



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA
PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Análisis comparativo de escenarios de simulación de
esquemas de modulación PSK y QAM sobre sistema OFDM
mediante MatLab/Simulink**

AUTOR:

Troya Valarezo, Luis Antonio

Componente práctico del examen complejo previo a la
obtención del grado de **INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

REVISOR:

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, Ecuador

20 de septiembre del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN


Certificamos que el presente **componente práctico del examen complejo**, fue realizado en su totalidad por **Troya Valarezo, Luis Antonio** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

REVISOR



M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

DIRECTOR DE CARRERA



M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 20 días del mes de septiembre del año 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Troya Valarezo, Luis Antonio**

DECLARÓ QUE:

El **componente práctico del examen complejo, Análisis comparativo de escenarios de simulación de esquemas de modulación PSK y QAM sobre sistema OFDM mediante MatLab/Simulink**, 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, a los 20 días del mes de mayo del año 2021

EL AUTOR

TROYA VALAREZO, LUIS ANTONIO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, Troya Valarezo, Luis Antonio

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del **componente práctico del examen complejo, Análisis comparativo de escenarios de simulación de esquemas de modulación PSK y QAM sobre sistema OFDM mediante MatLab/Simulink** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 20 días del mes de mayo del año 2021

EL AUTOR

TROYA VALAREZO, LUIS ANTONIO

REPORTE DE URKUND

URKUND Abrir sesión

Documento	Luis_Troya_EC_A2021.docx (D112238349)
Presentado	2021-09-08 09:43 (-04:00)
Presentado por	fernandopm23@hotmail.com
Recibido	edwin.palacios.ucsg@analysis.urkund.com
Mensaje	Revisión EC Luis Troya Mostrar el mensaje completo 2% de estas 16 páginas, se componen de texto presente en 4 fuentes.

Lista de fuentes	Bloques
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Reiniciar Exportar Compartir

1 Advertencias

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:
Análisis
comparativo de escenarios de simulación de esquemas de modulación PSK y QAM sobre sistema OFDM mediante MatLab/Simulink

AUTOR: Troya Valarezo, Luis Antonio

Componente práctico del examen complejo
previo a la obtención del grado de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

REVISOR: M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

DEDICATORIA

Mi proyecto lo dedico especialmente a mis queridos abuelos LUIS VALAREZO Y GLADIS DAUL, quienes desde el día que mi padre Marco Troya tuvo que partir de este mundo, nunca me dejaron solo, siempre recibí su amor, y apoyo incondicional tanto moral como económico para que yo pudiera culminar mi carrera.

A mi madre por ser mi fuente de motivación e inspiración y siempre estar a mi lado dándome la fortaleza para seguir adelante. A mi pequeño hijo Marquitos quien es mi vida y que sepa que esto es por él. A mi abuelita Flor quien siempre me tenía en sus oraciones para que todo me vaya bien y por supuesto no podía dejarlos de mencionarlos a mis queridos hermanos a quienes los quiero mucho que con sus palabras de aliento me dieron esa fortaleza para seguir adelante y cumplir con mis ideales.

EL AUTOR

TROYA VALAREZO, LUIS ANTONIO

AGRADECIMIENTO

El agradecimiento de este proyecto es para el forjador de mi camino mi padre celestial por acompañarme siempre y darme la oportunidad de lograr uno de mis objetivos que es ser un profesional, al grupo selecto de maestros que tuve el privilegio de tenerlos en cada año de mis estudios transmitiéndome sus conocimientos para poder ser un excelente profesional

No fue sencillo este caminar, pero gracias a mi familia, amigos y a todas aquellas personas que durante estos cinco años estuvieron a mi lado apoyándome he llegado a la meta.

Les agradezco y les hago presente mi afecto a mi linda familia, queridos amigos, y estimados maestros.

EL AUTOR

TROYA VALAREZO, LUIS ANTONIO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESUS
DECANO

f. 

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
COORDINADOR DEL ÁREA

f. 

M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO
OPONENTE

Índice General

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas.....	XIII
Resumen	XIV
Capítulo 1: Descripción General	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Definición del problema.....	3
1.3. Objetivos del Problema de Investigación.....	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos.	3
Capítulo 2: Fundamentos Teóricos	4
2.1. Modulación de la señal.....	4
2.2. Descripción general de la modulación y demodulación en sistemas de comunicación.	4
2.3. Sistemas de modulación	6
2.4. Multiplexación.....	6
2.5. Modulaciones analógicas.	6
2.5.1. Modulación de amplitud y doble banda lateral.....	7
2.5.2. Modulación de amplitud de banda lateral única (SSB)	8
2.6. Modulaciones angulares.....	9
2.7. Modulaciones digitales.	10
2.7.1. Revisión general del esquema de modulación PSK.	10
2.7.2. Revisión general del esquema de modulación QAM.	11
Capítulo 3: Diseño, Implementación y Análisis de Resultados	12
3.1. Descripción general de la implementación del sistema OFDM.	12
3.2. Escenario 1: sistema OFDM utilizando esquema de modulación PSK.....	14

3.2.1.	Análisis de resultados de la modulación QPSK.....	14
3.2.2.	Análisis de resultados de la modulación 16-PSK.....	17
3.2.3.	Análisis de resultados de la modulación 32-PSK.....	19
3.3.	Escenario 2: sistema OFDM utilizando esquema de modulación QAM.....	22
3.3.1.	Análisis de resultados de la modulación 4-QAM.....	23
3.3.2.	Análisis de resultados de la modulación 16-QAM.....	25
3.3.3.	Análisis de resultados de la modulación 32-QAM.....	27
3.4.	Análisis comparativo entre los escenarios de simulación 1 y 2.....	30
	CONCLUSIONES	32
	RECOMENDACIONES.....	33
	Bibliografía.....	34

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Formas de onda y espectros para la modulación DSB y modulación AM.	7
Figura 2. 2: Espectros ópticos de las modulaciones DSB-SC y DSB.	8
Figura 2. 3: Diagrama de bloques del modulador BPSK.	10
Figura 2. 4: Diagrama de constelación de la modulación BPSK.	11
Figura 2. 5: Diagrama de constelación de la modulación (a) 16-QAM y (b) OOK.	11

Capítulo 3

Figura 3. 1: Implementación del sistema de Tx y Rx OFDM utilizando esquemas de modulación digital.	13
Figura 3. 2: Diagrama de constelaciones de la modulación QPSK en el sistema OFDM.	15
Figura 3. 3: Errores por símbolo con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación QPSK.	16
Figura 3. 4: SER con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación QPSK.	16
Figura 3. 5: Diagrama de constelaciones de la modulación 16-PSK en el sistema OFDM.	18
Figura 3. 6: Errores por símbolo con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 16-PSK.	18
Figura 3. 7: SER con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 16-PSK.	19
Figura 3. 8: Diagrama de constelaciones de la modulación 32-PSK en el sistema OFDM.	20
Figura 3. 9: Errores por símbolo con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 32-PSK.	21

Figura 3. 10: SER con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 32-PSK.	21
Figura 3. 11: Gráfica comparativa de las modulaciones QPSK, 16-PSK y 32-PSK en el sistema OFDM.	22
Figura 3. 12: Diagrama de constelaciones de la modulación 4-QAM en el sistema OFDM.	24
Figura 3. 13: Errores por símbolo con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 4-QAM.	24
Figura 3. 14: SER con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 4-QAM.	25
Figura 3. 15: Diagrama de constelaciones de la modulación 16-QAM en el sistema OFDM.	26
Figura 3. 16: Errores por símbolo con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 16-QAM.	27
Figura 3. 17: SER con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 16-QAM.	27
Figura 3. 18: Diagrama de constelaciones de la modulación 32-QAM en el sistema OFDM.	28
Figura 3. 19: Errores por símbolo con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 32-QAM.	29
Figura 3. 20: SER con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 32-QAM.	29
Figura 3. 21: Gráfica comparativa de las modulaciones 4-QAM, 16-QAM y 32-QAM en el sistema OFDM utilizando canal AWGN.	30
Figura 3. 22: Gráfica comparativa de las modulaciones M-PSK y M-QAM en el sistema OFDM.	31

Índice de Tablas

Capítulo 3

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación QPSK.....	15
Tabla 3. 2: Parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 16-PSK.	17
Tabla 3. 3: Parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 32-PSK.	19
Tabla 3. 4: Parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 4-QAM.	23
Tabla 3. 5: Parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 16-QAM.	25
Tabla 3. 6: Parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 32-QAM.	28

Resumen

En este trabajo de examen complejo se realiza el diseño y simulación de la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) que permitió el estudio y evaluación del rendimiento del sistema OFDM utilizando esquemas de modulación digital. En el capítulo 2 se muestra la descripción teórica de la multiplexación, modulación y demodulación en sistemas de comunicación. Es muy importante evaluar el desempeño del sistema de comunicación inalámbrico y verificar la eficiencia y calidad de los servicios que puede brindar. El sistema OFDM fue implementada en el software de simulación Matlab, y se obtiene la tasa de error de bits (BER) a diferentes valores de relación señal/ruido (SNR) para las técnicas de modulación digital PSK y QAM. EL software de simulación MatLab es ampliamente utilizado como herramienta de medición del rendimiento, BER indica la cantidad de bits eliminados a medida que los datos se mueven desde el origen al destino, y se utiliza el canal AWGN (ruido blanco gaussiano aditivo) como canal de transmisión.

Palabras claves: Multiplexación, Codificación, Rendimiento, OFDM, BER, SNR

Capítulo 1: Descripción General

1.1. Introducción.

En un canal de radio terrestre, la señal transmitida llega al receptor a través de múltiples rutas de propagación, todas con un retardo relativo y una ganancia diferentes. Esto produce interferencia entre símbolos (ISI) y degrada el rendimiento del sistema. La multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) se puede utilizar para superar la selectividad de frecuencia de canal, pero requiere una estimación de canal (CE) precisa para una detección coherente.

Existen diversas propuestas de esquemas de CE para OFDM, en los que las señales piloto se multiplexan en el tiempo (TDM) o en el dominio de la frecuencia (FDM). En un canal con desvanecimiento, el rendimiento de un sistema OFDM con CE que utiliza un piloto TDM se degrada rápidamente siempre que el canal tiene una variación de tiempo significativa. Por otro lado, el CE con un piloto FDM mejora el seguimiento frente a un desvanecimiento rápido, pero el rendimiento se degrada, ya que el ruido se extiende por todas las subportadoras debido a la interpolación.

El principal inconveniente de OFDM es su alta relación de potencia pico a promedio (PAPR), que hace que el sistema sea muy sensible a las distorsiones no lineales causadas por componentes analógicos, como un amplificador de alta potencia (HPA), así como digital a digital. convertidores analógicos (DA) y analógicos a digitales (AD).

Por lo general, se supone que los convertidores DA y AD tienen un gran número de niveles de cuantificación y un rango dinámico explotado de manera óptima. Debido a tales suposiciones, el ruido de cuantificación (que representa la granularidad del cuantificador) y el ruido debido a la limitación de amplitud (correspondiente a la distorsión por sobrecarga) pueden despreciarse.

Sin embargo, en una implementación real, para mantener la complejidad del sistema y el consumo de energía bajos, es deseable mantener la

resolución de los convertidores DA/AD lo más baja posible. Los requisitos de cuantificación son más altos en el extremo del receptor, en particular para canales muy selectivos en frecuencia.

1.2. Definición del problema.

Necesidad de implementar algoritmos del sistema OFDM utilizando diferentes esquemas de modulación en el software MatLab/Simulink.

1.3. Objetivos del Problema de Investigación.

1.3.1. Objetivo General.

Realizar el análisis comparativo de escenarios de simulación de esquemas de modulación PSK y QAM sobre sistema OFDM mediante MatLab/Simulink.

1.3.2. Objetivos Específicos.

- Describir los fundamentos teóricos de los sistemas de modulación analógica y digital.
- Realizar el diseño de los escenarios de simulación del sistema OFDM para los esquemas de modulación PSK y QAM.
- Evaluar los resultados obtenidos en los escenarios de simulación en el sistema OFDM utilizando MatLab/Simulink.

Capítulo 2: Fundamentos Teóricos

Este capítulo se utiliza para clasificar los diversos tipos de modulación, objetos de estudio detallados disponibles, resumiendo sus usos y principios.

