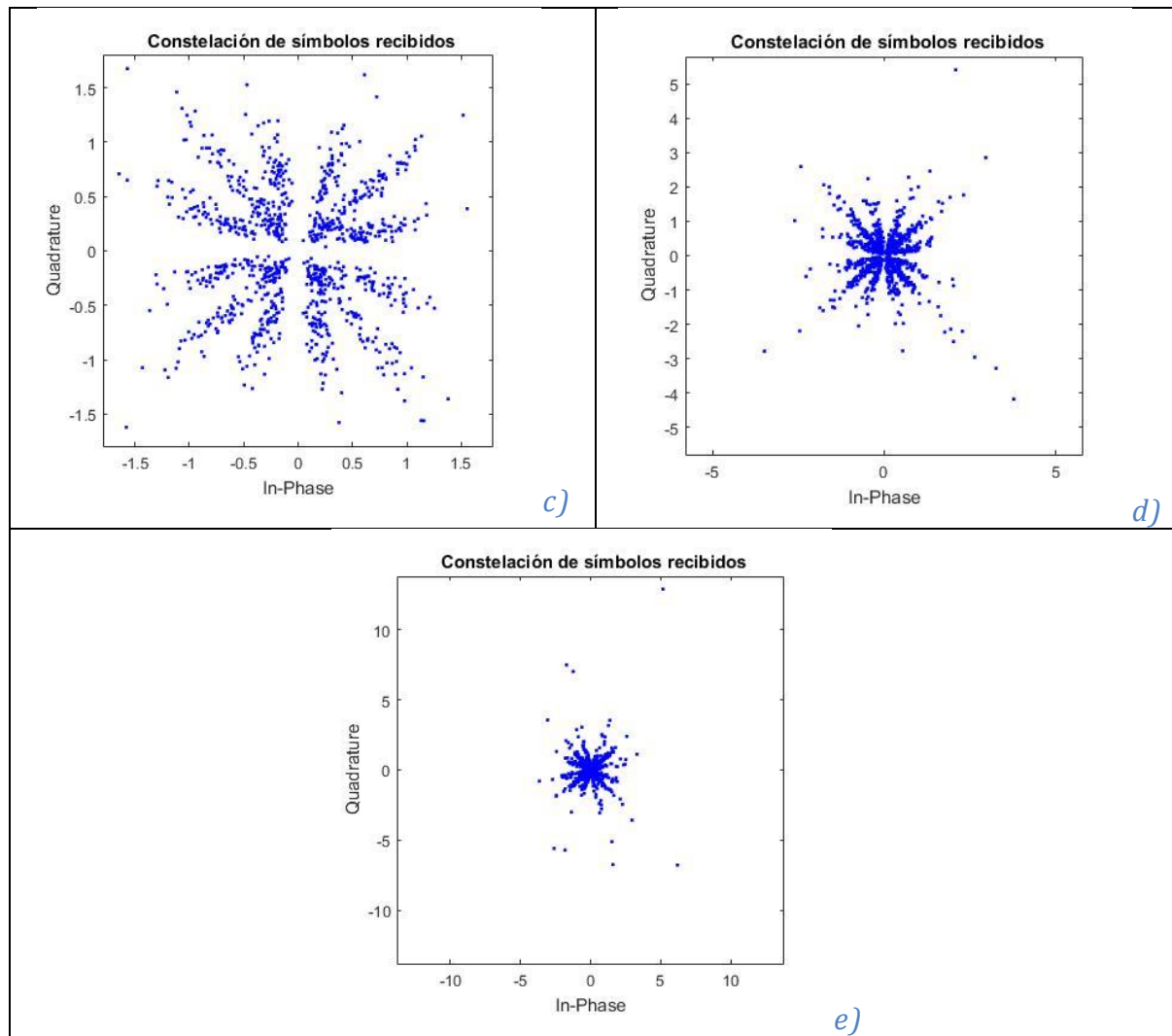


Figura 5.6 Constelación para OFDM-16QAM en el receptor con $S/N=2\text{dB}$ y para σ_1^2 . a) 10^{-3} , b) 10^{-2} , c) 0.1 , d) 0.3 , e) 0.7 .

