



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

TEMA:

**Modelado de simulación de transmisión y recepción del  
sistema OFDM utilizado en comunicaciones inalámbricas**

AUTOR:

Cherrez Sánchez, Kevin Edison

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

REVISOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

5 de mayo 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 **Cherrez Sánchez, Kevin Edison** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

REVISOR

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DE CARRERA

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 5 días del mes de mayo 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, **Cherrez Sánchez, Kevin Edison**

**DECLARÓ QUE:**

El **componente práctico del examen complejo, Modelado de simulación de transmisión y recepción del sistema OFDM utilizado en comunicaciones inalámbricas**, 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 5 días del mes de mayo del año 2021

EL AUTOR

---

CHERREZ SÁNCHEZ, KEVIN EDISON



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

### **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Cherrez Sánchez, Kevin Edison**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del **componente práctico del examen complejo, Modelado de simulación de transmisión y recepción del sistema OFDM utilizado en comunicaciones inalámbricas** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 5 días del mes de mayo del año 2021

EL AUTOR

---

**CHERREZ SÁNCHEZ, KEVIN EDISON**

# REPORTE DE URKUND

**URKUND** Fernando Palacios Meléndez (edwin\_palacios)

<b>Documento</b>	<a href="#">Cherrez_Kevin_EC.docx</a> (D103526731)
<b>Presentado</b>	2021-05-01 21:06 (-05:00)
<b>Presentado por</b>	fernandopm23@hotmail.com
<b>Recibido</b>	edwin.palacios.ucsg@analysis.urkund.com
<b>Mensaje</b>	Revisión Examen Complexivo Kevin Cherrez <a href="#">Mostrar el mensaje completo</a> 2% de estas 15 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.

Lista de fuentes	Bloques
Categoría	Enlace/nombre de archivo
	<a href="http://192.188.52.94/bitstream/3317/15582/1/T-U...">http://192.188.52.94/bitstream/3317/15582/1/T-U...</a>
	<a href="#">Jorge_Ortega_TT_2018.docx</a>
	TT - Herrera & Rodríguez.pdf
<b>Fuentes alternativas</b>	
	<a href="http://192.188.52.94-8080/bitstream/3317/15582/...">http://192.188.52.94-8080/bitstream/3317/15582/...</a>
	<a href="http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/15...">http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/15...</a>
	<a href="http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/15...">http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/15...</a>

1 Advertencias. Reinciar Exportar Compartir

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

Modelado de simulación de transmisión y recepción del sistema OFDM  
utilizado en comunicaciones inalámbricas

AUTOR: Cherrez Sánchez, Kevin Edison

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

REVISOR: M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando  
Guayaquil, Ecuador 3 de mayo del 2021

## **DEDICATORIA**

A Dios por bendecirme con salud y permitirme haber llegado hasta aquí.

A la persona más especial e importante de mi vida, mi papá, por todo su esfuerzo entregado a la familia. Aunque físicamente ya no estés a mi lado, tus recuerdos y enseñanzas siempre vivirán en mi mente y en mi corazón y será un pilar fundamental en mi diario vivir.

**EL AUTOR**

**CHERREZ SÁNCHEZ, KEVIN EDISON**

## **AGRADECIMIENTO**

A mis mamás por su amor, apoyo incondicional y por todas esas luchas que hemos podido salir adelante juntos agarrados de las manos. Son mi fortaleza el significado de mi vida, les agradezco por guiarme por el camino correcto. Gracias porque sé que siempre me tienen en su mente y siempre estarán en mi corazón.

A mi hermano Marquitos y a mi amigo Marco, gracias por el cariño y las risas, siempre están conmigo en los momentos más difíciles, y los bonitos también.

A mis dos amigos Leslie y Luis por hacer de esta etapa una experiencia maravillosa y gratificante. Gracias por las enseñanzas, las risas y los momentos compartidos

EL AUTOR

CHERREZ SÁNCHEZ, KEVIN EDISON



**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 JESÚS**  
DECANO

f. \_\_\_\_\_  
**M. Sc. HERAS SÁNCHEZ, MIGUEL ARMANDO**  
DIRECTOR DE CARRERA

f. \_\_\_\_\_  
**M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO**  
OPONENTE

## Índice General

Índice de Figuras .....	X
Índice de Tablas.....	XIII
Resumen .....	XIV
Capítulo 1: Descripción General .....	2
1.1.  Introducción.....	2
1.2.  Antecedentes. ....	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.  Introducción de canales de comunicación inalámbrica. ....	4
2.2.  Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) .....	6
2.3.  Sincronización en sistemas OFDM .....	8
2.4.  Estimación de canales en sistemas OFDM.....	9
2.5.  Estimación de la relación señal/ruido .....	10
2.6.  Radio definida por software.....	11
Capítulo 3: Diseño, Implementación y Análisis de Resultados .....	15
3.1.  Descripción del modelado de simulación de red propuesto. ....	15
3.2.  Diseño del modelado en MatLab/Simulink y su uso en FPGA. ....	15
3.3.  Resultados del algoritmo de agrupación o asignación en diagramas de constelaciones I-Q.....	18
CONCLUSIONES .....	36
RECOMENDACIONES.....	37
Bibliografía .....	38

## Índice de Figuras

### Capítulo 2

Figura 2. 1: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación inalámbrico. .....	4
Figura 2. 2: Canal convencional de radiofrecuencia multitrayecto. ....	5
Figura 2. 3: Diagrama de bloques convencional de transmisión/recepción de un sistema OFDM. ....	7
Figura 2. 4: Estimación del canal en el receptor OFDM. ....	10
Figura 2. 5: Tarjeta FPGA utilizada como una SDR. ....	12
Figura 2. 6: Arquitectura de una SDR. ....	13

### Capítulo 3

Figura 3. 1: Diseño en Simulink del sistema de transmisión y recepción OFDM. .....	16
Figura 3. 2: Respuestas del espectro de las señales (a) transmitida y (b) recibida. ....	16
Figura 3. 3: Representación de los diagramas de constelaciones de las señales (a) transmitida y (b) recibida del sistema OFDM usando modulación 16-QAM. ....	17
Figura 3. 4: Error relativo vs número de muestras en la modulación 4-QAM. .....	18
Figura 3. 5: Error relativo vs número de muestras en la modulación 8-QAM. .....	19
Figura 3. 6: Error relativo vs número de muestras en la modulación 16-QAM. .....	20
Figura 3. 7: Error relativo vs número de muestras en la modulación 64-QAM. .....	20
Figura 3. 8: Error relativo vs número de muestras en la modulación 8-PSK.	21
Figura 3. 9: Error relativo vs número de muestras en la modulación 16-PSK. .....	21