2.1. Modulación de la señal.

En telecomunicaciones, la señal que transporta información debe pasar a través de un medio de transmisión entre un transmisor y un receptor. La señal rara vez es adecuada para la transmisión directa por el canal de comunicación elegido, inalámbrico, alámbrico u óptico. La modulación puede definirse como el proceso mediante el cual la señal se transforma de su forma original a una forma adecuada para el canal de transmisión, por ejemplo, mediante la fluctuación de los parámetros de amplitud y argumento (fase/frecuencia) de una onda llamada portadora sinusoidal. (Carrión Romero, 2015)

El sistema que realiza esta modulación, generalmente electrónico, es un modulador (ver módem). La operación inversa para extraer la señal de la portadora es la demodulación. (Sig-Tú Toral, 2014)

2.2. Descripción general de la modulación y demodulación en sistemas de comunicación.

La modulación y demodulación son un paso en la comunicación de información entre dos usuarios. A modo de ejemplo, para que dos usuarios de correo electrónico se comuniquen a través de una línea telefónica, es necesario un software, una computadora, protocolos, un modulador y un demodulador. La línea telefónica (cobre o fibra óptica) es el canal de transmisión, su ancho de banda se reduce, se ve afectada por atenuaciones y distorsiones. (Burbano Báez, 2016)

Por ejemplo, la modulación convierte la información binaria de los protocolos y el software en voltaje y corriente en la línea. El tipo de modulación utilizado debe adaptarse por un lado a la señal (en este caso digital), a las

prestaciones solicitadas (tasa de error), así como a las características de la línea.

En consecuencia, la modulación permite traducir el espectro del mensaje a un dominio de frecuencia más adecuado a los medios de propagación y asegurar, después de la demodulación, la calidad requerida por las otras capas del dispositivo. El objetivo de las modulaciones analógicas es asegurar una calidad suficiente de transmisión de información analógica (voz, música, imagen) dentro de los límites del canal utilizado y de la aplicación. (Rey Micolau & Tarrés Ruiz, 2021)

El objetivo de las modulaciones digitales es asegurar una tasa máxima de datos binarios, con una tasa de error aceptable para los protocolos y correctores ascendentes y descendentes. En la pila de protocolos OSI (arquitectura estándar de telecomunicaciones digitales), la modulación es el elemento principal de la capa física. Un módem es un conjunto combinado de modulador y demodulador que ofrece la posibilidad de un enlace bidireccional.

La primera modulación fue el corte de amplitud por todo o nada, descubierto por Samuel Morse para enlaces telegráficos cableados, pero al igual que la transmisión directa de la voz por un cable telefónico, estas no son modulaciones estrictamente hablando. Con el descubrimiento de las ondas de radio, la modulación de amplitud de la onda portadora fue el primer dispositivo utilizado, ya sea en radiotelegrafía (CW) o en radiotelefonía (AM).

Las primeras transmisiones de televisión también fueron en AM, luego complementadas con métodos de reducción de banda (reducción de una banda lateral) y luego con la adición de una subportadora de transmisión de color. Las emisiones de la banda "FM" utilizan modulación de frecuencia para el canal monoaural y una subportadora para la transmisión de sonido estereofónico y datos "RDS". Los módems para redes domésticas o comerciales combinan la modulación analógica y digital de una subportadora para transportar datos.

2.3. Sistemas de modulación

Cuando varias informaciones o señales independientes pasan por un mismo canal, utilizando varias modulaciones o subportadoras, se habla de un "sistema de modulación". Así, en televisión, el sonido se transmite mediante la modulación de amplitud (AM) de una primera portadora, la imagen mediante modulación de amplitud de banda lateral reducida en una portadora principal y el componente de color mediante modulación de frecuencia o fase, una subportadora.

2.4. Multiplexación

El proceso de modulación puede incluir transmisiones multiplexadas a través de un medio de propagación común, es decir, transmisiones simultáneas de diferentes mensajes que tienen espectros disjuntos durante la propagación. Uno de los tipos de multiplexación es la multiplexación por división de frecuencia (FDM), un proceso en el que cada mensaje modula una portadora de alta frecuencia y todas las portadoras se transmiten simultáneamente a través del mismo medio.

Un ejemplo de multiplexación es la transmisión de televisión por satélite analógica, donde cada canal está modulado en frecuencia por la señal de vídeo, esta última contiene tanto una subportadora del dispositivo de color (PAL en Europa) como un múltiplex de las subportadoras de los varios programas de sonido de radio y televisión.

2.5. Modulaciones analógicas.

En la modulación analógica, la modulación se aplica a la portadora o subportadora en proporción a la señal a transmitir, modificando la amplitud o el argumento de la onda sinusoidal. La modulación se define formalmente como el proceso mediante el cual se varía alguna característica de una portadora de acuerdo con una onda moduladora. La señal de banda base se denomina onda moduladora y el resultado del proceso de modulación se denomina onda modulada.

Para (Haykin, 2003) en la modulación analógica o de onda continua (Continuous Wave, CW) la onda moduladora consta de una señal analógica (por ejemplo, señal de voz, señal de vídeo) y la portadora consta de una onda sinusoidal. Básicamente, existen dos tipos de modulación analógica: modulación de amplitud y modulación angular. En la modulación de amplitud, la amplitud de la onda portadora sinusoidal se varía de acuerdo con la señal de banda base. En la modulación angular, por otro lado, el ángulo de la onda portadora sinusoidal se varía de acuerdo con la señal de banda base. A continuación, se describen los tipos de modulación analógica.

2.5.1. Modulación de amplitud y doble banda lateral.

La modulación de amplitud resultante directamente de la multiplicación de la onda portadora por la señal (DSB) se compone espectralmente de la portadora, enmarcada por dos bandas laterales que reproducen el espectro desplazado de la señal, tal como se muestra en la figura 2.1.

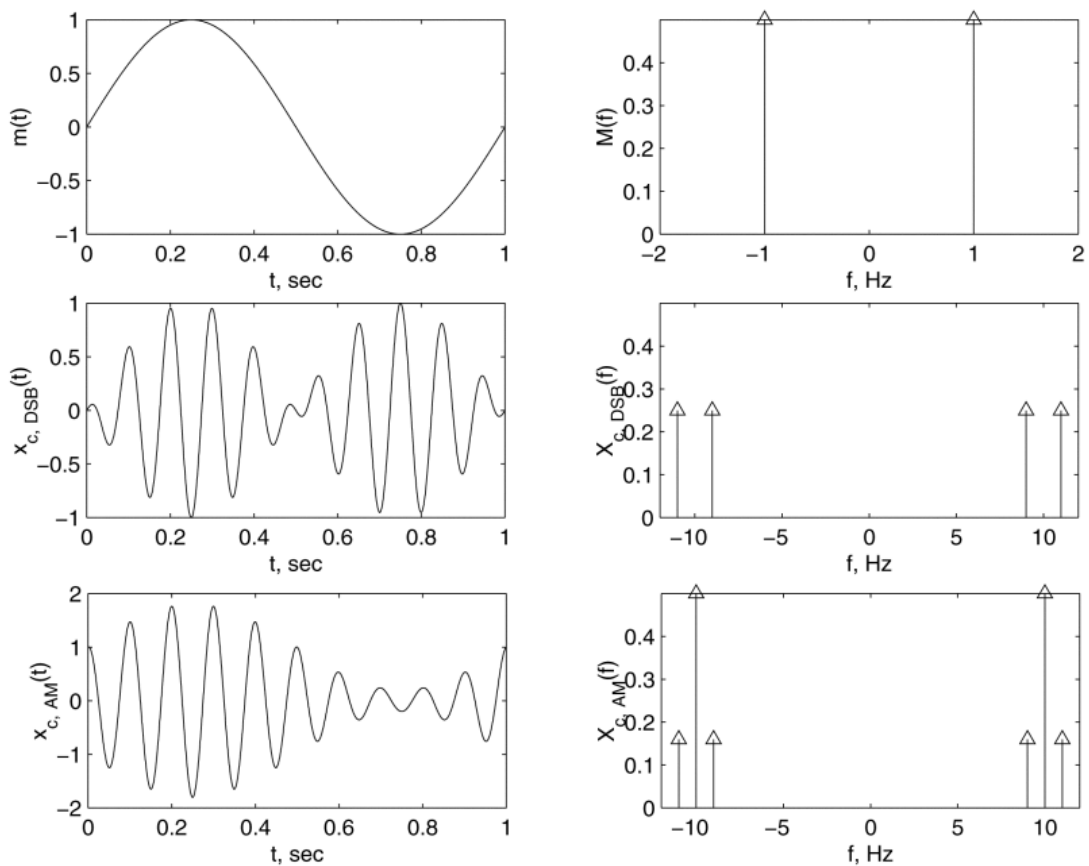


Figura 2. 1: Formas de onda y espectros para la modulación DSB y modulación AM.

Fuente: (Ziemer, 2002)

Para aumentar la eficiencia energética de la transmisión se puede eliminar la portadora gracias a un modulador balanceado, se trata de la modulación de amplitud con portadora suprimida (DSB-SC), poco utilizada salvo en multiplexación de doble banda lateral independientes. (Usman et al., 2019)

El DSB-SC no permite restaurar la fase de la señal, se necesita una portadora residual para restaurar con precisión la portadora en la demodulación: este es el objetivo de la DSB-SC. Una aplicación práctica realizada por Li & Yao, (2004) en la que muestra la comparativa del espectro óptico (véase la figura 2.2) de las modulaciones DSB y DSB-SC. La señal de modulación de RF tiene una frecuencia de 6 GHz, la portadora óptica modulada en ambos esquemas ha viajado a lo largo de la fibra monomodo (Single-Mode Fiber, SMF).

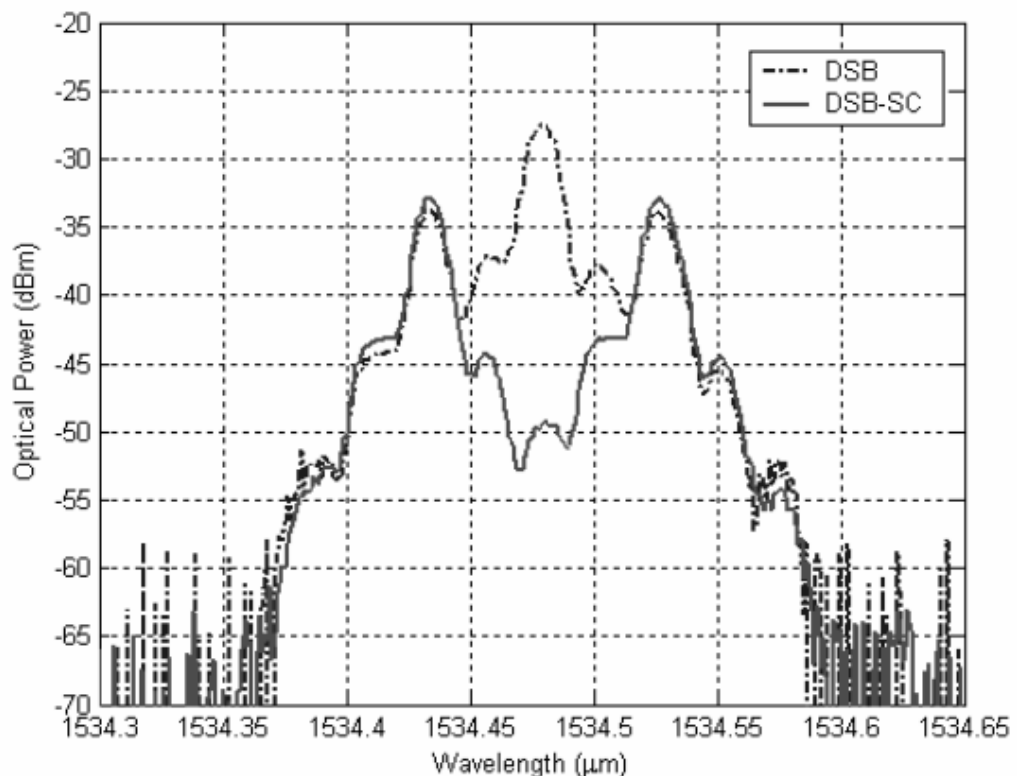


Figura 2. 2: Espectros ópticos de las modulaciones DSB-SC y DSB.
Fuente: (Li & Yao, 2004)

2.5.2. Modulación de amplitud de banda lateral única (SSB)

La modulación de banda lateral única (SSB) corresponde a una modulación de amplitud de la cual solo se mantiene un lado, banda superior

o inferior, se denomina BLS (USB) o BLI (LSB) dependiendo de la banda transmitida. La SSB se utiliza en radiotelefonía HF y VHF y en modulación multiplex de microondas. Para permitir la restauración de fase de la señal, se agrega una portadora residual y cuya modulación es banda lateral única con portadora reducida (SSB-RC).