Gráficas de constelación para las mismas modulaciones se presentan a continuación pero ahora con $S/N = 10 \text{ dB}$. Para el caso de QPSK ($M = 4$), las cuales se muestran en la **figura 5.7**, se puede observar en general un mejor desempeño al tener una mayor relación S/N (10 dB) si se le compara contra las constelaciones para QPSK para $S/N = 2 \text{ dB}$. Para $S/N = 10 \text{ dB}$, los símbolos en la constelación todavía son reconocibles para $\sigma_1^2 = 0.3$ mientras que para OFDM-QPSK con $S/N = 2 \text{ dB}$ los símbolos comienzan a

empalmarse para $\sigma_1^2 = 0.1$ y son totalmente indistinguibles para $\sigma_1^2 = 0.7$.

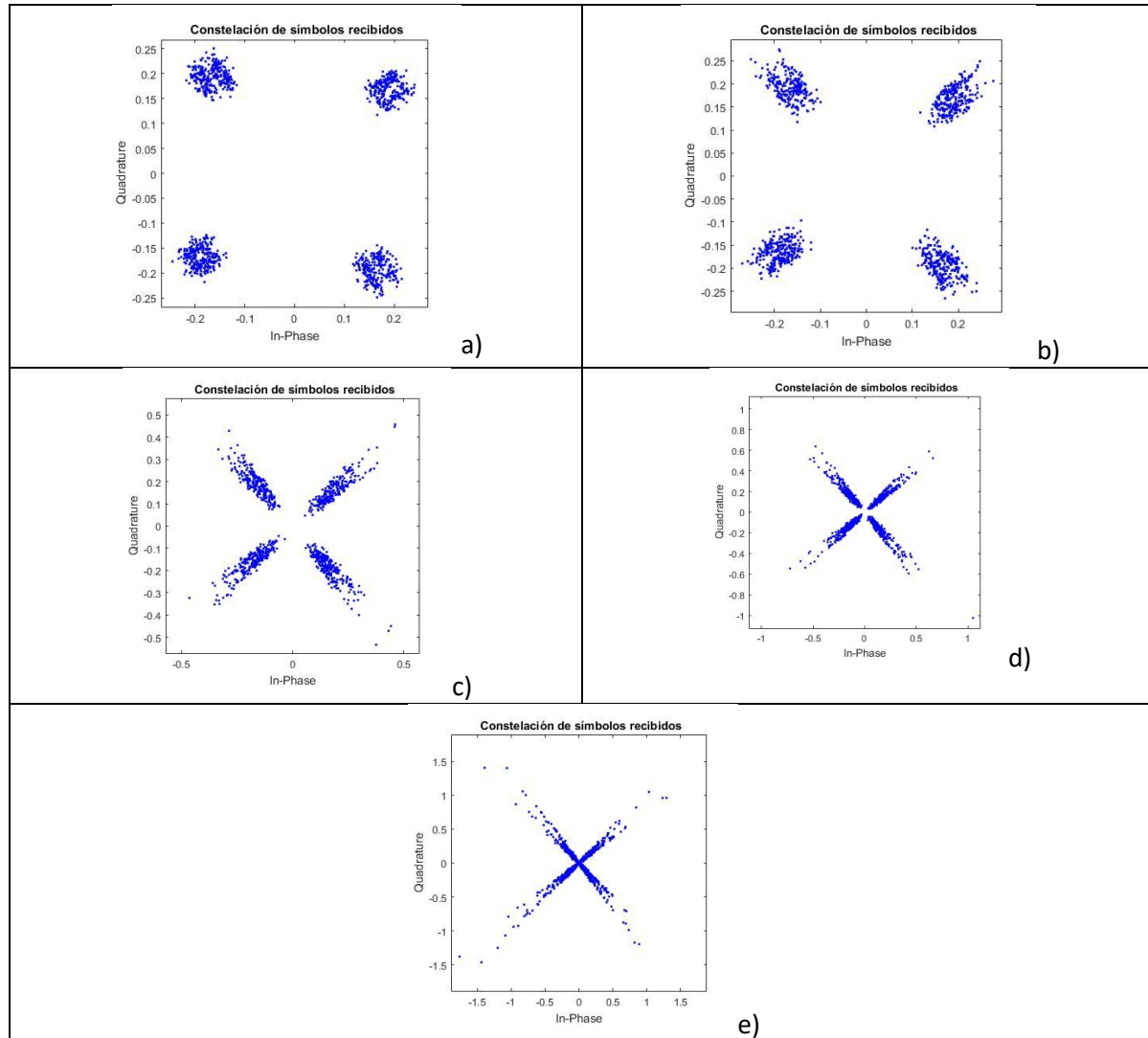


Figura 5.7 Constelación para OFDM-QPSK en el receptor con $S/N=10\text{dB}$ y para σ_1^2 : a) 10^{-3} , b) 10^{-2} , c) 0.1 , d) 0.3 , e) 0.7