Figura 3. 10: Error relativo vs número de bits en la modulación 4-QAM.....	22
Figura 3. 11: Error relativo vs número de bits en la modulación 8-QAM.....	23
Figura 3. 12: Error relativo vs número de bits en la modulación 64-QAM....	23
Figura 3. 13: Error relativo vs número de bits en la modulación 8-PSK.....	24
Figura 3. 14: Comparativa de la tasa de error en las modulaciones QAM... 25	25
Figura 3. 15: Comparativa de la tasa de error en las modulaciones PSK... 25	25
Figura 3. 16: Comparativa de la potencia de error relativo con una SNR de 20 dB. ....	26
Figura 3. 17: Comparativa de la potencia de error relativo con una SNR de 10 dB. ....	27
Figura 3. 18: Comparativa de la potencia de error relativo con una SNR de 5 dB. ....	27
Figura 3. 19: Comparativa de la potencia de error relativo con una SNR de 3 dB. ....	28
Figura 3. 20: Comparativa del error de desviación acumulada para una SNR de 20 dB. ....	29
Figura 3. 21: Comparativa del error de desviación acumulada para una SNR de 10 dB. ....	29
Figura 3. 22: Comparativa del error de desviación acumulada para una SNR de 5 dB. ....	30
Figura 3. 23: Comparativa del error de desviación acumulada para una SNR de 3 dB. ....	30
Figura 3. 24: Comparativa del error de desviación acumulada para la modulación 16-PSK apropiada para una SNR de 20 dB. ....	31
Figura 3. 25: Comparativa del error de desviación acumulada para la modulación 16-PSK apropiada para una SNR de 3 dB. ....	32
Figura 3. 26: Comparativa del error de desviación acumulada para la modulación 16-QAM apropiada para una SNR de 20 dB. ....	32
Figura 3. 27: Comparativa del error de desviación acumulada para la modulación 16-QAM apropiada para una SNR de 3 dB. ....	33

Figura 3. 28: Comparativa del error de desviación acumulada para la modulación 64-QAM apropiada para una SNR de 20 dB. ....	33
Figura 3. 29: Comparativa del error de desviación acumulada para la modulación 16-QAM apropiada para una SNR de 3 dB. ....	34

## Índice de Tablas

### Capítulo 2

Tabla 3. 1: Resultados más eficaces con señal de entrada 16-QAM y canal AWGN.....	34
Tabla 3. 2: Resultados más eficaces con señal de entrada 64-QAM y canal AWGN.....	35
Tabla 3. 3: Resultados más eficaces con señal de entrada 8-PSK y canal AWGN.....	35
Tabla 3. 4: Resultados más eficaces con señal de entrada 16-PSK y canal AWGN.....	35

## Resumen

El presente trabajo corresponde al desarrollo del componente práctico del examen complejo denominado “Modelado de simulación de transmisión y recepción del sistema OFDM utilizado en comunicaciones inalámbricas”. La multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) es muy utilizada en las comunicaciones inalámbricas fijas y móviles. OFDM es una tecnología abordada por muchos investigadores que publican obras relevantes y también muy utilizada para fines académicos con propuestas de investigación formativa. En el capítulo 1 se describe las generalidades del componente práctico. En el capítulo 2 se desarrolla la parte teórica, canales de comunicación inalámbrica, tecnología OFDM y de radio definida por software. En el capítulo 3 se desarrolla la parte experimental del sistema de transmisión y recepción utilizando OFDM sobre los esquemas de modulación por desplazamiento de fase y amplitud en cuadratura. Los resultados muestran la tasa de error por debajo del 1% utilizando el canal de ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN).

**Palabras claves:** Transmisión, Recepción, Multiplexación, Comunicaciones, Modulaciones, Canal.

## Capítulo 1: Descripción General

### 1.1. Introducción.

A lo largo de la última década y debido a la abrumadora cantidad de datos que los usuarios crean, transmiten y/o gestionan, se ha planteado un reto a los proveedores de sistemas de comunicación inalámbricos para facilitar estas complejidades. Además, el principal reto de la nueva generación de sistemas celulares inalámbricos es la fiabilidad de proporcionar una velocidad de datos de alrededor de 100 Mbps y 30 Mbps para la transmisión de la capa física de enlace descendente y ascendente, respectivamente. (Daoud et al., 2013)

Por ello, la mayoría de los investigadores han centrado su atención en la combinación de dos potentes técnicas, la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) y la tecnología de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). De este modo se obtendrán técnicas inalámbricas avanzadas de gran capacidad que frenarán el crecimiento de las aplicaciones multimedia, el acceso a Internet por cable o inalámbrico y otras aplicaciones necesarias en los sistemas móviles de nueva generación.

La técnica OFDM ha surgido como un eficiente esquema de modulación multiportadora para canales de comunicación inalámbricos de frecuencia selectiva. La facilidad de implementación, alta eficiencia espectral, la resistencia al ruido impulsivo y al multitrayecto son algunas de las ventajas de los sistemas OFDM. Es un sistema multiportadora que utiliza una técnica de procesamiento en paralelo que permite la transmisión simultánea de datos en muchas subportadoras ortogonales muy próximas entre sí. Las transformadas rápidas de Fourier inversas (IFFT) y la transformada rápida de Fourier (FFT) en un sistema OFDM convencional se utilizan para multiplexar las señales y decodificar la señal en el receptor, respectivamente.

En los sistemas OFDM en la sección del receptor la señal es recibida por la antena receptora y convertida en datos digitales mediante un convertidor analógico-digital antes de eliminar el prefijo cíclico. A continuación, los datos

en serie se convierten en un flujo de datos en paralelo. La transformada rápida de Fourier (FFT) de cada símbolo se considera para determinar el espectro transmitido y el flujo de datos en paralelo se convierte en un dato en serie. Se eliminan las portadoras piloto y se recupera la señal mediante el proceso de demodulación, se desentrelaza y finalmente se decodifica para obtener los datos originales.

## **1.2. Antecedentes.**

OFDM es una de las técnicas de modulación modernas que se utilizan para combatir la selectividad de frecuencia de los modelos de canal de transmisión y lograr una alta velocidad de datos sin interferencia entre símbolos. OFDM puede combinarse con conjuntos de antenas en el transmisor y el receptor para aumentar la capacidad del sistema en modelos de canales variables en el tiempo y selectivos en cuanto a la frecuencia, lo que da lugar a una configuración de MIMO.

## **1.3. Objetivos del Problema de Investigación.**

### **1.3.1. Objetivo General.**

Realizar el modelado de simulación de transmisión y recepción del sistema OFDM utilizado en comunicaciones inalámbricas que permita la clasificación adecuada del esquema de modulación digital más apropiado.

### **1.3.2. Objetivos Específicos.**

- Describir la fundamentación teórica de los canales de comunicación inalámbricos y de la multiplexación OFDM.
- Diseñar el modelo de simulación de transmisión y recepción de sistemas OFDM para comunicaciones inalámbricas.
- Optimizar el algoritmo y encontrar el menor número de muestras posible para un umbral de muestras que pueda ser muy útil.

## Capítulo 2: Fundamentos Teóricos

### 2.1. Introducción de canales de comunicación inalámbrica.

Un sistema de comunicación inalámbrica típico puede dividirse en tres elementos: el transmisor, el canal y el receptor. La figura 2.1 muestra el diagrama de bloques de un sistema de comunicación inalámbrica. El rendimiento y la calidad de la comunicación inalámbrica dependen en gran medida del tipo de canales entre el emisor y el receptor. Por lo tanto, es necesario hablar de los canales de comunicación inalámbricos. Una introducción a los comportamientos de los canales de comunicación inalámbricos, sus efectos y los métodos para combatirlos puede encontrarse en (Chowdhury & Biswas, 2017; Haykin & Moher, 2005).