La SSB es especialmente adecuado para la transmisión de señales de voz, ya que el contenido de frecuencia de la voz humana tiene una gran brecha de energía entre 0 y 200 Hz. Este método de modulación requiere la menor cantidad de potencia y ancho de banda; sin embargo, también tiene una complejidad relativamente alta asociada con la modulación y demodulación.

Teóricamente la forma más sencilla de crear una señal modulada SSB es crear una señal DSB-SC y luego suprimir una banda lateral filtrándola. Sin embargo, esto requiere un cambio de fase de un filtro extremadamente preciso que puede resultar prohibitivo. Siendo realistas, es más fácil construir un circuito que duplique la señal DSB-SC y la cambie de fase en 90° . Luego se combina con la señal original para cancelar una banda lateral por completo. La desventaja de este método es que el circuito solo funcionará para un pequeño ancho de banda de señales sin ser reconfigurado.

En la modulación de banda lateral reducida (VSB) una de las bandas laterales se trunca para reducir la ocupación espectral, al tiempo que da la posibilidad de transmisión de la componente continua de la señal: esta es la modulación utilizada en la televisión terrestre.

2.6. Modulaciones angulares.

Las modulaciones de frecuencia y fase cambian el argumento (o ángulo) de la onda sinusoidal. La onda resultante mantiene una amplitud constante, lo que permite el uso de amplificadores no lineales y reduce la influencia de perturbaciones aditivas (ruido, pulsos e interferencias).

La modulación de frecuencia (FM) se utiliza para restaurar el componente continuo de la señal, se utiliza en la transmisión de alta fidelidad (banda "FM"), en la transmisión de televisión por satélite y en la transmisión analógica de imágenes (símil de radio, SSTV).

La modulación de fase (PM) se utiliza en radiotelefonía VHF y UHF. Una modulación de fase precedida por filtrado es equivalente a la modulación de frecuencia, esta es también otra forma de modulación de frecuencia en radiotelefonía.

2.7. Modulaciones digitales.

En esta sección se describen brevemente los esquemas de modulación por desplazamiento de fase (Phase Shift Keying, PSK) y la modulación por amplitud de cuadratura (Quadrature Amplitude Modulation, QAM).

2.7.1. Revisión general del esquema de modulación PSK.

La modulación por desplazamiento de fase (PSK) es otra forma de modulación digital de amplitud constante modulada en ángulo. La forma más simple de PSK es la codificación por desplazamiento de fase binaria (Binary PSK, BPSK), donde $N = 1$ y $M = 2$. Por lo tanto, con BPSK, son posibles dos fases ($2^1 = 2$) para la portadora. Una fase representa un "1" lógico y la otra fase representa un "0" lógico. A medida que la señal digital de entrada cambia de estado (es decir, de 1 a 0 o de 0 a 1), la fase de la portadora de salida cambia entre dos ángulos separados por 180° . La señal resultante se pasa a través de un filtro para limitar su ancho de banda y luego se multiplica por el $\cos \omega t$ de la señal portadora, tal como se muestra en la figura 2.3. El diagrama de constelación de señales para el esquema de modulación BPSK se muestra en la figura 2.4.

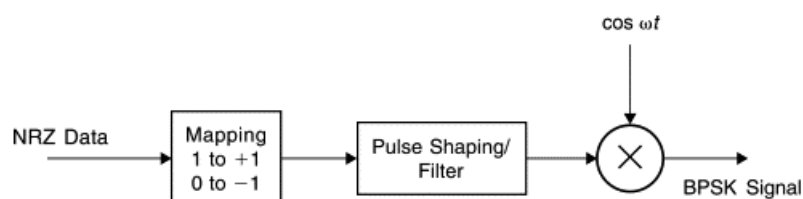


Figura 2. 3: Diagrama de bloques del modulador BPSK.

Fuente: (Garg, 2007; Garg & Wang, 2005)

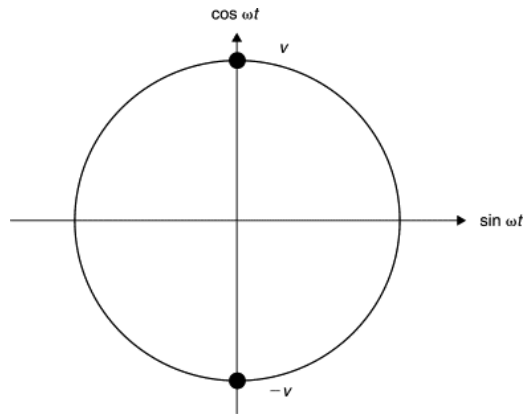


Figura 2. 4: Diagrama de constelación de la modulación BPSK.
Fuente: (Garg, 2007; Garg & Wang, 2005)

Por lo tanto, otros nombres para BPSK son codificación por inversión de fase (PRK) y modulación bifásica. BPSK es una forma de modulación de onda cuadrada de una señal de onda continua (CW).

2.7.2. Revisión general del esquema de modulación QAM.

QAM es un formato de modulación que combina dos portadoras cuyas amplitudes se modulan de forma independiente con la misma frecuencia óptica y cuyas fases están separadas 90° . Estos portadores se denominan portadores en fase (I) y portadores de fase en cuadratura (Q). La modulación QAM puede asignar estados usando I y Q, que se denomina QAM. La figura 2.5 muestra mapas de constelaciones para el esquema 16-QAM y OOK convencional. Se observa que una señal QAM procesa N bits en un solo canal, por lo que puede obtener N veces la eficiencia espectral del esquema OOK.

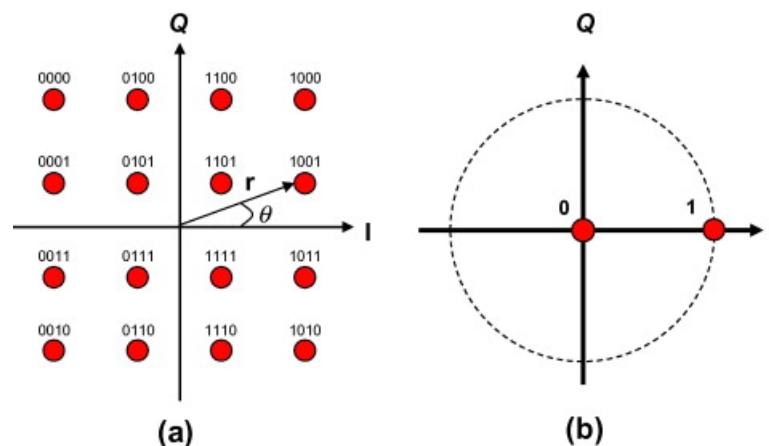


Figura 2. 5: Diagrama de constelación de la modulación (a) 16-QAM y (b) OOK.
Fuente: (Nakazawa et al., 2013)

Capítulo3: Diseño, Implementación y Análisis de Resultados

3.1. Descripción general de la implementación del sistema OFDM.

En los sistemas de comunicación, el tipo más común de ruido agregado sobre el canal es el ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN). Es aditivo porque la señal recibida es igual a la señal transmitida más el ruido. Es de color blanco porque tiene una densidad espectral de potencia constante. Es gaussiana porque su función de densidad de probabilidad se puede modelar con precisión para que se comporte como una distribución gaussiana. Es ruido porque distorsiona la señal recibida. Porque el ancho de banda de la señal es muy inferior en comparación con el ancho de banda del canal AWGN. Cuanto mayor es la varianza del ruido, mayor es la desviación de los símbolos recibidos con respecto al conjunto de constelaciones y, por tanto, mayor es la probabilidad de demodular un símbolo incorrecto y cometer errores.

OFDM es una técnica eficaz para mitigar los efectos de la dispersión del retardo en los canales de desvanecimiento selectivo de frecuencia. El principio básico de OFDM es dividir el flujo de datos alto en un número de flujos de datos de menor velocidad, que se transmiten simultáneamente a través de varias subportadoras. Usando la técnica de modulación multiportadora superpuesta, se puede ahorrar casi el 50% del ancho de banda. En un sistema OFDM, el procesamiento IFFT y FFT se utilizan en la modulación y demodulación de las señales. Un atributo importante de este esquema es la extensión de un desvanecimiento sobre muchos bits. En lugar de tener algunos bits adyacentes completamente destruidos, ahora se tendrá todos los bits ligeramente afectados por un desvanecimiento.

En este capítulo se investiga el rendimiento del sistema de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM), para diferentes esquemas de modulación digital, como PSK y QAM sobre canales de ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN). El software de simulación MatLab R2018a se utiliza para obtener resultados y calcular la tasa de error de símbolos (SER) para diferentes valores de relación señal a ruido (SNR). La figura 3.1 muestra el diseño del sistema OFDM (transmisor y receptor)

utilizando el canal AWGN implementado en el software de simulación MatLab/Simulink. El canal AWGN modela la comunicación inalámbrica.

Los esquemas de modulación propuestos son capaces de entregar más bits por símbolo, también son más inmunes a los errores causados por el ruido y la interferencia en el canal. Además, se pueden producir fácilmente errores a medida que aumenta el número de usuarios y el terminal móvil está sujeto a movilidad. Por lo tanto, ha impulsado muchas investigaciones sobre la aplicación de modulaciones de orden superior.

Los bloques de modulación y demodulación digital (PSK y QAM) serán modificados en los dos escenarios de simulación propuestos (MatLab/Simulink) y en cada uno hay tres variantes de los esquemas de modulación M-aria PSK y M-aria QAM. La variante M en cada esquema propuesto será 4, 16 y 32. Es decir que los esquemas de modulación a evaluarse en las siguientes secciones son: QPSK (4-PSK), 16-PSK, 32-PSK, 4-QAM, 16-QAM y 32-QAM. Las secciones 3.2 y 3.3 muestran los dos escenarios de simulación para la modulación M-PSK y M-QAM, respectivamente.

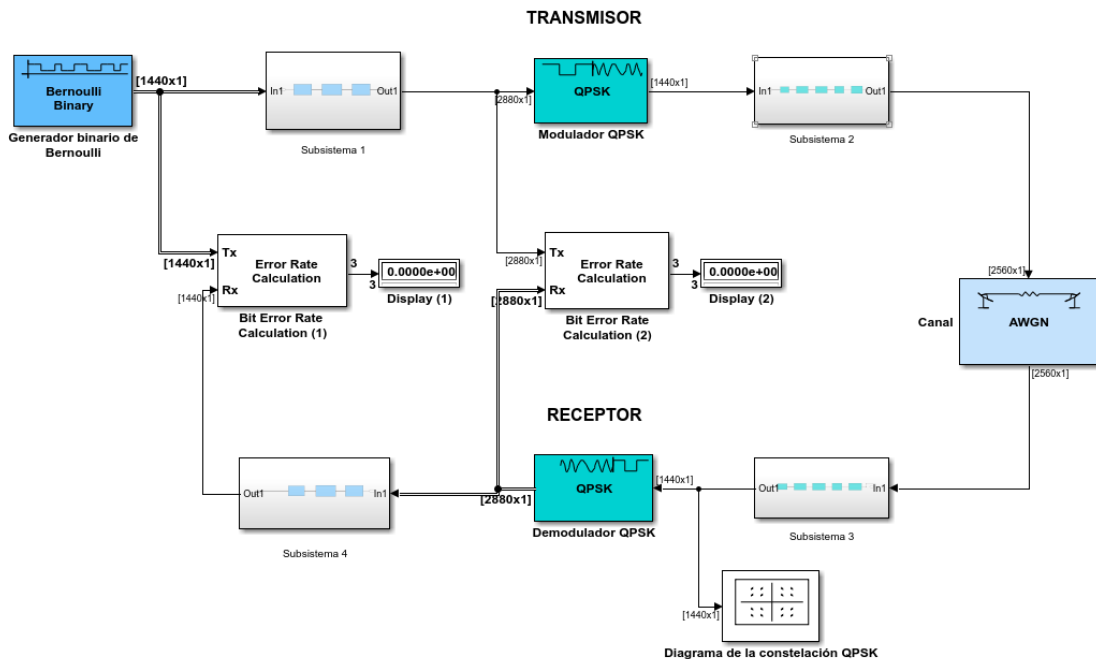


Figura 3. 1: Implementación del sistema de Tx y Rx OFDM utilizando esquemas de modulación digital.