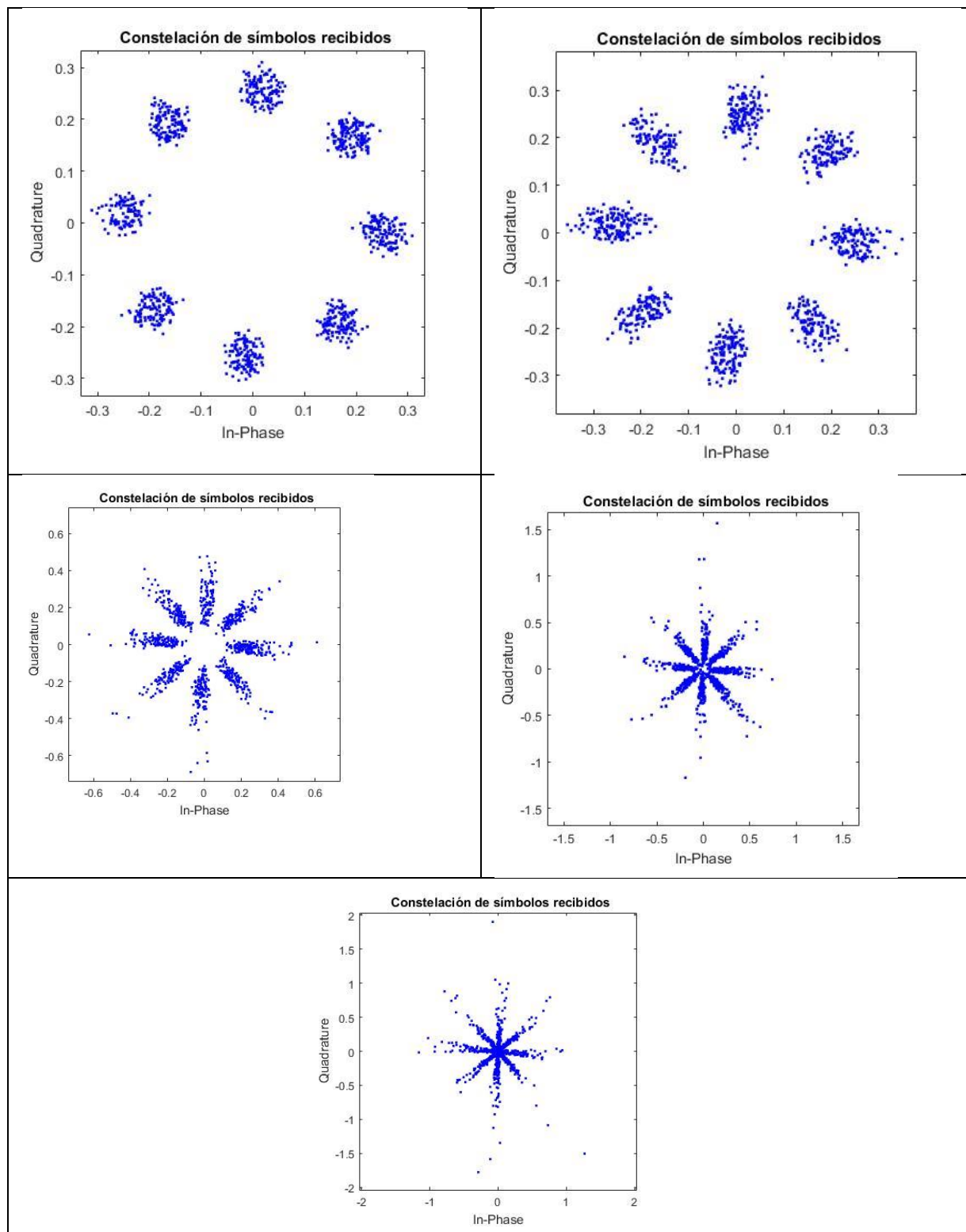


Figura 5.8 Constelación para OFDM-8PSK en el receptor con $S/N=10\text{dB}$ y para σ^2 : a) 10^{-3} , b) 10^{-2} , c) 0.1, d) 0.3, e) 0.7