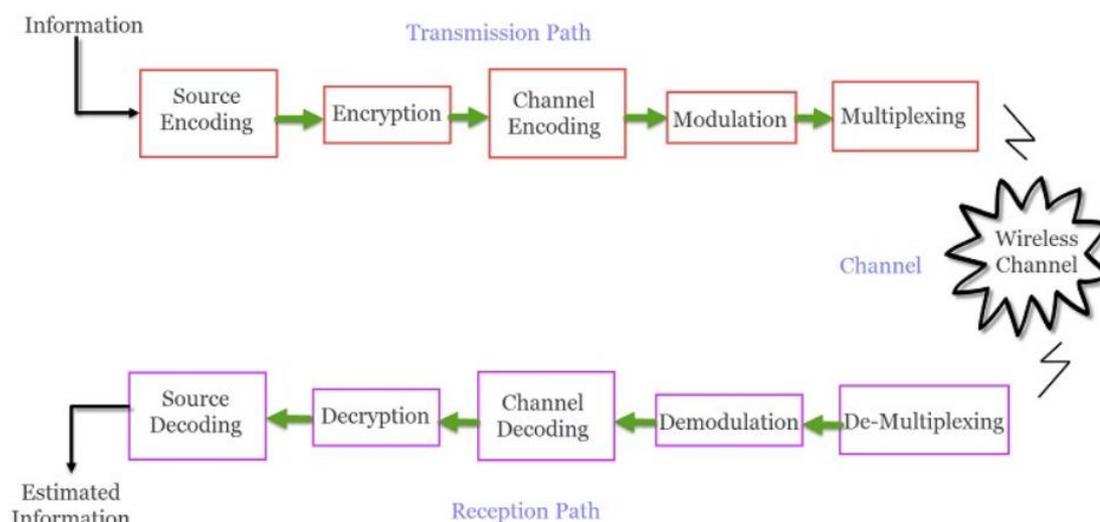


Figura 2. 1: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación inalámbrico.  
Fuente: (Teja, 2021)

La figura 2.1 muestra un ejemplo convencional de canales inalámbricos multitrayecto. En la comunicación inalámbrica, puede haber más de un camino desde el transmisor hasta el receptor. La multitrayectoria se debe a la dispersión, los reflejos y la refracción de los edificios y otros objetos. El efecto multitrayectoria se clasifica en dos grupos: efectos a pequeña escala y a gran escala (sombra), en referencia a la escala de tiempo, espacio, posición y forma. El fenómeno a gran escala incluye los efectos de pérdida de trayectoria y sombra; el fenómeno a pequeña escala incluye el desvanecimiento por trayectos múltiples.



Figura 2. 2: Canal convencional de radiofrecuencia multitrayecto.  
Fuente: (Ketterl et al., 2012)

Mientras, que el desvanecimiento por sombra es una atenuación de la potencia media de la señal causada por los contornos del terreno (colinas altas o zonas urbanas densas) entre la antena del transmisor y la del receptor; se describe en términos de pérdida de trayectoria. El desvanecimiento multitrayecto se refiere al hecho de que la señal transmitida sigue muchos caminos diferentes antes de llegar al receptor. Este efecto constituye un canal de radio propagación multitrayecto. La calidad de la señal recibida depende de algunos parámetros característicos del canal de desvanecimiento multitrayecto, a saber:

- a) Dispersión del retardo del valor cuadrático medio (RMS): es el tiempo que transcurre entre la primera y la última trayectoria de la señal que se recibe;
- b) Dispersión Doppler: es el rango de frecuencias observadas debido al movimiento del transmisor y receptor;
- c) Tiempo de coherencia del canal: es la escala de tiempo en la que la realización del canal es aproximadamente independiente;
- d) Distancia del canal de coherencia: es la distancia entre la antena del transmisor y la del receptor;
- e) Ancho de banda de coherencia del canal: es el rango de frecuencias contingentes; y
- f) Número de trayectorias múltiples: es el número de caminos o rutas o trayectorias desde el transmisor hasta el receptor.

Los canales de desvanecimiento de Rayleigh y Rician son actualmente modelos de canal inteligentemente utilizados para modelar canales inalámbricos de banda estrecha y banda ancha en una serie de entornos de comunicación inalámbrica realistas. En los entornos de comunicación inalámbrica realistas, suelen estar presentes algunos fenómenos de propagación, como los efectos de dispersión multitrayecto, la dispersión temporal y los desplazamientos Doppler.

## **2.2. Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM)**

La implementación del sistema OFDM mediante radio definida por hardware y software es el objetivo principal del presente componente práctico del examen complejo y que se trata en el capítulo 3. Por lo tanto, en esta sección se revisan los antecedentes fundamentales del sistema OFDM. OFDM es uno de los casos especiales del esquema de modulación multiportadora (MCM) que modula los símbolos de datos en paralelo en subportadoras ortogonales. La idea principal del sistema OFDM es separar el único flujo de datos de alta velocidad en  $N$  subflujos de datos bajos paralelos que se modulan en  $N$  subportadoras ortogonales. Este proceso se realiza simplemente en el dominio del tiempo discreto a través de un elemento de la transformada discreta inversa de Fourier (IDFT) de  $N$  puntos o de la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT) y la señal resultante se transmite en secuencia.

La información en el receptor se recupera realizando una operación DFT/FFT. La figura 2.3 muestra el diagrama de bloques de un sistema OFDM convencional. En resumen, el transmisor OFDM funciona como sigue:

- El flujo de bits de la fuente se divide en grupos de  $K$  bits;
- El bloque de mapeo de símbolos mapea cada grupo de  $K$  bits al símbolo complejo correspondiente (símbolo modulado);
- Coloca estos números complejos en un vector;
- Calcula la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT);
- Añade un intervalo de guarda (GI) y luego entrega los resultados al convertidor ascendente.

Mientras que el receptor OFDM funciona como sigue:

- Recibe las señales del convertidor descendente, y elimina GI
- Coloca la señal compleja en el vector
- Calcula la transformada rápida de Fourier (FFT)
- La señal resultante se introduce en los ecualizadores
- A continuación, se elimina el mapa para volver a la señal original