Elaborado por: Autor.

En este componente práctico del examen complejo se ha considerado la minimización de la tasa de errores de símbolos (SER) con respecto a la relación señal/ruido (S/N) para el sistema OFDM utilizando variantes de modulación M-PSK y M-QAM. Se evalúa el rendimiento del sistema OFDM en dos escenarios de simulación diferentes. En AWGN, la tasa de error de bits (SER) generalmente aumenta, por lo que, en este trabajo, se demuestra la minimización del ruido de AWGN.

3.2. Escenario 1: sistema OFDM utilizando esquema de modulación PSK.

El esquema PSK es la forma de modulación más eficiente desde el punto de vista de relación señal a ruido (S/N o E_b/N) frente a tasa de error de símbolos (SER). Se emplea muy a menudo para modular la señal de ensanchamiento pseudoaleatorio en aplicaciones de espectro ensanchado de secuencia directa y en otros sistemas de alta velocidad de datos común en las comunicaciones inalámbricas en general.

Las subsecciones 3.2.1 a 3.2.3 se analizan los resultados obtenidos del sistema OFDM (implementado en la figura 3.1) utilizando tres esquemas de modulación, que son QPSK, 16-PSK y 32-PSK, sobre el canal AWGN. Para cada esquema de modulación se evalúa el desempeño del sistema OFDM para una relación S/N entre 0 y 35 dB para cada modulación QPSK, 16-PSK y 32-PSK.

3.2.1. Análisis de resultados de la modulación QPSK.

En la figura 3.1 se observa la implementación del transmisor (Tx) y receptor (Rx) del sistema OFDM (muy utilizado en comunicaciones inalámbricas de alta velocidad) sobre el entorno de simulación Simulink. Pero tanto el Tx como Rx son programados en el script de MatLab y ejecutado desde el entorno de simulación Simulink. El diseño en Simulink y la programación en MatLab son parte primordial del sistema OFDM utilizando la modulación QPSK. En la tabla 3.1 se presentan los parámetros de simulación del sistema OFDM utilizan la modulación QPSK.

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación QPSK.

Datos binarios de entrada	64000
No. de símbolos	32000
Longitud FFT	64
Prefijo cíclico	10
No. de tramas	500
Tamaño de trama	64

Elaborado por: Autor.

Lo que primero se debe verificar en el sistema OFDM implementado en Simulink es el diagrama de constelaciones del esquema de modulación QPSK. La figura 3.2 muestra cuatro puntos en el diagrama de constelaciones obtenido por la modulación QPSK en el sistema OFDM. Es decir, que el diseño de la modulación QPSK representa correctamente los cuatro puntos de constelación (2 valores para I y 2 valores para Q).

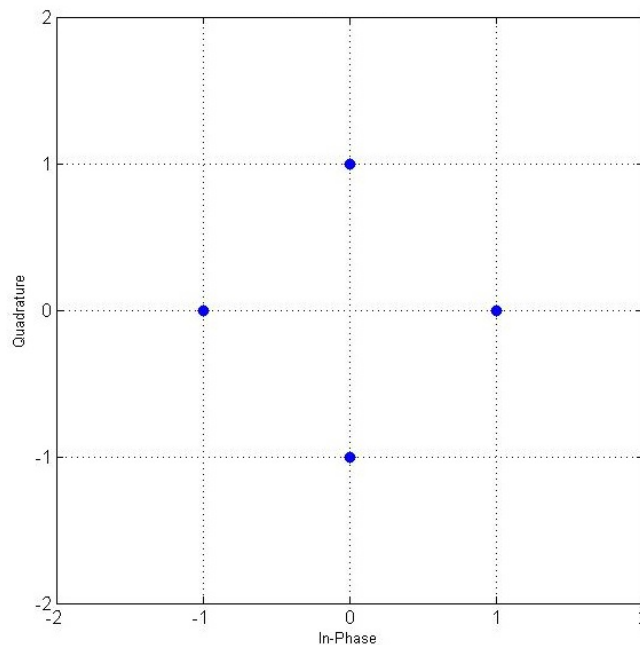


Figura 3. 2: Diagrama de constelaciones de la modulación QPSK en el sistema OFDM.

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.3 se muestran los errores por símbolos contra la relación S/N. Para una S/N de 35 dB se tiene 0 errores por símbolo, pero si la S/N es

5 dB se tienen 12500 errores por símbolo. Es decir, que a mayor S/N menor será el número de errores por símbolo que se tiene en la modulación QPSK.

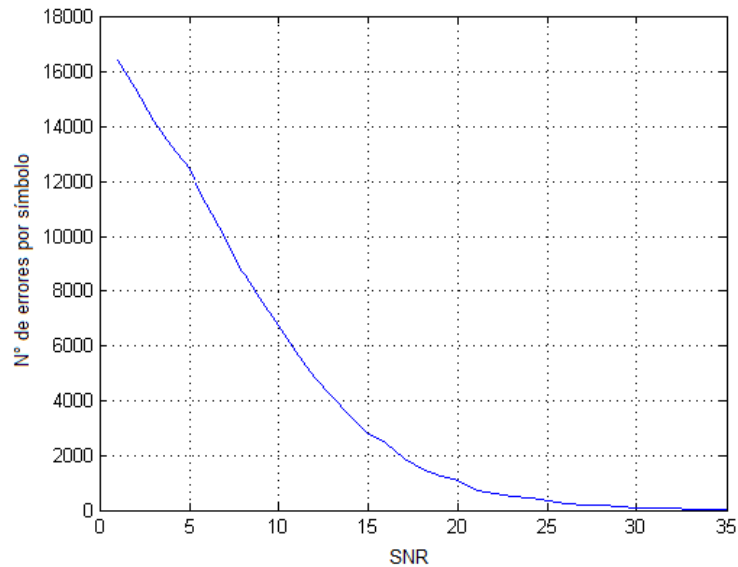


Figura 3. 3: Errores por símbolo con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación QPSK.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.4 muestra la gráfica en escala logarítmica de la SER frente a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación QPSK. Para una relación S/N de 35 dB la SER es igual a 0.002, y si la SNR es 5 dB la SER es igual a 0.4. Por lo tanto, para la modulación QPSK se puede deducir que al incrementar la relación S/N disminuye la SER.

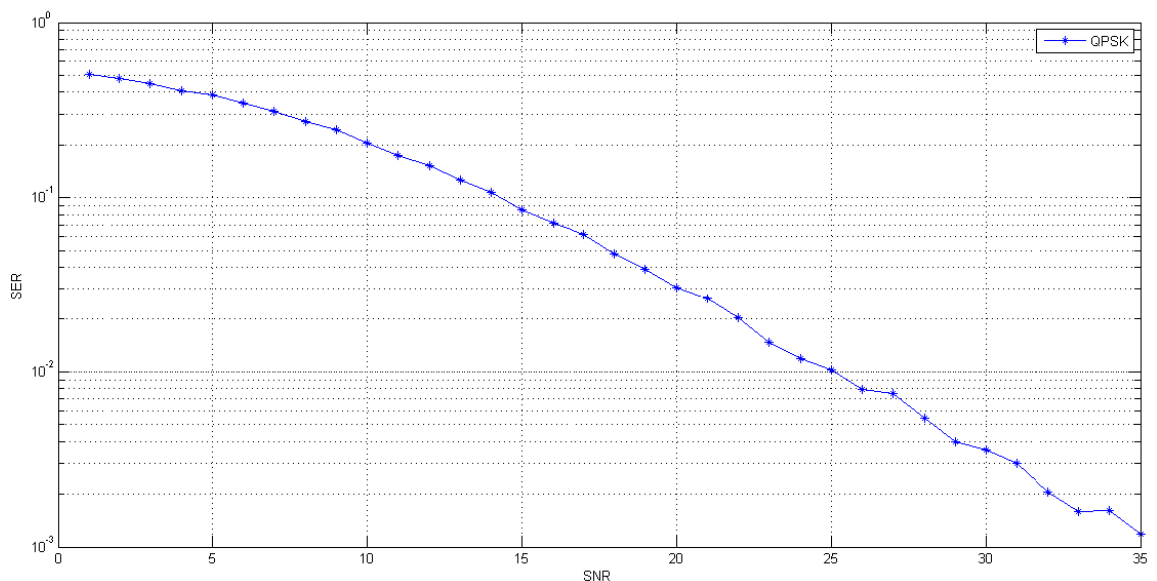


Figura 3. 4: SER con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación QPSK.
Elaborado por: Autor.

Finalmente, el sistema OFDM con modulación QPSK tiene la tasa de transmisión de datos con relación a la modulación BPSK. Aunque, el inconveniente principal de la modulación QPSK es la complejidad de los transmisores y receptores.

3.2.2. Análisis de resultados de la modulación 16-PSK.

De manera similar a la sección 3.2.1 tanto el transmisor como receptor son modificados los bloques en Simulink y la programación del script de MatLab para el esquema 16-PSK. Como resultado, la modulación 16-PSK (véase la figura 3.5) se ha convertido en una modulación adecuada para aplicaciones que requieren altas velocidades de datos. En la tabla 3.2 se presentan los parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 16-PSK.

Tabla 3. 2: Parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 16-PSK.

Datos binarios de entrada	64000
No. de símbolos	16000
Longitud FFT	64
Prefijo cíclico	10
No. de tramas	250
Tamaño de trama	64

Elaborado por: Autor.

La figura 3.5 muestra el diagrama de constelaciones de la modulación 16-PSK para el sistema OFDM en la que se puede observar 16 puntos en un círculo con fase $\pm 22.5^\circ$ y el demodulador tiene solo con fase de $\pm 11.25^\circ$ para detección de los símbolos.

La figura 3.6 muestra los errores de símbolos con respecto a la relación señal/ruido (S/N) para la modulación 16-PSK en el sistema OFDM. La gráfica analiza la relación S/N entre 0 y 35 dB. Se puede ver que para una relación S/N de 35 dB se tiene 250 errores por símbolos (mayor que en la modulación QPSK, ver sección 3.2.1) y para una relación S/N de 5 dB se tiene 13000 errores por símbolos (mayor que en la modulación QPSK)

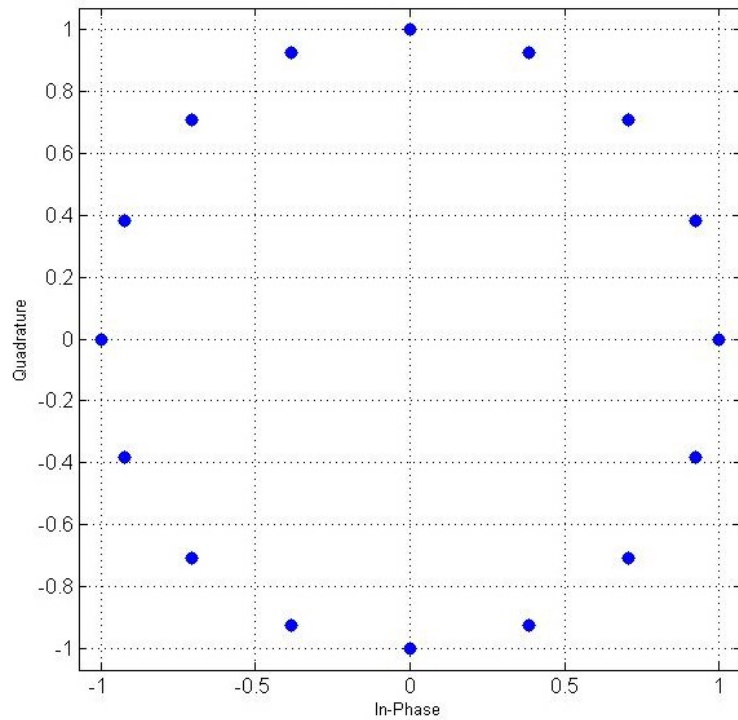


Figura 3. 5: Diagrama de constelaciones de la modulación 16-PSK en el sistema OFDM.

Elaborado por: Autor.