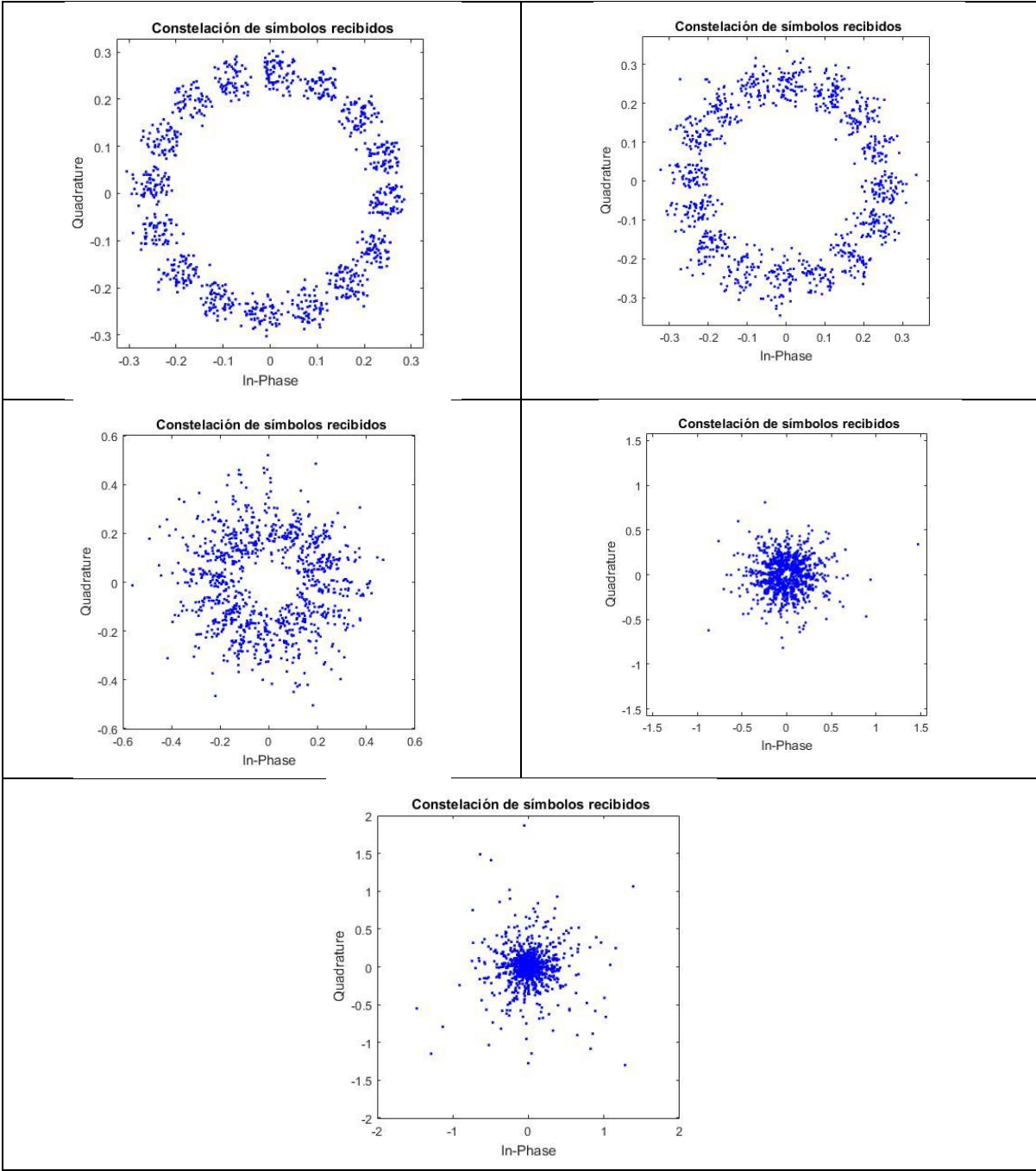


Figura 5.9 Constelación para OFDM-16PSK en el receptor con $S/N=10\text{dB}$ y para σ^2 : a) 10^{-3} , b) 10^{-2} , c) 0.1 , d) 0.3 , e) 0.7