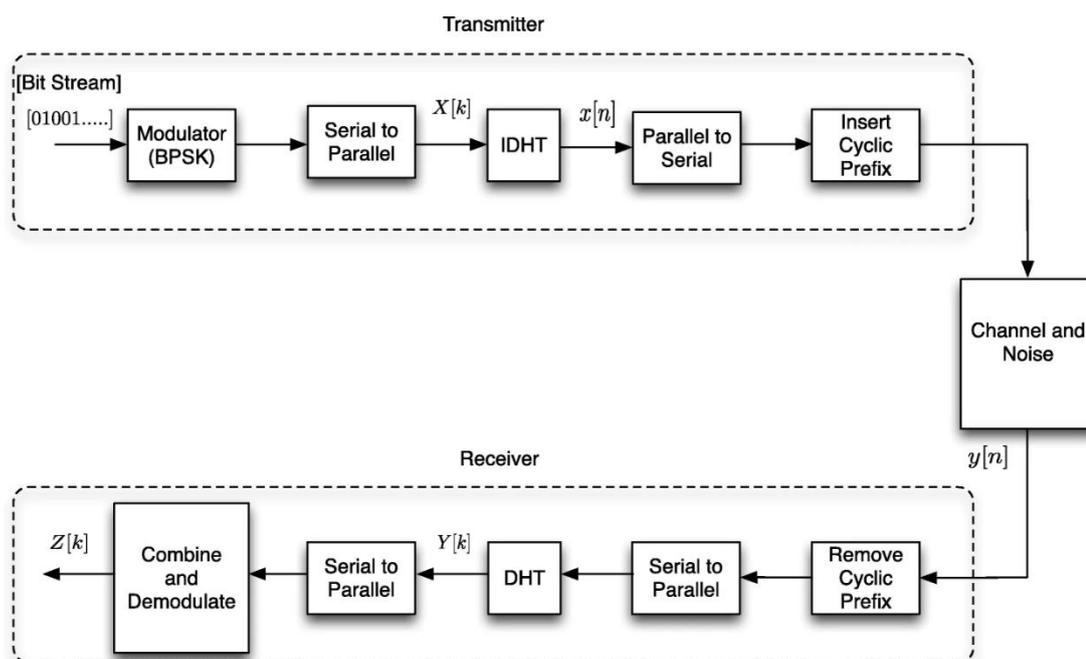


Figura 2. 3: Diagrama de bloques convencional de transmisión/recepción de un sistema OFDM.

Fuente: (Al-Gharabally & Almutairi, 2019)

El efecto de la interferencia entre símbolos (ISI) en los sistemas OFDM, provocada por la dispersión del retardo del canal, es fácilmente atenuado. Un transmisor OFDM se implementa generalmente mediante la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT) con inserción de prefijos cíclicos (CP) o sufijos de relleno cero (ZP). En el receptor, se aplica a cada subportadora un simple ecualizador de canal en el dominio de la frecuencia, en lugar de un ecualizador en el dominio del tiempo de varias tomas, una vez realizada la operación de la transformada rápida de Fourier (FFT).

Con estas ventajas, se ha generalizado su aplicación en los sistemas de comunicación digital existentes, tales como, los sistemas DAB/DVB-T, las

redes de área local inalámbricas (WLAN), las redes de acceso radioeléctrico de banda ancha (BRAN) y la red de área local de alto rendimiento tipo 2 (HIPERLAN-II). OFDM se ha estandarizado como parte de las familias del estándar IEEE802.11 e IEEE802.16 para la transmisión de datos a alta velocidad en redes de área local (LAN) y redes de área metropolitana (MAN) inalámbricas, respectivamente.

Sin embargo, además de las ventajas, OFDM también tiene varios inconvenientes. El primer problema importante es el aumento de la relación de potencia pico a promedio (PAPR), en comparación con los sistemas de una sola portadora. El segundo problema es que la pérdida de capacidad y potencia debida al intervalo de guarda (CP o ZP) puede ser significativa, llegando a ser del 20% como ocurre en IEEE 802.11a. El tercer problema es que las desviaciones de frecuencia y el ruido de fase son sensibles. Por ello, el sistema OFDM requiere más estudios para garantizar que la señal recibida no se distorsione, el ancho de banda se utilice de forma más eficiente y la PAPR se reduzca.

### **2.3. Sincronización en sistemas OFDM**

Dado que los errores de tiempo y frecuencia en las multiportadoras arruinan la propiedad ortogonal entre subportadoras, lo que provoca una gran degradación del rendimiento, las sincronizaciones de tiempo y frecuencia son importantes para construir un sistema de comunicación inalámbrica. Básicamente, el objetivo de la función es obtener parámetros significativos como el inicio de la trama, el reloj de muestreo y el desfase de frecuencia de la señal recibida para una transmisión fiable. Las tareas de sincronización en un sistema OFDM pueden identificarse como sigue:

- Sincronización del reloj de muestreo: en los sistemas prácticos, hay una ligera diferencia entre la frecuencia del reloj de muestreo en el receptor y la correspondiente frecuencia transmitida. En consecuencia, el problema de la interferencia entre portadoras (ICI) se introduce en el receptor y degrada el rendimiento del sistema. Por ello, la sincronización del reloj de muestreo tiene como objetivo reducir esta destrucción a un nivel soportable.

- Sincronización temporal: el objetivo de la sincronización temporal es detectar el inicio de cada símbolo OFDM recibido o de cada trama OFDM (que es un grupo de símbolos OFDM) para identificar la posición exacta de la ventana DFT.
- Sincronización de frecuencias: el objetivo de esta operación es corregir el error de frecuencia entre el transmisor y el receptor que provoca una degradación de la propiedad ortogonal entre subportadoras. El resultado es la degradación del rendimiento del sistema. Por lo tanto, la sincronización de frecuencia es esencial para restablecer la propiedad ortogonal del símbolo OFDM compensando cualquier desplazamiento de frecuencia.

#### **2.4. Estimación de canales en sistemas OFDM**

La estimación del canal es esencial antes de la demodulación de las señales recibidas OFDM debido a la distorsión causada por el desvanecimiento selectivo de frecuencia y el desvanecimiento variable en el tiempo. Las técnicas de estimación de canales se pueden clasificar en dos categorías:

- Técnicas de estimación de canal ciego: estas técnicas estiman el estado de la información del canal sin el conocimiento de la señal transmitida; y
- Técnicas de estimación de canal asistidas por datos: la información conocida agregada a las señales transmitidas se utiliza para estimar la respuesta del canal.

En los sistemas de comunicación inalámbrica que utilizan la técnica de estimación ciega del canal, no se necesita una señal de referencia especializada (de entrenamiento), por lo que se mantiene la eficacia de la transmisión. Por otro lado, sin el conocimiento de las señales transmitidas, para lograr una estimación fiable, es necesario recoger una gran cantidad de datos. Sin embargo, las técnicas de estimación del canal con ayuda de datos necesitan insertar las señales de entrenamiento conocidas en las señales transmitidas. La estimación rápida y precisa del canal puede obtenerse mediante comparando las señales recibidas y las transmitidas.

Una ventaja importante del sistema OFDM es que el bloque de ecualización (véase la figura 2.4) de un lazo puede funcionar independientemente en cada subportadora mediante un banco de ecualizadores de un paso. La  $n$ -ésima salida DFT/FFT,  $R(n)$  se multiplica por un coeficiente de valor complejo  $P(n)$  para eliminar la rotación de fase y la atenuación inducida por el canal. La muestra ecualizada  $Y(n) = P(n)C(n)$  se introduce posteriormente en el bloque de decisión (véase la figura 2.4), que proporciona las decisiones finales  $\hat{C}(n)$  para recuperar la  $C(n)$  en los datos transmitidos.