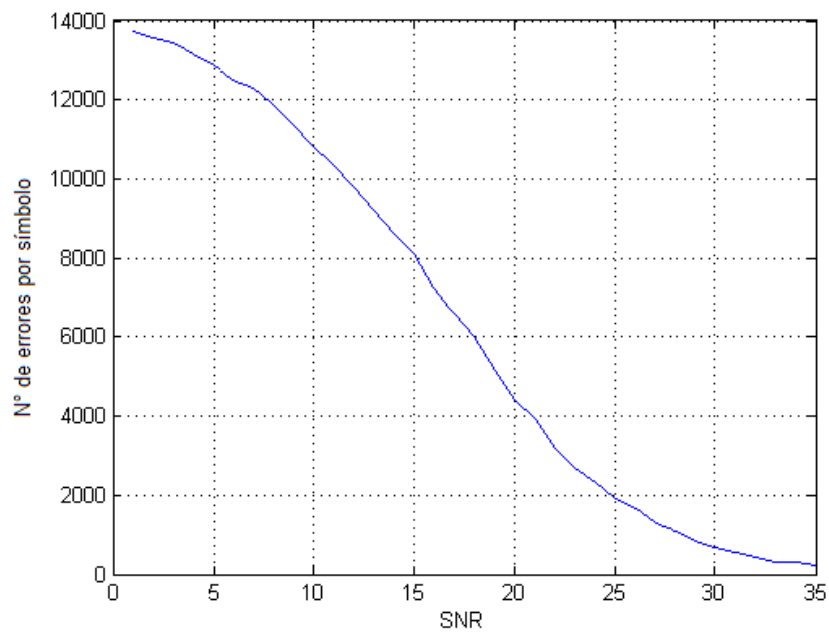


Figura 3. 6: Errores por símbolo con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 16-PSK.

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.7 se muestra la gráfica en escala logarítmica de la SER en el intervalo de la relación $0 \text{ dB} \leq S/N \leq 35 \text{ dB}$ para el sistema OFDM utilizando

la modulación 16-PSK. Para una relación S/N de 5 dB se tiene una SER igual a 0.9, pero para una relación S/N de 35 dB se tiene una SER igual a 0.18.

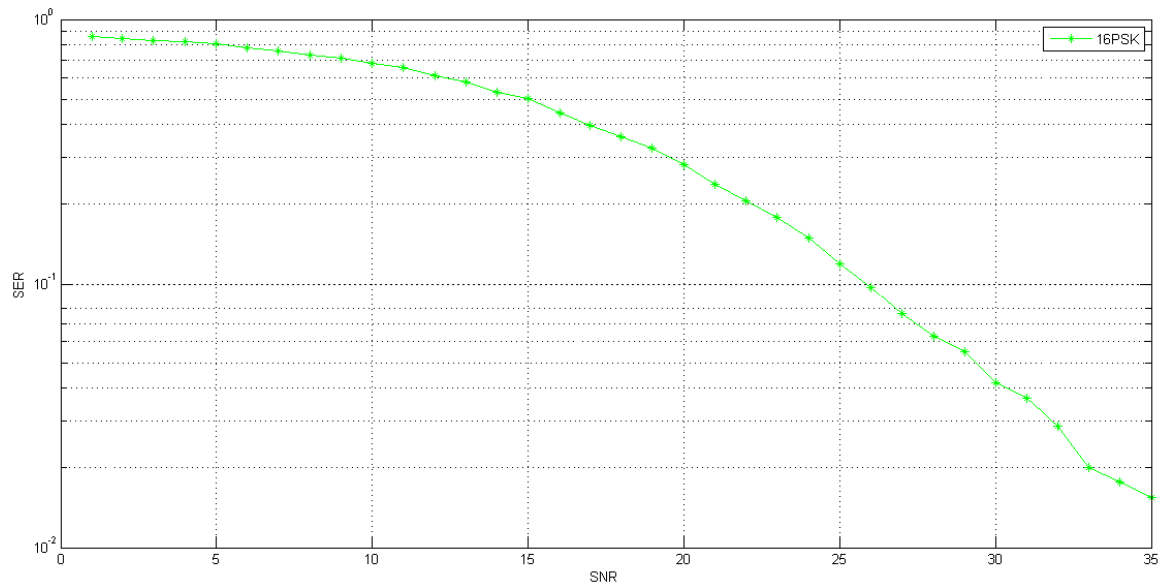


Figura 3. 7: SER con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 16-PSK.
Elaborado por: Autor.

3.2.3. Análisis de resultados de la modulación 32-PSK.

De manera similar a las secciones 3.2.1 y 3.2.2 tanto el transmisor como receptor son modificados los bloques en Simulink y la programación del script de MatLab para el esquema 16-PSK. Como resultado, la modulación 32-PSK (véase la figura 3.8) se ha convertido en una modulación adecuada para aplicaciones que requieren altas velocidades de datos. En la tabla 3.3 se presentan los parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 32-PSK.

Tabla 3. 3: Parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 32-PSK.

Datos binarios de entrada	64000
No. de símbolos	12800
Longitud FFT	64
Prefijo cíclico	10
No. de tramas	200
Tamaño de trama	64

Elaborado por: Autor.

La figura 3.8 muestra el diagrama de constelaciones de la modulación 32-PSK para el sistema OFDM en la que se puede observar 32 puntos en un círculo con una fase de $\pm 11.25^\circ$, mientras que en el receptor el demodulador 32-PSK tiene una fase de $\pm 5.625^\circ$ que permite la detección de los símbolos.

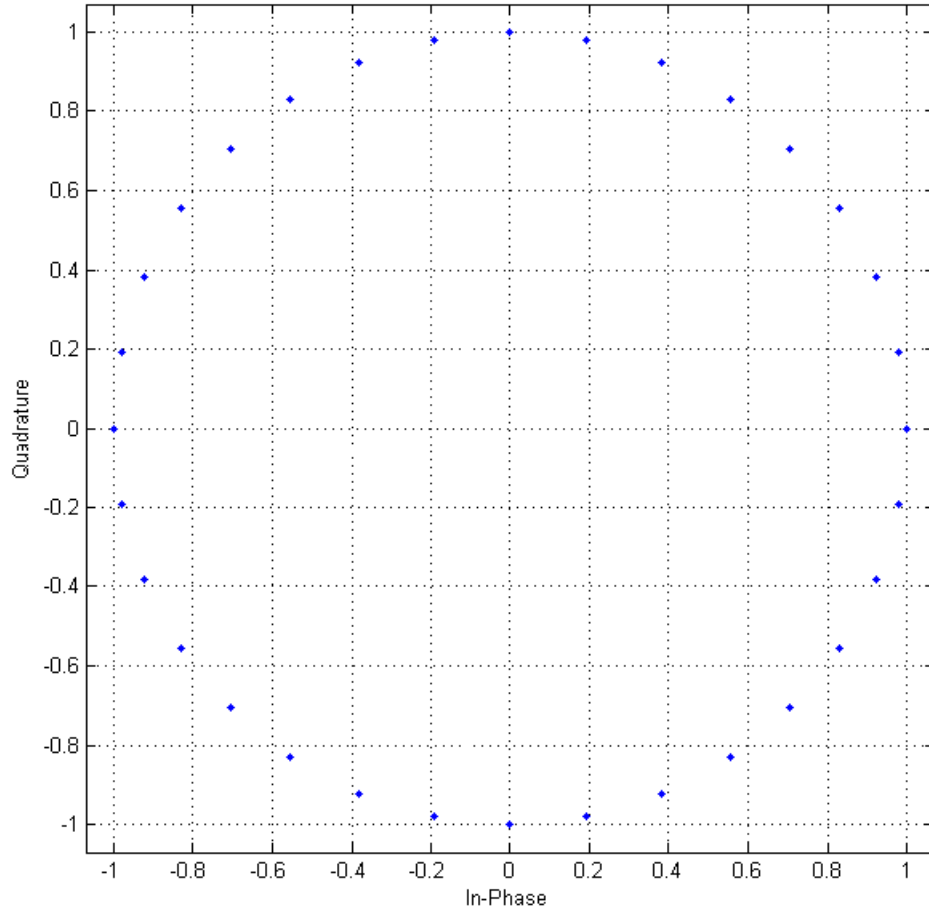


Figura 3. 8: Diagrama de constelaciones de la modulación 32-PSK en el sistema OFDM.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.9 muestra los errores por símbolo frente a la relación señal/ruido (S/N) del sistema OFDM utilizando la modulación 32-PSK. Se observa en la figura 3.9, por ejemplo, (1) para una relación S/N = 5 dB se tienen 11800 errores por símbolo, (2) para una relación S/N = 15 dB se tienen 9300 errores por símbolo, (3) para una relación S/N = 25 dB se tienen 4000 errores por símbolo, y (4) para una relación S/N = 35 dB se tienen 800 errores por símbolo. Es decir, que a medida que la relación S/N se incrementa, la cantidad de errores por símbolo disminuyen significativamente. En consecuencia, se cumple con la característica principal de minimizar los errores por símbolo en el sistema OFDM utilizando la modulación 32-PSK.

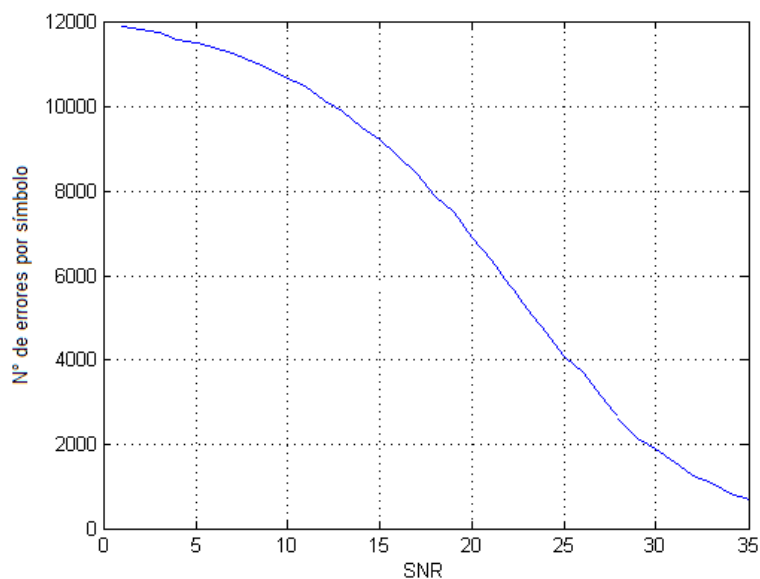


Figura 3. 9: Errores por símbolo con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 32-PSK.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.10 muestra la SER frente a la relación S/N. Se observa que, (1) para una relación S/N = 5 dB se tiene una SER = 1, (2) para una relación S/N = 15 dB se tiene una SER = 0.7, y (3) para una relación S/N = 35 dB se tiene una SER = 0.051. Es decir, que mientras mayor sea la relación S/N, menor será la tasa de error de bits (SER).

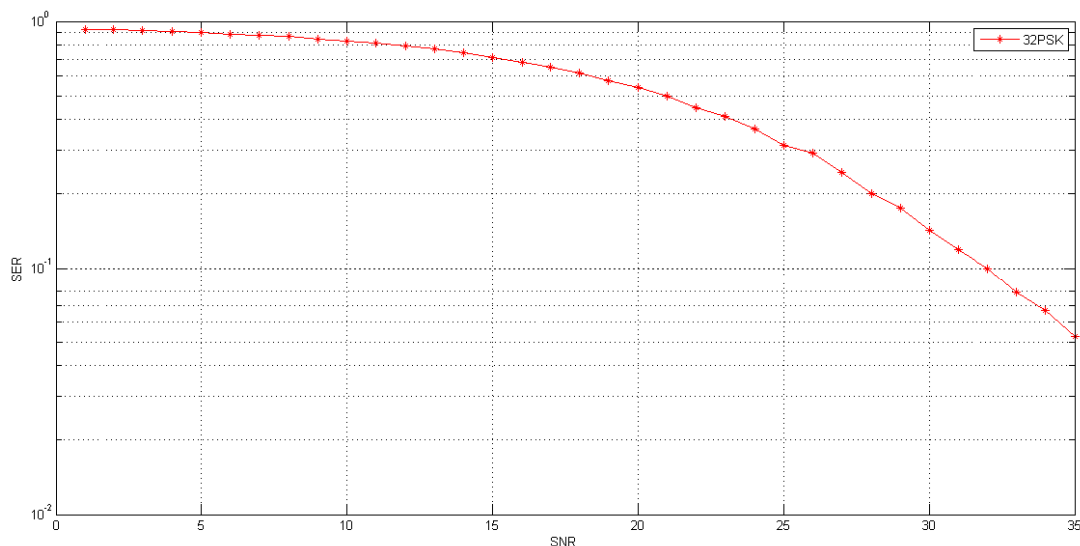


Figura 3. 10: SER con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 32-PSK.
Elaborado por: Autor.