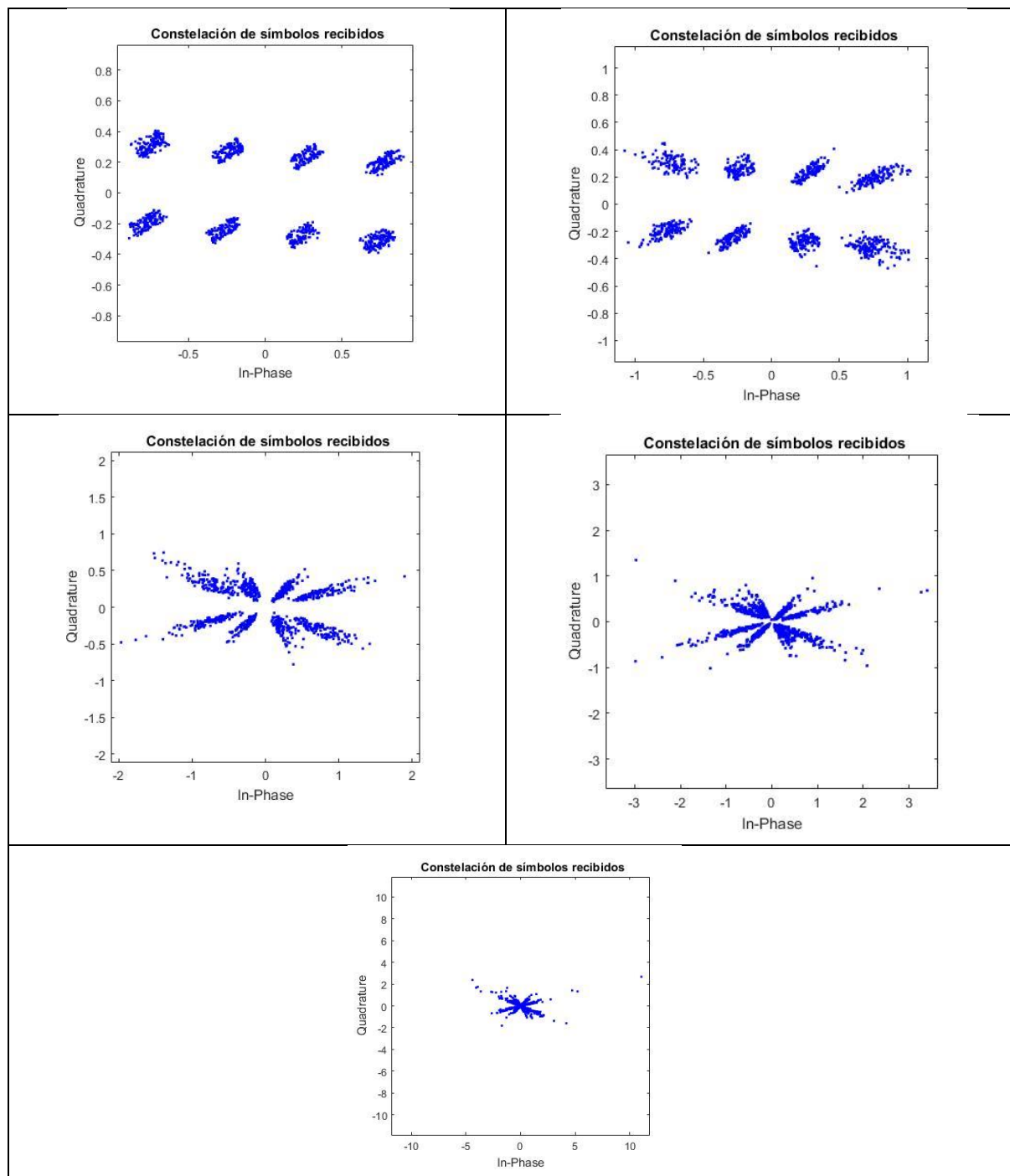


Figura 5.10 Constelación para OFDM-8QAM en el receptor con $S/N=10\text{dB}$ y para σ^2 : a) 10^{-3} , b) 10^{-2} , c) 0.1, d) 0.3, e) 0.7