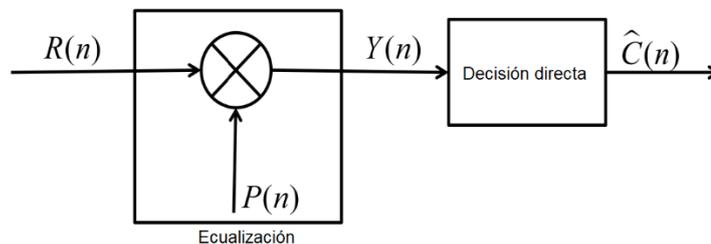


Figura 2. 4: Estimación del canal en el receptor OFDM.  
Fuente: (Samala & Chandraprakash, 2018)

Una estimación sencilla del canal consiste en estimar los coeficientes del ecualizador en la inversión pura del canal, lo que se conoce como ecualización de forzamiento cero (ZF). Los coeficientes del ecualizador se estiman entonces mediante:

$$P(n) = \frac{1}{H(n)} \quad (2.1)$$

mientras que la salida de la DFT tiene la siguiente forma:

$$Y(n) = \frac{R(n)}{H(n)} = C(n) + \frac{W(n)}{H(n)} \quad (2.2)$$

La ecuación (2-32) muestra que la ecualización de forzamiento cero es capaz de compensar completamente cualquier distorsión causada por el canal inalámbrico.

## 2.5. Estimación de la relación señal/ruido

La relación señal/ruido (SNR) se define como la relación entre la potencia de la señal deseada y la potencia del ruido de fondo. Es un parámetro

comúnmente utilizado para evaluar la calidad de la señal en los sistemas de comunicación. Además, el conocimiento de la SNR se utiliza habitualmente para mejorar la estimación del canal de retroalimentación, y es un parámetro de decisión clave en procesos adaptativos como la reconfiguración dinámica de las radios cognitivas (CR), la modulación y codificación adaptativa (AMC), decodificación turbo y asignación de potencia adaptativa.

En el estado del arte investigado, la mayoría de las técnicas de estimación de la relación señal a ruido (SNR) propuestas hasta ahora están relacionadas con la transmisión de una sola portadora. Se revisaron varios algoritmos de estimación de la SNR con la derivación del límite de Cramer-Rao. Algunos de los esquemas de estimación de la SNR de una sola subportadora se utilizan directamente en sistemas OFDM con ruido blanco Gaussiano aditivo (AWGN). Las técnicas de estimación de la SNR en los sistemas OFDM pueden clasificarse en dos categorías: esquemas asistidos por datos y esquemas no asistidos por datos (o esquemas ciegos).

Por ejemplo, los esquemas asistidos por datos requieren señales conocidas, como subportadoras piloto, que pueden transmitirse en cada símbolo OFDM o una secuencia de símbolos OFDM de entrenamiento que se denomina preámbulo. Los esquemas de estimación de la SNR en un sistema OFDM también pueden clasificarse en métodos en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

Como resultado, los esquemas de estimación de la SNR se dividen en uno o un híbrido de los siguientes cuatro tipos: (a) con ayuda de datos en el dominio del tiempo, (b) con ayuda de datos en el dominio de la frecuencia, (b) sin ayuda de datos en el dominio del tiempo y (d) sin ayuda de datos en el dominio de la frecuencia.

## **2.6. Radio definida por software**

La radio definida por software (SDR) se ha impuesto en la formación de redes inalámbricas. La idea de la SDR es convertir los problemas de hardware de la radio en problemas de software. En los sistemas SDR, la mayor parte

del procesamiento de la señal se realiza (o al menos se gestiona) a través del software mediante el uso de matrices de puertas programables de campo (*Field-Programmable Gate Arrays, FPGA*) (véase la figura 2.5), procesadores de propósito general (*General Purpose Processors, GPP*) o cualquier otro dispositivo programable. (Cai et al., 2017; Tsoeunyane et al., 2017). Una de las familias de FPGA más utilizadas en el ámbito académico e investigación es la FPGA Xilinx que se muestra en la figura 2.5.

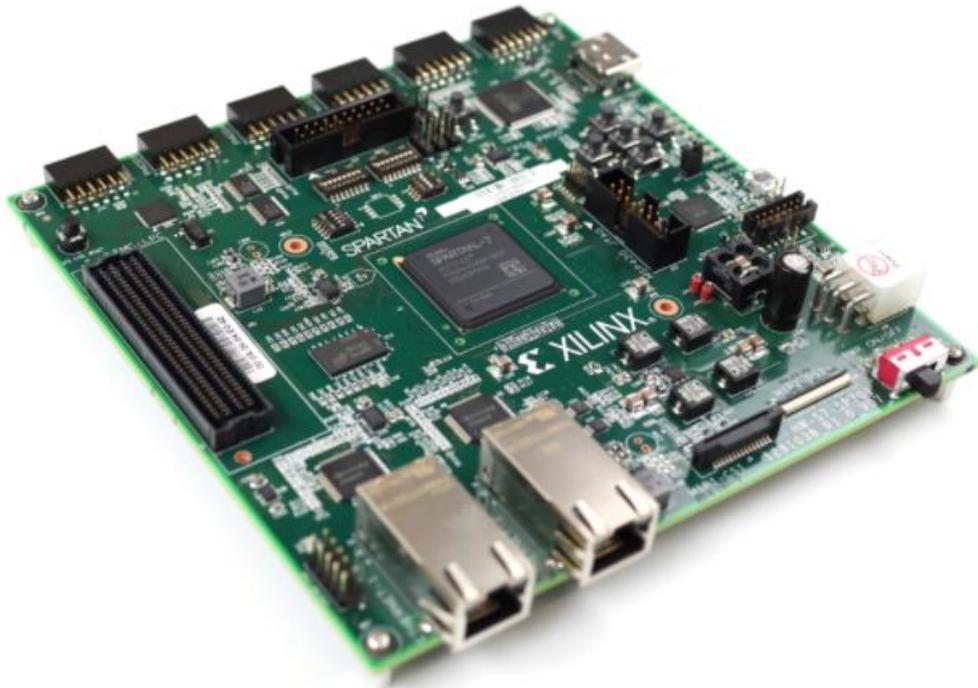


Figura 2. 5: Tarjeta FPGA utilizada como una SDR.  
Fuente: (Xilinx, 2021)

La característica fundamental del SDR es que el software define las formas de onda transmitidas y demodula las formas de onda recibidas. Esta característica del SDR ofrece una gran flexibilidad para la investigación y el desarrollo de las comunicaciones inalámbricas. Una variedad de métodos, algoritmos y protocolos recién desarrollados pueden implementarse y verificarse fácilmente de manera similar a como si se hicieran en un banco de pruebas construido por plataformas de radio reales.

Para ello, los componentes de radiofrecuencia (RF), como mezcladores y filtros, se trasladan también al dominio del software, donde el procesamiento digital de la señal se realiza en banda base. La aparición de convertidores

digital-analógico y analógico-digital de alta velocidad y bajo coste ha acercado el concepto de radio definida por software a la realidad. El modelo de canal SDR se muestra en la figura 2.6.