En la gráfica mostrada por la figura 3.11 se observan las señales comparativas de las modulaciones QPSK, 16-PSK y 32-PSK evaluadas en el

sistema OFDM implementado en la figura 3.1. La figura 3.11 comparativa analiza la SER con respecto a la relación S/N, cabe indicar que las medidas de este tipo de gráficas tienen una escala algorítmica (véase las figuras 3.4, 3.7 y 3.10). Se observa que cuanto mayor sea el nivel M de la modulación PSK (M-PSK), mayor será la SER. Por ejemplo, el esquema de modulación 32-PSK es la de mayor SER, pero tiene una mayor tasa de transmisión de datos siempre que utilice menor ancho de banda del canal AWGN. Por lo tanto, para una mayor tasa de transmisión de datos es necesario utilizar esquemas de modulación de niveles más altos y para una pérdida mínima de tasa de transmisión de datos es necesario utilizar esquemas de modulación de niveles bajos.

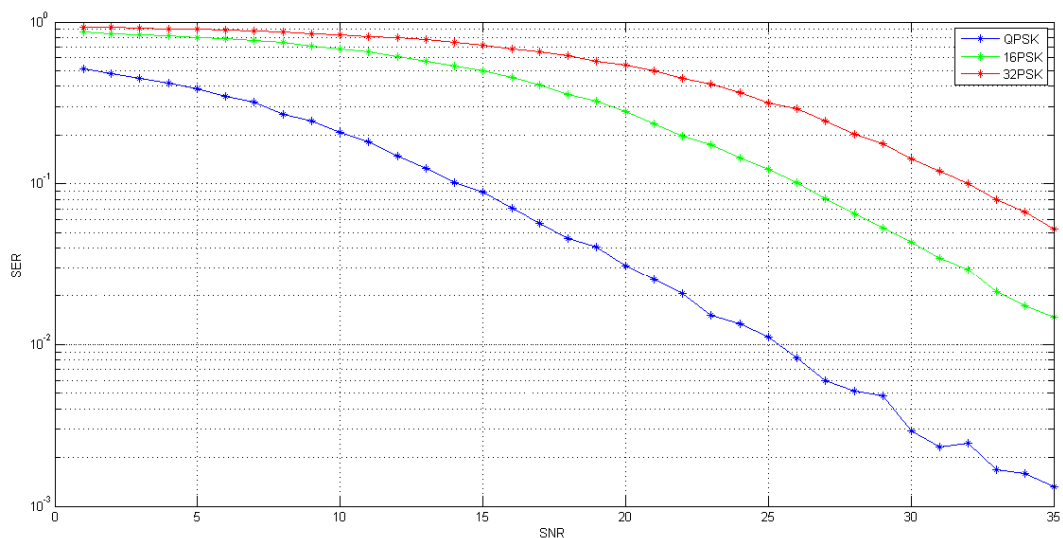


Figura 3. 11: Gráfica comparativa de las modulaciones QPSK, 16-PSK y 32-PSK en el sistema OFDM.

Elaborado por: Autor.

3.3. Escenario 2: sistema OFDM utilizando esquema de modulación QAM.

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM) es el uso de dos señales de banda base digitales independientes entre sí para la modulación de doble banda de dos señales portadoras de frecuencia idénticas y ortogonales entre sí. Dado que las señales moduladas son ortogonales en el mismo ancho de banda, están disponibles. Para lograr una transmisión de señal digital paralela de dos fases en fase y cuadratura.

Las subsecciones 3.3.1 a 3.3.3 se analizan los resultados obtenidos del sistema OFDM (implementado en la figura 3.1) utilizando tres esquemas de

modulación, que son 4-QAM, 16-QAM y 32-QAM, sobre el canal AWGN. Para cada esquema de modulación se evalúa el desempeño del sistema OFDM para una relación S/N entre 0 y 35 dB para cada modulación 4-QAM, 16-QAM y 32-QAM. Finalmente, en la sección 3.4 se compara el sistema OFDM basado en modulación M-aria QAM con el tratado en la sección 3.2 (OFDM basado en modulación M-aria PSK).

3.3.1. Análisis de resultados de la modulación 4-QAM.

Se sabe que la modulación QAM es un método para enviar dos canales de información separados (y únicamente diferentes). El portador se desplaza para crear dos portadores, es decir, seno y coseno. El convertidor de serie a paralelo acepta los datos a transmitir, los ensambla en bloques de M-bits y luego los separa en N canales. En el caso de 4-QAM, los cuatro bits se separan en 2 bits cada uno y luego se envían al multiplexor binario. En la tabla 3.4 se muestran los parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 4-QAM.

Tabla 3. 4: Parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 4-QAM.

Datos binarios de entrada	64000
No. de símbolos	32000
Longitud FFT	64
Prefijo cíclico	10
No. de tramas	500
Tamaño de trama	64

Elaborado por: Autor.

La figura 3.12 muestra el diagrama de constelación con una forma de enrejado rectangular de 4 puntos para la modulación 4-QAM. Al comparar los diagramas de constelaciones de las señales M-PSK (QPSK, 16-PSK y 32-PSK) con respecto a las señales M-QAM (4-QAM, 16-QAM y 32-QAM), se observa que la modulación M-QAM tiene una mayor separación entre cada punto del diagrama de constelaciones.

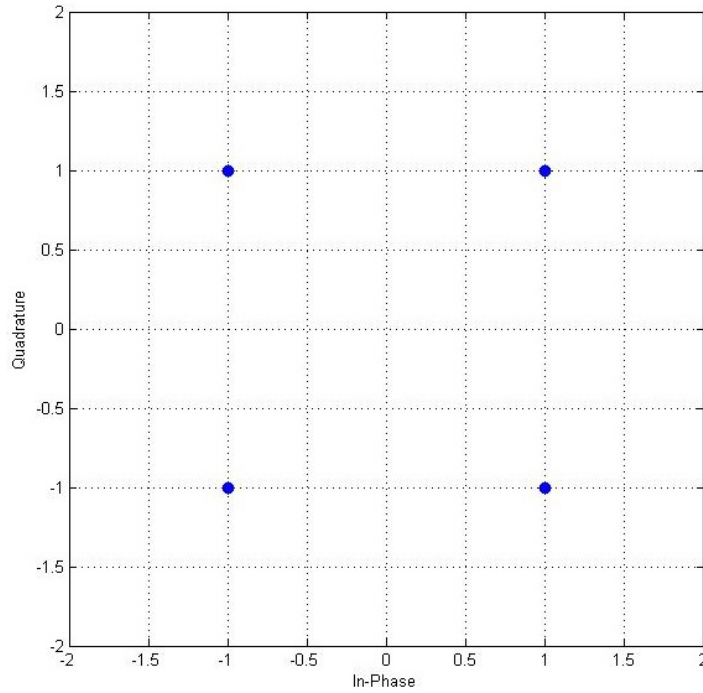


Figura 3. 12: Diagrama de constelaciones de la modulación 4-QAM en el sistema OFDM.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.13 muestra los errores por símbolo frente a la relación S/N del sistema OFDM utilizando la modulación 4-QAM. Para una relación S/N = 35 dB se tiene 0 errores por símbolo y para una relación S/N = 5 dB se tiene 9000 errores por símbolo.

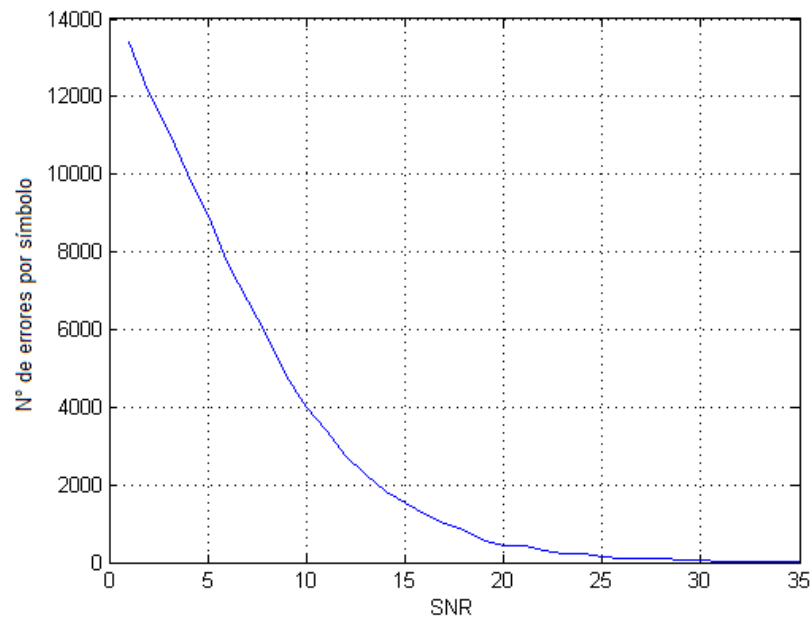


Figura 3. 13: Errores por símbolo con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 4-QAM.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.14 muestra la SER frente a la relación S/N en el sistema OFDM utilizando la modulación 4-QAM. Para una relación S/N = 35 dB se tiene una SER = 0.0006 y para una S/N = 5 dB se tiene una SER = 0.29. Se deduce que a mayor relación S/N, menor será la SER en el sistema OFDM utilizando la modulación 4-QAM.

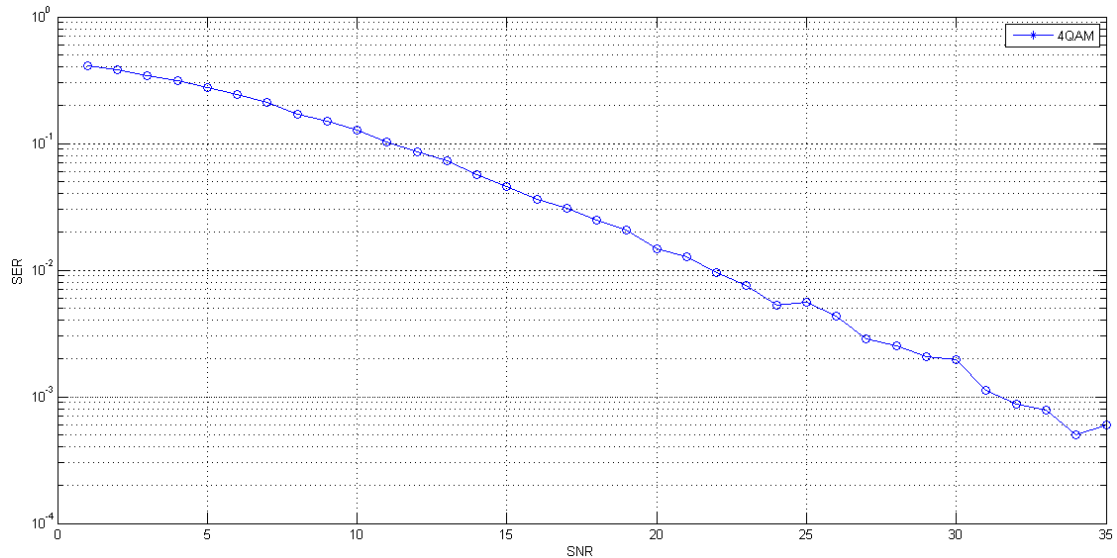


Figura 3. 14: SER con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 4-QAM.
Elaborado por: Autor.

3.3.2. Análisis de resultados de la modulación 16-QAM.

La ventaja de utilizar 16-QAM es que es una forma de modulación de orden superior y, como resultado, puede transportar más bits de información por símbolo. Al seleccionar un formato de orden superior de QAM, se puede aumentar la velocidad de datos de un enlace. En la tabla 3.5 se muestran los parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 4-QAM.

Tabla 3. 5: Parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 16-QAM.