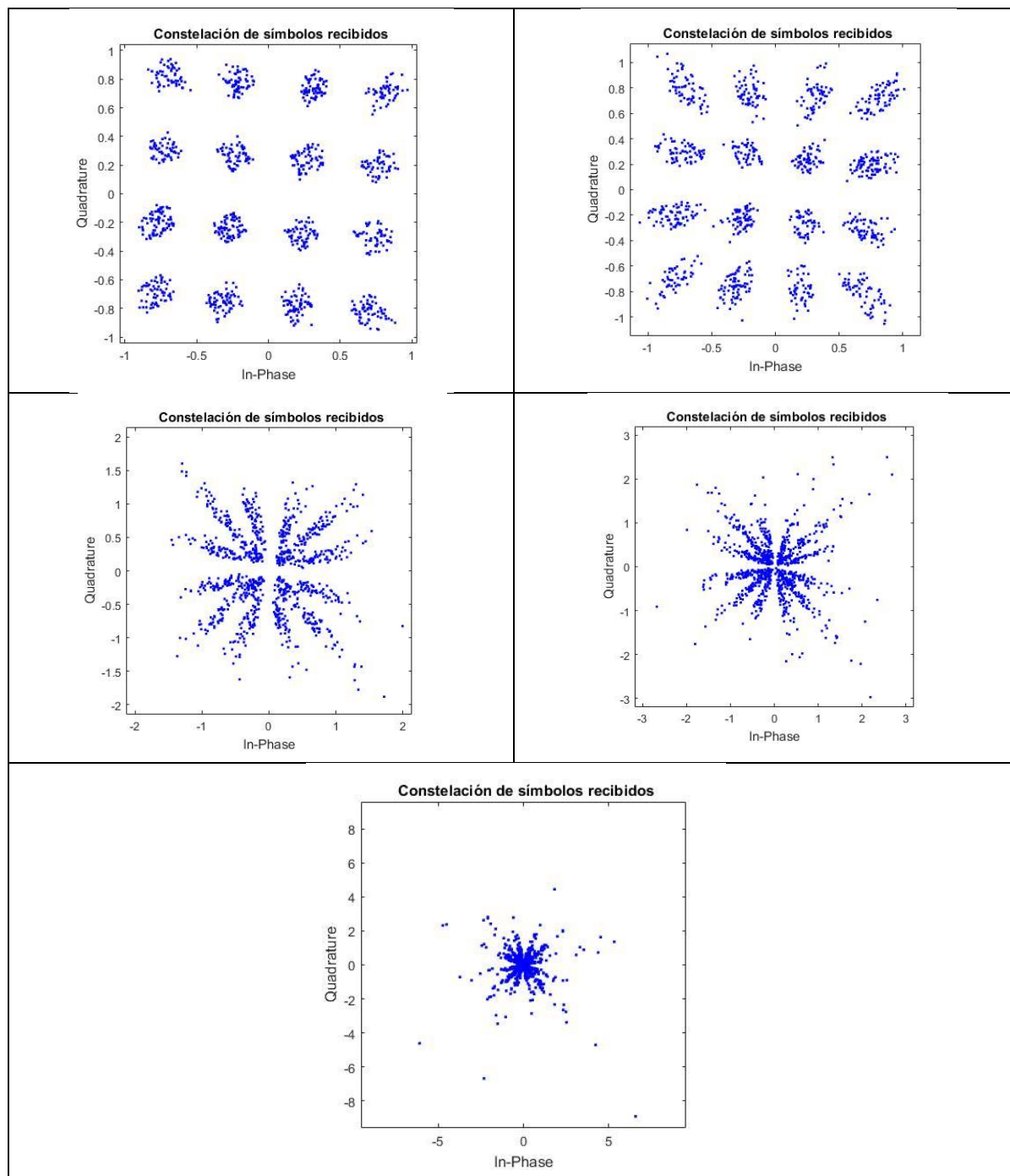


Figura 5.11 Constelación para OFDM-16PSK en el receptor con $S/N=10\text{dB}$ y para σ^2 : a) 10^{-3} , b) 10^{-2} , c) 0.1, d) 0.3, e) 0.7

Se puede observar que las gráficas anteriores que para las modulaciones OFDM-8PSK, OFDM-16PSK, OFDM-8QAM Y OFDM-16QAM, los símbolos se hacen

indistinguibles para valores del índice de cintilación de σ_I^2 de 3×10^{-1} , 10^{-2} y 10^{-1} los dos últimos, notándose que OFDM-16PSK ofrece el menor desempeño desde el punto de vista de este análisis cualitativo.

Capítulo VI

Conclusiones y observaciones

VI.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis se describe el análisis y la evaluación por medio de simulación del desempeño de un sistema de comunicaciones ópticas de espacio libre basado en la modulación de la intensidad por una subportadora óptica a su vez modulada por OFDM-MPSK/MQAM. Se reportaron resultados a dos niveles; teórico y por análisis del desempeño en forma cualitativa por medio de simulación en Matlab. En la parte de análisis teórico se analizaron las relaciones de los diferentes parámetros del sistema que deben entenderse con el fin de poder realizar la síntesis de un sistema y nos permitan la comprensión del mismo. Se obtuvieron gráficas de las señales en el dominio del tiempo así como sus espectros y los diagramas de constelaciones

En los resultados obtenidos, se observa en las simulaciones que el ruido que “deforma” las constelaciones le da una forma particular a cada “mota” correspondiente a cada símbolo. Se observa que para ciertos valores de los parámetros MPSK es igual o ligeramente mejor que MQAM, aunque esto es por observación visual. Lo anterior se ve al empalmarse “las manchas” correspondientes a símbolos vecinos de la constelación.