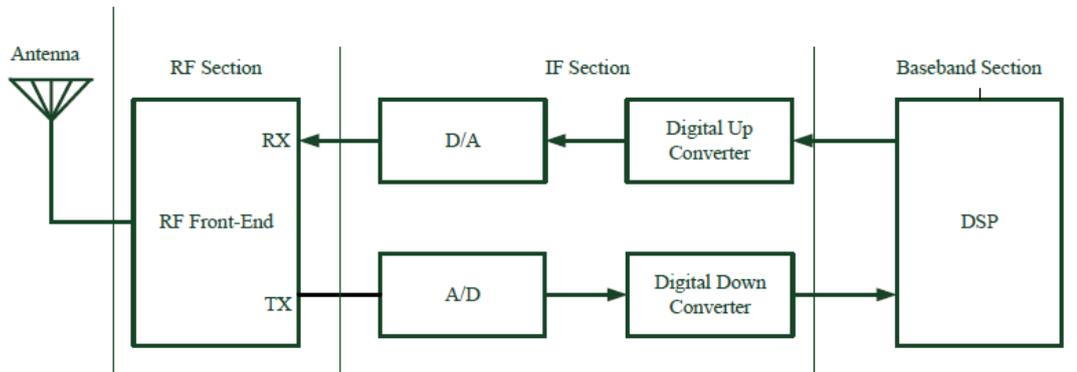


Figura 2. 6: Arquitectura de una SDR.  
Fuente: (Marwanto et al., 2009)

El enfoque SDR presentado anteriormente en el caso ideal es extremadamente sencillo y flexible. Sin embargo, no es práctico debido a las limitaciones del hardware real. A continuación, se presentan las diferentes limitaciones del hardware:

#### a) Convertidores analógico-digitales.

La frecuencia de muestreo de acuerdo con el teorema de muestreo de Nyquist debe ser al menos dos veces mayor que el ancho de banda y los convertidores Analógicos/Digitales (ADC) modernos son capaces de obtener frecuencias de muestreo en el área de 100 Msps (Megamuestras por segundo). Por lo tanto, el ancho de banda se limita a 50 MHz. Si bien este ancho de banda es suficiente para la mayoría de las aplicaciones modernas, la frecuencia de la portadora suele ser superior a 50 MHz. Por lo tanto, generalmente se requiere una interfaz de radiofrecuencia (RF) para convertir la señal recibida en una frecuencia intermedia (IF). Además, la resolución del ADC afecta el rango dinámico del receptor. El rango dinámico se puede estimar generalmente como:

$$R = n(6 \text{ dB})$$

Donde,  $R$  es el rango dinámico del convertidor A/D y  $n$  es el número de bits en el convertidor A/D.

#### **b) Velocidad del bus.**

Este es otro problema para recibir los datos del convertidor A/D al ordenador (PC). En la práctica, existe una velocidad de bus máxima para la tasa de datos posible, que limita el producto de la tasa de muestreo y la resolución de las muestras. La velocidad del bus en los PC's suele oscilar entre unos pocos Mbps y varios Gbps.

#### **c) Rendimiento de la unidad de procesamiento:**

El rendimiento de la unidad central de procesamiento (CPU) y la tasa de muestreo en el procesamiento en tiempo real determinan directamente el número de operaciones computacionales que pueden ser ejecutadas por muestra y el número de muestras debe ser procesado tan rápido como lo reciben. Por lo tanto, se requieren CPUs rápidas, una programación óptima y posiblemente una paralelización. Si esto no es suficiente, existe el compromiso de utilizar un algoritmo de procesamiento de señales de menor calidad, pero más rápido, con la finalidad de que la señal se procese con mayor rapidez para reducir el número de operaciones matemáticas.

#### **d) Latencia.**

Por lo general, los ordenadores personales no están contruidos para aplicaciones de procesamiento en tiempo real. Por lo tanto, en realidad se introduce una latencia bastante alta en el sistema SDR. Muchos estándares inalámbricos requieren una sincronización precisa. Por lo tanto, la latencia debe ser considerada cuidadosamente durante la implementación en un sistema SDR.

## **Capítulo3: Diseño, Implementación y Análisis de Resultados**

### **3.1. Descripción del modelado de simulación de red propuesto.**

Las señales que se han considerado en este capítulo para la clasificación de la modulación que incluyen las modulaciones digitales de una sola portadora muy utilizadas en la actualidad: QAM, PAM y PSK. Para las modulaciones multiportadora, la señal considerada en las simulaciones es la señal OFDM. En la actualidad, los sistemas OFDM se emplea actualmente en muchos sistemas de comunicación inalámbrica. Algunos de estos sistemas de comunicación inalámbrica son: (a) las redes de evolución a largo plazo (LTE), (b) redes de área local inalámbrica (WLAN), (c) estándares de difusión de vídeo digital (DVB) como DVB-T y DVB-H, (d) IEEE 802.16, y (e) WiMax.

En este capítulo, primero se describe brevemente uno de los métodos que se ha aplicado para implementar este algoritmo. A continuación, se describe con más detalle de los resultados que se han obtenido de las simulaciones y de lo que significan.

### **3.2. Diseño del modelado en MatLab/Simulink y su uso en FPGA.**

Para simular señales de multiplexación por división de frecuencia ortogonales (OFDM), se ha creado el script en MatLab que será cargado en el bloque de programación diseñado en Simulink para la generación de señales del sistema OFDM usando modulaciones digitales 16-QAM, BPSK, QPSK y 8-PSK. En la figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques del modelo propuesto del sistema OFDM y cuyas variantes son las modulaciones digitales ya indicadas. Este modelo puede ser convertido al lenguaje de descripción de hardware (VHDL) utilizando el software Xilinx y ser cargada su código en la FPGA de Xilinx.

El modulador y el demodulador de OFDM utilizan procesos de transformada rápida de Fourier (FFT) y transformada inversa rápida de Fourier (IFFT) para realizar las tareas específicas de detección de señales. La señal transmitida y la señal recibida para el modelo propuesto de la figura 3.1 se representan en la figura 3.2 y sus diagramas de constelaciones I-Q ("I" indica

en fase y “Q” indica en cuadratura) se muestran en la figura 3.3. La simulación utiliza primero un bloque para convertir los datos de formato serie a paralelo. Los siguientes bloques aseguran que la representación en el dominio de la frecuencia tiene simetría FFT Hermitian. La simetría Hermitian significa que se garantiza la relación entre las portadoras.