Datos binarios de entrada	64000
No. de símbolos	32000
Longitud FFT	64
Prefijo cíclico	10
No. de tramas	500
Tamaño de trama	64

Elaborado por: Autor.

La figura 3.12 muestra el diagrama de constelación con una forma de enrejado rectangular de 16 puntos para la modulación 16-QAM. Con relación al diagrama de constelaciones, el sistema OFDM con modulación 16-QAM presenta una mejor separación de puntos que en la modulación 16-PSK.

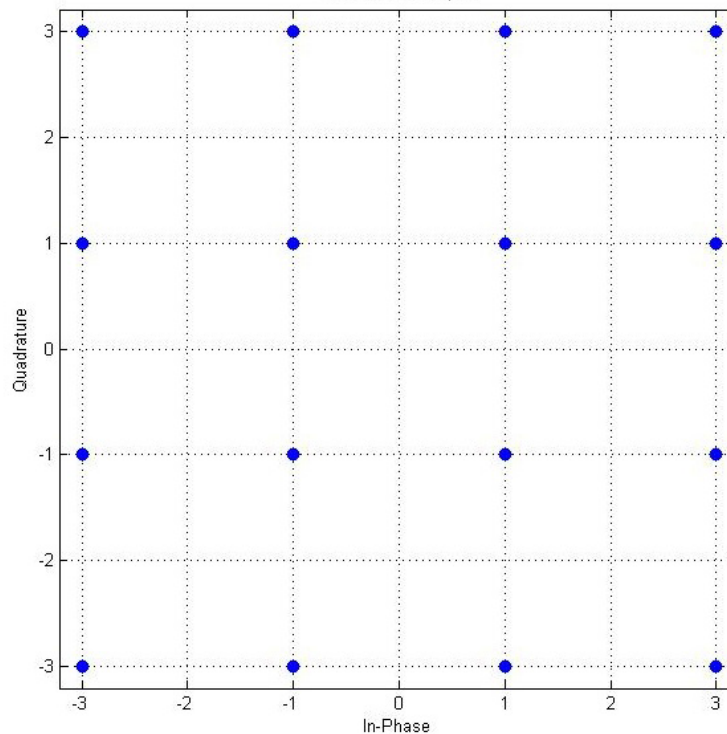


Figura 3. 15: Diagrama de constelaciones de la modulación 16-QAM en el sistema OFDM.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.16 muestra los errores por símbolo frente a la relación S/N del sistema OFDM utilizando la modulación 16-QAM. Para una relación S/N = 5 dB se tiene 6000 errores por símbolo y para una relación S/N = 35 dB se tiene 0 errores por símbolo. De manera similar a lo tratado en la sección 3.3.1 los errores por símbolo en la modulación 16-QAM presentan un menor error con relación a la modulación 4-QAM.

La figura 3.17 muestra la SER frente a la relación S/N en el sistema OFDM utilizando la modulación 16-QAM. Para una relación S/N = 35 dB se tiene una SER = 0.0006 y para una S/N = 5 dB se tiene una SER = 0.40. Se deduce que a mayor relación S/N, menor será la SER en el sistema OFDM utilizando la modulación 4-QAM.

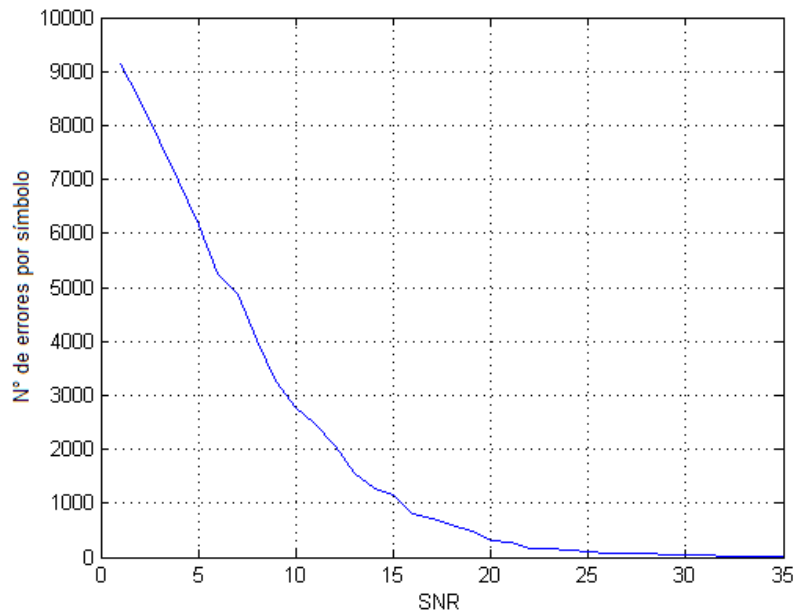


Figura 3. 16: Errores por símbolo con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 16-QAM.
Elaborado por: Autor.

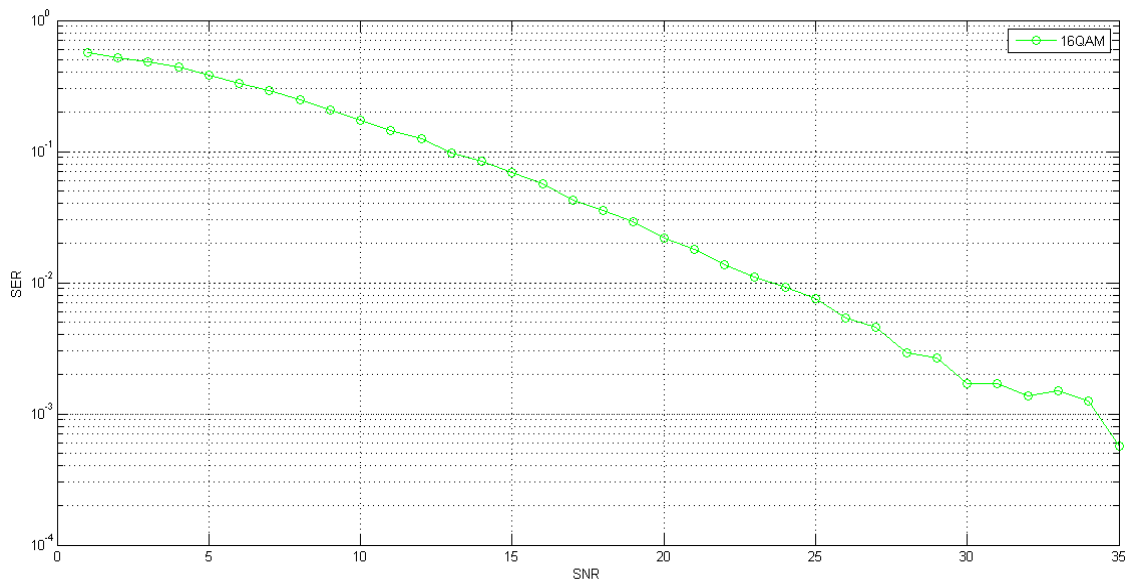


Figura 3. 17: SER con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 16-QAM.
Elaborado por: Autor.

3.3.3. Análisis de resultados de la modulación 32-QAM.

Para la modulación 32-QAM se necesita cuatro clases de puntos, donde cada clase tiene diferente de rutas de error de primer orden. La señalización QAM se puede ampliar para tener un mayor número de símbolos, lo que permite una tasa de bits mucho mayor en el mismo ancho de banda (porque hay más bits por símbolo). Se puede estimar la energía de la señal en la

constelación de la modulación 32-QAM sumando los 8 puntos en el primer cuadrante y luego dividiendo el total por 8. En la tabla 3.6 se presentan los parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 32-QAM.

Tabla 3. 6: Parámetros de simulación del sistema OFDM utilizando la modulación 32-QAM.

Datos binarios de entrada	64000
No. de símbolos	12800
Longitud FFT	64
Prefijo cíclico	10
No. de tramas	200
Tamaño de trama	64

Elaborado por: Autor.

La figura 3.18 muestra el diagrama de constelación con una forma de enrejado rectangular de 32 puntos para la modulación 32-QAM en el sistema OFDM, que resultó ser mucho mejor que en la modulación 32-PSK, ya que minimiza los errores por símbolo del extremo del receptor.

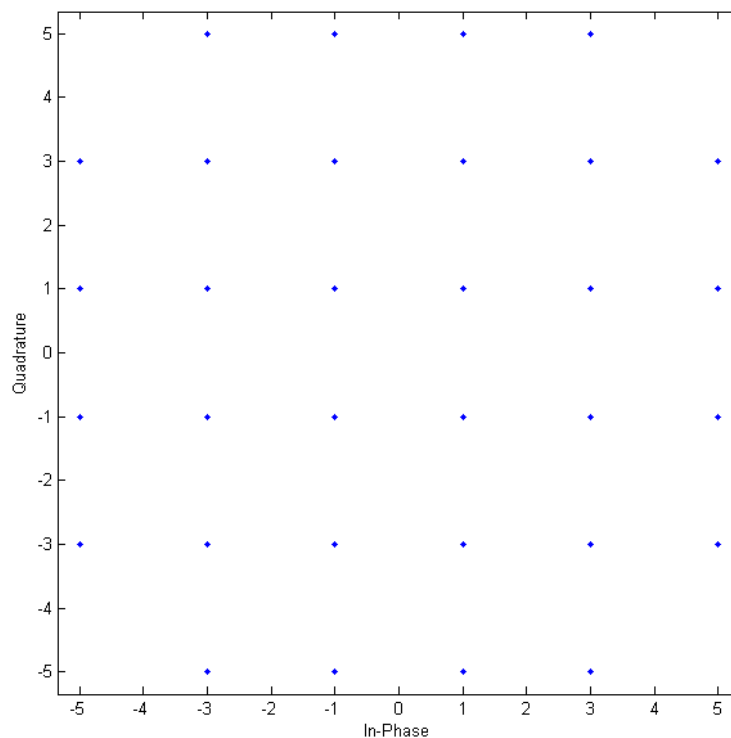


Figura 3. 18: Diagrama de constelaciones de la modulación 32-QAM en el sistema OFDM.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.19 muestra los errores por símbolo frente a la relación S/N en el sistema OFDM utilizando la modulación 32-QAM. Se puede ver que para una relación S/N = 35 dB se tiene 0 errores por símbolo, mientras que para una relación S/N = 15 dB se tienen 900 errores por símbolo, y para una relación S/N = 5 dB se tienen 5150 errores por símbolo transmitido en el sistema OFDM utilizando la modulación 32-QAM.

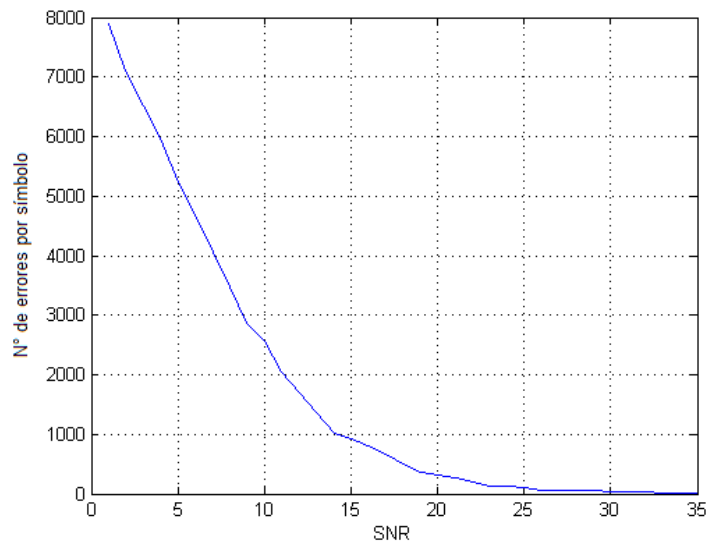


Figura 3. 19: Errores por símbolo con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 32-QAM.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.20 muestra la SER frente a la relación S/N. Se observa que para una relación S/N = 35 dB se tiene una SER = 0.001 y para una relación S/N = 5 dB se tiene una SER = 0.4.