De lo expuesto anteriormente consideramos que las principales aportaciones de nuestro trabajo son las siguientes:

a) A nivel teórico:

a.1) Entendimiento y manejo del significado de varios parámetros del sistema y del canal de comunicaciones ópticos de espacio libre y relación entre ellos.

a.2) Generación de procesos aleatorios de turbulencia débil para un canal óptico atmosférico y una señal óptica modulada en intensidad.

b) Simulación:

b.1) Implementación por medio de simulación para la evaluación del comportamiento del sistema de modulación de intensidad por subportadora OFDM-MPSK/MQAM en un canal óptico atmosférico.

VI.2 Trabajo futuro.

El trabajo a futuro puede plantearse en diferentes aspectos:

a) Teórico:

a.1) Obtención de expresiones para el desempeño de este tipo de sistema.

a.2) Análisis para sistemas modulados en intensidad por subportadoras OFDM pero considerando variantes al sistema tales como modulación de banda lateral única a fin de hacer más eficiente el uso del espectro.

a.3 Análisis del sistema utilizando régimen de turbulencia fuerte y de saturación.

b) Simulación:

b.1) Investigar y evaluar diferentes opciones para la implementación de la simulación que sea además de precisa, eficiente en tiempo de procesamiento y uso de recursos de cómputo.

c) Experimental

c.1) Implementación del transmisor y receptor de forma básica utilizando arreglos de campos de compuertas de programables o FPGA (de las siglas en inglés, *Field Programmable Gate Array*), y/o procesadores digitales de señales de alta velocidad.

Bibliografía

- [1] D. Killinger, "Free Space Optics," *Opt. Photonics News*, no. October, pp. 36–42, 2002.
- [2] N. Cvijetic and T. Wang, "WiMAX over Free-Space Optics - Evaluating OFDM Multi-Subcarrier Modulation in Optical Wireless Channels," 2004.
- [3] N. Kumar and A. K. Rana, "Impact of various parameters on the performance of free space optics communication system," *Optik (Stuttg.)*, vol. 124, no. 22, pp. 5774–5776, 2013.
- [4] A. K. Majumdar, "Free-space laser communication performance in the atmospheric channel," *J. Opt. Fiber Commun. Reports*, vol. 2, no. 4, pp. 345–396, 2005.
- [5] X. Chen, A. Al Amin, A. Li, and W. Shieh, *Multicarrier Optical Transmission* 8. 2013.
- [6] T. Ohtsuki, "Multiple-subcarrier modulation in optical wireless communications," *Commun. Mag. IEEE*, no. March, pp. 74–79, 2003.
- [7] J. B. Carruthers and J. M. Kahn, "Multiple-subcarrier modulation for non-directed wireless infrared communication," *1994 IEEE GLOBECOM. Communications: The Global Bridge*, vol. 2. p. 9, 1994.
- [8] R. Prasad, *OFDM for Wireless Communications Systems*. 2004.
- [9] B. Sklar, *DIGITAL Fundamentals and Applications*, Second. Tarzana, California: Prentice Hall P T R, 2001.
- [10] W. Shieh and I. Djordjevic, "OFDM Principles," *OFDM Opt. Commun.*, no. Mcm, pp. 31–52, 2010.
- [11] W. Shieh and I. Djordjevic, "Chapter 10 - OFDM in Free-Space Optical Communication Systems," *OFDM Opt. Commun.*, pp. 353–383, 2010.
- [12] S. S. Ghorpade and S. V Sankpal, "Behaviour of OFDM System using MATLAB Simulation," no. 2, pp. 2–6, 2013.
- [13] D. Sharma and P. Srivastava, "OFDM Simulator Using MATLAB," vol. 3, no. 9, pp. 493–496, 2013.
- [14] J. Armstrong, "OFDM for optical communications," *J. Light. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 189–204, 2009.
- [15] W. Shieh and I. Djordjevic, "Signal Processing for Optical OFDM," *OFDM Opt. Commun.*, no. 3, pp. 119–148, 2010.
- [16] S. Chaudhary, A. Amphawan, and K. Nisar, "Realization of free space optics with OFDM under atmospheric turbulence," *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.*, vol. 125, no. 18, pp. 5196–5198, 2014.
- [17] S. Kaur and R. Mehra, "FPGA Implementation of OFDM Transceiver using FFT Algorithm," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 4, pp. 1532–1537, 2012.
- [18] P. Patil, R. Rathod, and S. P. Nagare, "Study the OFDM Transmitter System on Matlab," *Digit. Commun. Mini Proj.*, pp. 1–4.