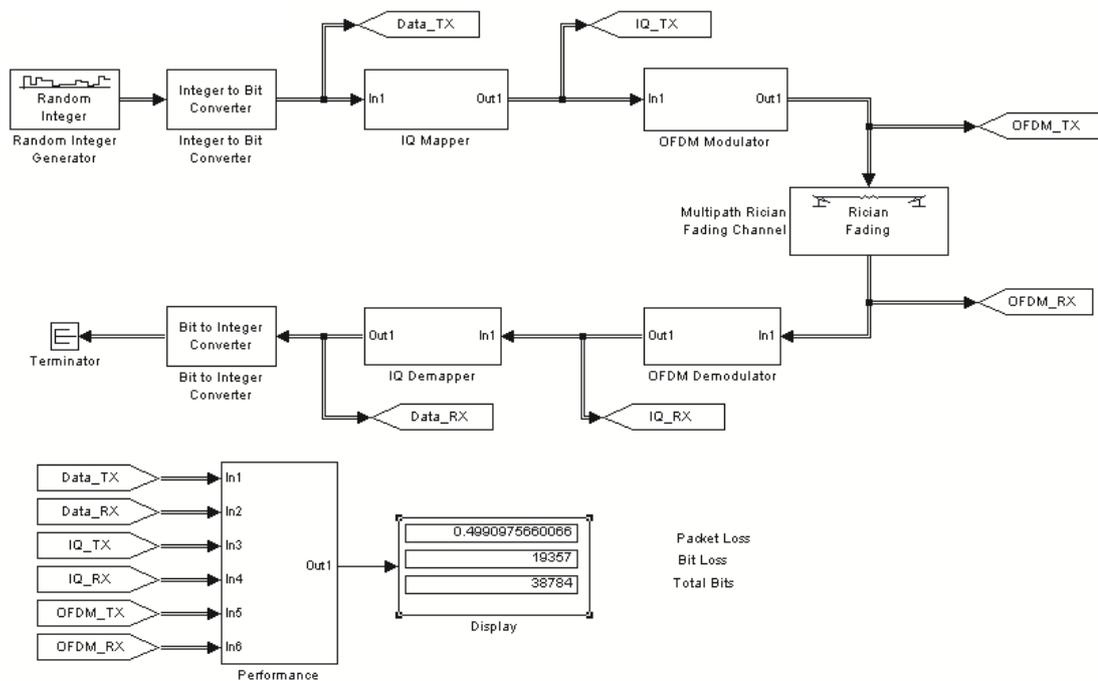


Figura 3. 1: Diseño en Simulink del sistema de transmisión y recepción OFDM.  
Elaborado por: Autor.

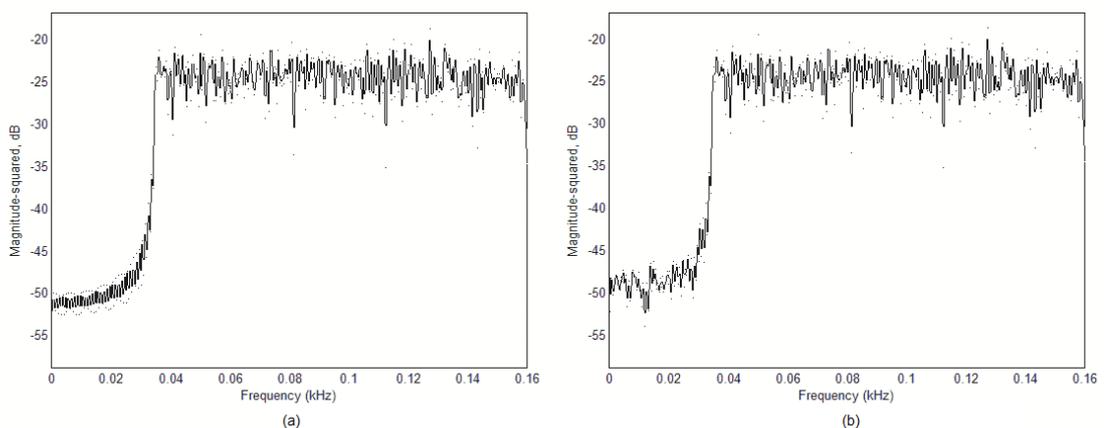


Figura 3. 2: Respuestas del espectro de las señales (a) transmitida y (b) recibida.  
Elaborado por: Autor.

Después de este paso, las subportadoras se tratarán de la misma manera que las modulaciones de una sola portadora. En la figura 3.3 se muestran los diagramas de constelaciones (I-Q) de las señales transmitidas y recibidas del sistema OFDM con modulación digital 16-QAM. Las señales de

esta simulación se utilizan para estudiar las pruebas de normalidad, así como el rendimiento del algoritmo bajo diferentes características del canal.

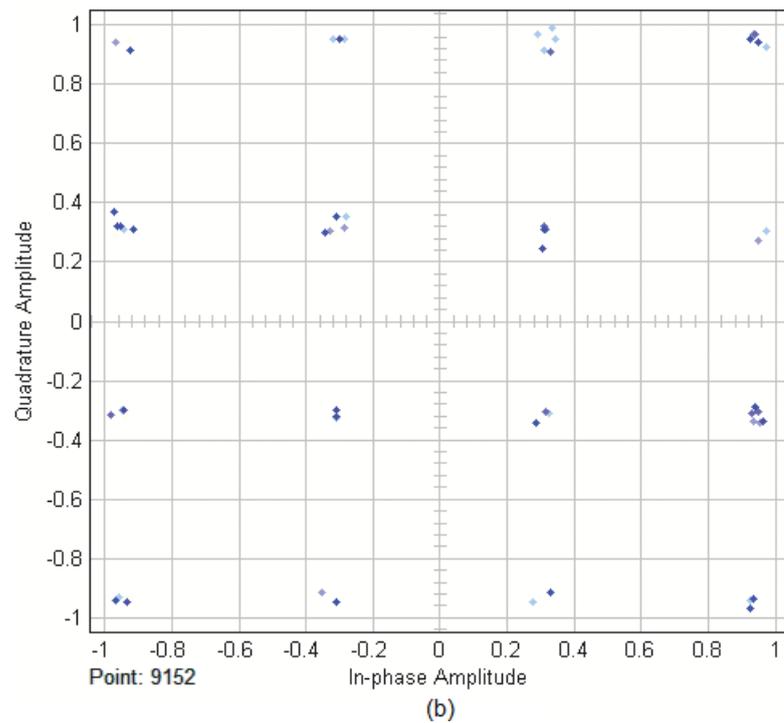
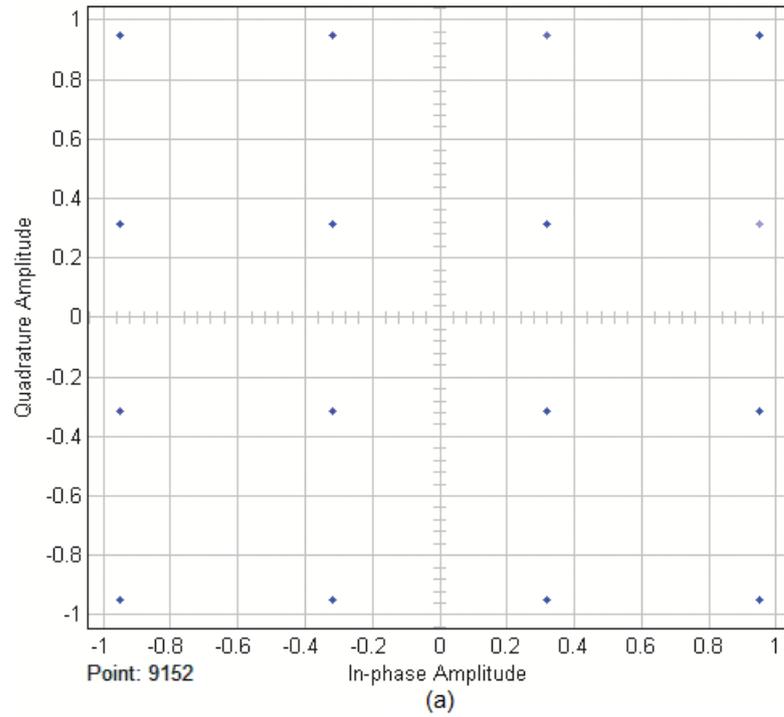


Figura 3. 3: Representación de los diagramas de constelaciones de las señales (a) transmitida y (b) recibida del sistema OFDM usando modulación 16-QAM.  
Elaborado por: Autor.