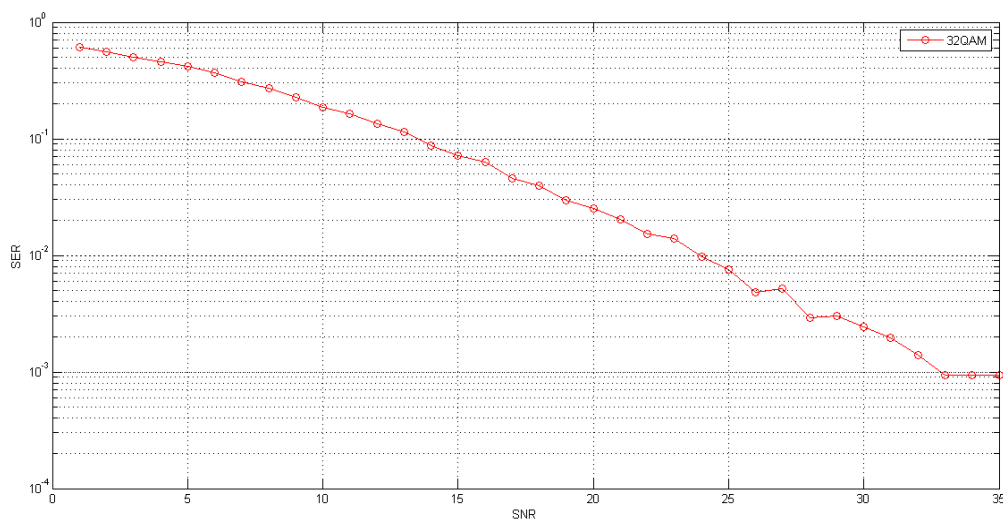


Figura 3. 20: SER con respecto a la relación S/N para el sistema OFDM utilizando la modulación 32-QAM.

Elaborado por: Autor.

Finalmente, en la figura 3.21 se presenta la respuesta comparativa de la SER con respecto a la relación S/N del sistema OFDM utilizando los esquemas de modulación 4-QAM, 16-QAM y 32-QAM. En las secciones 3.2.1 a 3.2.3 se observaron las gráficas SER vs relación S/N y en los tres esquemas de modulación implementados en MatLab/Simulink se tiene el menor valor de SER para una relación S/N = 35 dB. Las otras dos modulaciones 16-QAM y 32-QAM tienen excelentes resultados, sin embargo, la modulación 4-QAM es la más eficiente.

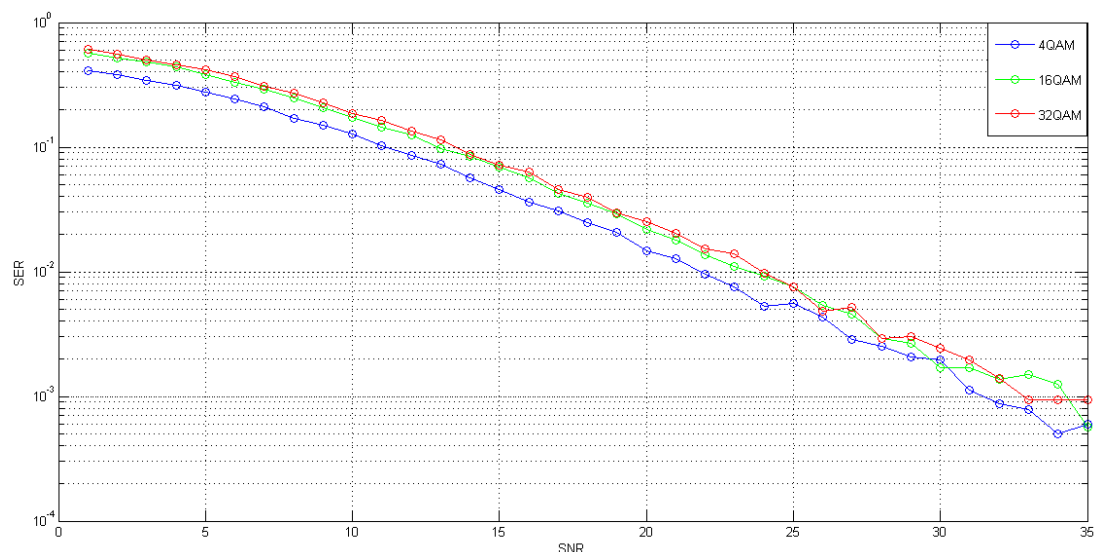


Figura 3. 21: Gráfica comparativa de las modulaciones 4-QAM, 16-QAM y 32-QAM en el sistema OFDM utilizando canal AWGN.

Elaborado por: Autor.

3.4. Análisis comparativo entre los escenarios de simulación 1 y 2.

En esta última sección se realiza la gráfica comparativa para las seis modulaciones evaluadas en MatLab/Simulink en el sistema OFDM. Por ejemplo, QPSK es ampliamente utilizado en la práctica debido a que tiene un buen equilibrio entre el uso de energía y ancho de banda. Para el índice $M > 4$, se incrementa el consumo de energía y la complejidad del sistema de modulación y demodulación. En general, en los dos escenarios propuestos (ver secciones 3.2 y 3.3) se observa que, si M es mayor, entonces la probabilidad de error por símbolo se incrementa, sin embargo, se tiene mayor tasa de transmisión de datos. Finalmente, la SER se logra controlar (minimizar su efecto) siempre que la relación S/N se mayor.

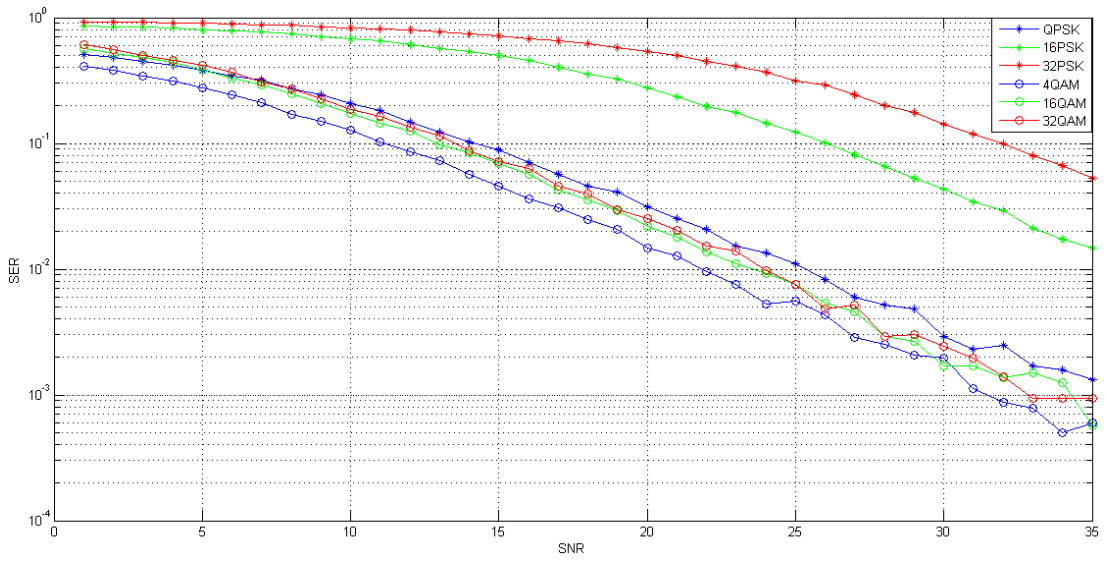


Figura 3. 22: Gráfica comparativa de las modulaciones M-PSK y M-QAM en el sistema OFDM.

Elaborado por: Autor.

CONCLUSIONES

- La fundamentación teórica fue descrita en el capítulo 2 y con esto se logró comprender que los sistemas de comunicaciones en general (alámbricos e inalámbricos) utilizan esquemas de modulación y que la modulación apropiada depende del tipo de comunicación.
- Se logró diseñar el transmisor y receptor del sistema OFDM con canal AWGN de propagación utilizando diferentes esquemas de modulación sobre MatLab/Simulink.
- Se pudo comprobar que la tasa de errores de símbolos es mínima o próxima a 0, siempre que la relación S/N sea mayor. Para este componente práctico del examen complejo se evalúa la relación S/N entre 0 y 35 dB. En todos los análisis realizados la relación S/N de 35 dB daba como resultado un SER mínimo.

RECOMENDACIONES.

- Análisis comparativo del sistema OFDM sobre radios definidas por software mediante modulaciones PSK y FSK.
- Análisis comparativo del sistema OFDM sobre radio cognitiva utilizando inteligencia artificial en Python.

Bibliografía

- Burbano Báez, D. P. (2016). *Sistema de transmisión de datos inalámbrica mediante pulsos luminosos*.
<http://repositorio.puce.edu.ec:80/xmlui/handle/22000/13487>
- Carrión Romero, J. A. (2015). *Modelado y simulación de sistemas digitales de comunicaciones en Matlab/ Simulink*.
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/3724>
- Garg, V. K. (2007). Modulation Schemes. En *Wireless Communications & Networking* (pp. 249–285). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012373580-5/50043-0>
- Garg, V. K., & Wang, Y.-C. (2005). Modulation and Demodulation Technologies. En *The Electrical Engineering Handbook* (pp. 971–981). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012170960-0/50072-4>
- Haykin, S. (2003). Communication Systems, Civilian. En *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (pp. 409–432). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00125-3>
- Li, Q., & Yao, J. (2004). *DSB-SC modulation scheme for remotely controlled true time delay beamforming system* (J. C. Armitage, R. A. Lessard, & G. A. Lampropoulos, Eds.; p. 607). <https://doi.org/10.1117/12.567573>
- Nakazawa, M., Hirooka, T., Yoshida, M., & Kasai, K. (2013). Chapter 7—Extremely Higher-Order Modulation Formats. En I. P. Kaminow, T. Li, & A. E. Willner (Eds.), *Optical Fiber Telecommunications (Sixth Edition)* (pp. 297–336). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396960-6.00007-9>
- Rey Micolau, F., & Tarrés Ruiz, F. (2021). *Comunicaciones analógicas: Modulaciones AM y FM. Una perspectiva histórica* (Fundación para la Universitat Oberta de Catalunya). FUOC.

- Sig-Tú Toral, A. A. (2014). *Aplicaciones prácticas de la modulación digital a través de Matlab en la asignatura de Procesamiento Digital de Señales*. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/1692>
- Usman, M., Ansari, M. D., & Wajid, M. (2019). On the Complementary Relationship Between Sampling and Double Sideband-Suppressed Carrier modulation. *2019 5th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC)*, 380–382. <https://doi.org/10.1109/ISPCC48220.2019.8988480>
- Ziemer, R. (2002). Modulation. En *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (pp. 97–112). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00456-7>



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Troya Valarezo, Luis Antonio** con C.C: # 070379356-2 autor del Trabajo de Titulación: **Análisis comparativo de escenarios de simulación de esquemas de modulación PSK y QAM sobre sistema OFDM mediante MatLab/Simulink** previo a la obtención del título de **INGENIERO 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, 20 de septiembre del 2021

f. _____

Nombre: Troya Valarezo, Luis Antonio

C.C: 070379356-2



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Análisis comparativo de escenarios de simulación de esquemas de modulación PSK y QAM sobre sistema OFDM mediante MatLab/Simulink		
AUTOR(ES)	Troya Valarezo, Luis Antonio		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
PROGRAMA:	Ingeniería en Telecomunicaciones		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniero en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	20 de septiembre del 2021	No. DE PÁGINAS:	48
ÁREAS TEMÁTICAS:	Comunicaciones Inalámbricas, Sistemas de Transmisión		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	Multiplexación, Codificación, Rendimiento, OFDM, BER, SNR		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>En este trabajo de examen complejo se realiza el diseño y simulación de la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) que permitió el estudio y evaluación del rendimiento del sistema OFDM utilizando esquemas de modulación digital. En el capítulo 2 se muestra la descripción teórica de la multiplexación, modulación y demodulación en sistemas de comunicación. Es muy importante evaluar el desempeño del sistema de comunicación inalámbrico y verificar la eficiencia y calidad de los servicios que puede brindar. El sistema OFDM fue implementada en el software de simulación Matlab, y se obtiene la tasa de error de bits (BER) a diferentes valores de relación señal/ruido (SNR) para las técnicas de modulación digital PSK y QAM. EL software de simulación MatLab es ampliamente utilizado como herramienta de medición del rendimiento, BER indica la cantidad de bits eliminados a medida que los datos se mueven desde el origen al destino, y se utiliza el canal AWGN (ruido blanco gaussiano aditivo) como canal de transmisión.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-9-82399836	E-mail: antonio_luis_95@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	Teléfono: +593-9-67608298		
	E-mail: edwin.palacios@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):			