- [19] C. Kankelborg, "DFT and FFT." pp. 1–15, 2014.
- [20] G. W. Slade, "The fast Fourier transform in hardware : A tutorial based on an FPGA implementation," no. 2, 2013.
- [21] Ahmad R. S. Bahai; Burton R. Saltzberg, *Multi-Carrier Digital Communications*. 2002.
- [22] D. Gosh, D. Debnath, and A. Chakrabarti, "FPGA Based Implementation of FFT Processor Using Different Architectures.," *Int. J. Adv. Innov. Thou*, no. 1, pp. 1–12, 2016.
- [23] P. Verma, H. Kaur, M. Singh, and B. Singh, "VHDL implementation of FFT/IFFT blocks for OFDM," *ARTCom 2009 - Int. Conf. Adv. Recent Technol. Commun. Comput.*, pp. 186–188, 2009.
- [24] J.-J. Van De Beek, M. Sandell, and P. O. Börjesson, "On synchronization in OFDM systems using the cyclic prefix," *Div. Signal Process. Lulea Univ. Technol. Lulea, Sweden*, pp. 1–5, 1996.
- [25] Y. Song, S. Sun, X. Jing, and H. Huang, "Orthogonality analysis and improvement of MSE-OFDM system," *ICINA 2010 - 2010 Int. Conf. Information, Netw. Autom. Proc.*, vol. 1, pp. 433–437, 2010.
- [26] F. M. Gutiérrez and P. L. Gilabert, "Implementation of a Tx/Rx OFDM System in a FPGA," *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2009.
- [27] M. A. Mohamed, A. S. Samarah, and M. I. F. Allah, "Implementation of the OFDM Physical Layer Using FPGA," vol. 9, no. 2, pp. 612–618, 2012.
- [28] G. Liu and J. Zhang, "ITD-DFE based channel estimation and equalization in TDS-OFDM receivers," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 53, no. 2, pp. 304–309, 2007.
- [29] M. A. Mohamed, "FPGA Synthesis of VHDL OFDM System," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 70, no. 4, pp. 1885–1909, 2013.
- [30] K. Shaik, "Atmospheric propagation effects relevant to optical communications," *Telecommun. Data Acquis. Rep.*, no. June 1988, pp. 180–188, 1988.
- [31] V. I. Tatarskii, "The effects of the turbulent atmosphere on wave propagation," p. 472, 1971.
- [32] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser Beam Propagation through Random Media*. 2005.
- [33] R. M. Gagliardi and S. Karp, *Optical Communications*, First Edit. 1976.
- [34] A. Ishimaru, "Wave Propagation and Scattering in Random Media (Volume 2)," *Remote Sensing of Environment*, vol. 8, no. 4. p. 365, 1979.
- [35] A. D. Wheelon, *Electromagnetic Scintillation - I. Geometrical Optics*, First Edit., vol. 1. The Edinburgh Building, Cambridge CB2 2RU, UK: The Press Syndicate of the University of Cambridge, 2001.
- [36] G. R. Osche, *Optical detection theory for laser applications*. 2002.
- [37] E. V Hoversten, "Communication theory for the turbulent atmosphere," vol. 58, no. 10, pp. 1626–1650, 1970.
- [38] X. Z. X. Zhu and J. M. Kahn, "Free-space optical communication through atmospheric turbulence

channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 8, pp. 1293–1300, 2002.

- [39] J. H. Franz and V. K. Jain, *Optical Communications: Components and Systems*, Second Edi. Houndmills, Basingstoke, Hampshire RG21 2XS: The OMacmillan Press LTD, 2017.
- [40] W. Shieh and I. Djordjevic, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Optical Communications*. 2010.
- [41] Z. Ghassemlooy, W. O. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB®*, vol. XXXIII, no. 2. 2012.