### 3.3. Resultados del algoritmo de agrupación o asignación en diagramas de constelaciones I-Q.

En la presente sección se han realizado varias pruebas para determinar cuán eficiente es el algoritmo de agrupación o Clustering en comparación con otros algoritmos y cómo se puede optimizar el algoritmo con respecto al número de muestras y el número de bits transmitidos. Las figuras 3.4 a 3.9 muestran los errores relativos con respecto al número de muestras transmitidas en las modulaciones digitales, tales como, 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 8-PSK y 16-PSK en presencia de una relación señal a ruido (SNR) de 20 dB.

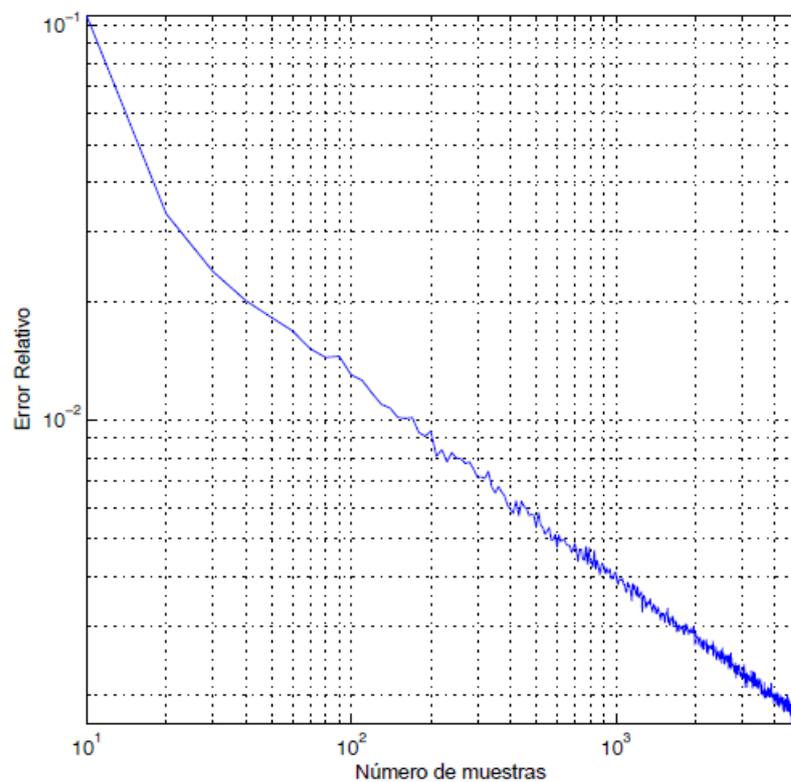


Figura 3. 4: Error relativo vs número de muestras en la modulación 4-QAM.  
Elaborado por: Autor.

En todas estas figuras (3.4 a 3.9) se observa que la CDE disminuye bruscamente hasta que alcanza un determinado umbral a partir del cual sigue disminuyendo, pero no tan bruscamente como antes. Se puede concluir que, hasta un cierto número de muestras, añadir cualquier muestra nueva tiene un impacto significativo en la precisión del algoritmo propuesto y en la búsqueda del centro exacto del clúster. Sin embargo, una vez superado este umbral, las nuevas muestras añadidas no tendrán el mismo impacto.

Dado que el objetivo es optimizar el algoritmo y encontrar el menor número de muestras posible, y encontrar este nivel de umbral de muestras puede ser muy útil. La figura 3.4 muestra la potencia promedio del error relativo en la búsqueda de centros de cluster (agrupamientos) en una señal 4-QAM. Se puede observar en la figura 3.4 el error relativo con respecto al número de muestras en una modulación digital 4-QAM con una relación señal a ruido (SNR) de 20 dB. El error relativo es más alto para una muestra pequeña, por ejemplo, para una muestra igual a 10 se tiene un error relativo de 0.10. Pero cuando se tiene una muestra más alta, por ejemplo, 1000 muestras se tiene un error relativo de  $3 \cdot 10^{-3} = 0.003$ . Y si se incrementa a 5000 muestras el error relativo es  $10^{-3} = 0.001$ . Por lo tanto, se deduce que a mayor muestra menor error relativo en las señales de modulaciones digitales.

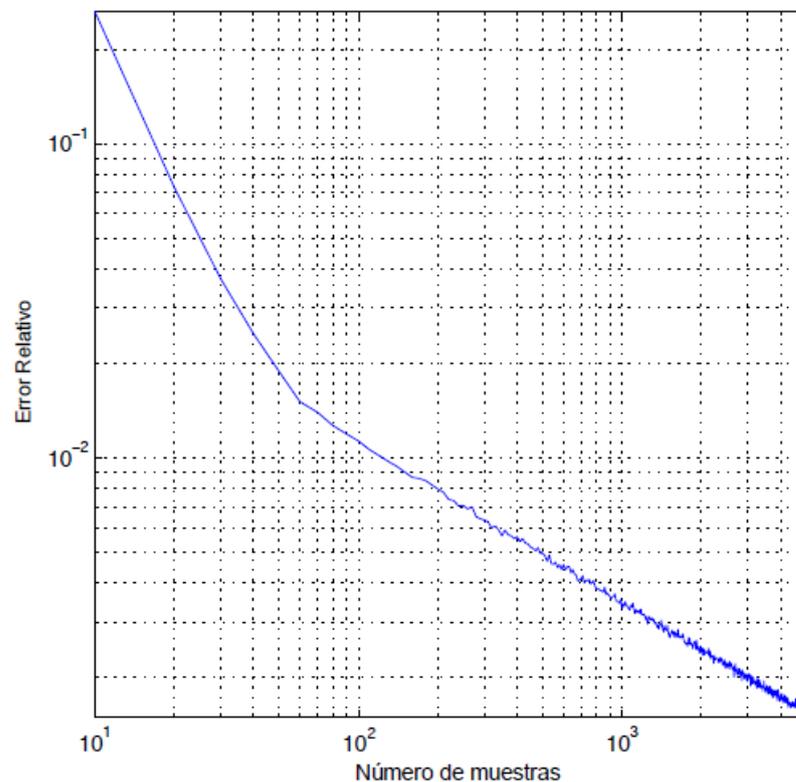


Figura 3. 5: Error relativo vs número de muestras en la modulación 8-QAM.  
Elaborado por: Autor.

De manera similar a lo mostrado en la figura 3.4, la potencia promedio del error relativo para las modulaciones digitales 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 8-PSK y 16-PSK se muestran en las figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 respectivamente. Se puede observar en las figuras 3.5 a 3.9 que a mayor

número de muestras el error relativo promedio disminuye notablemente para cada modulación digital.

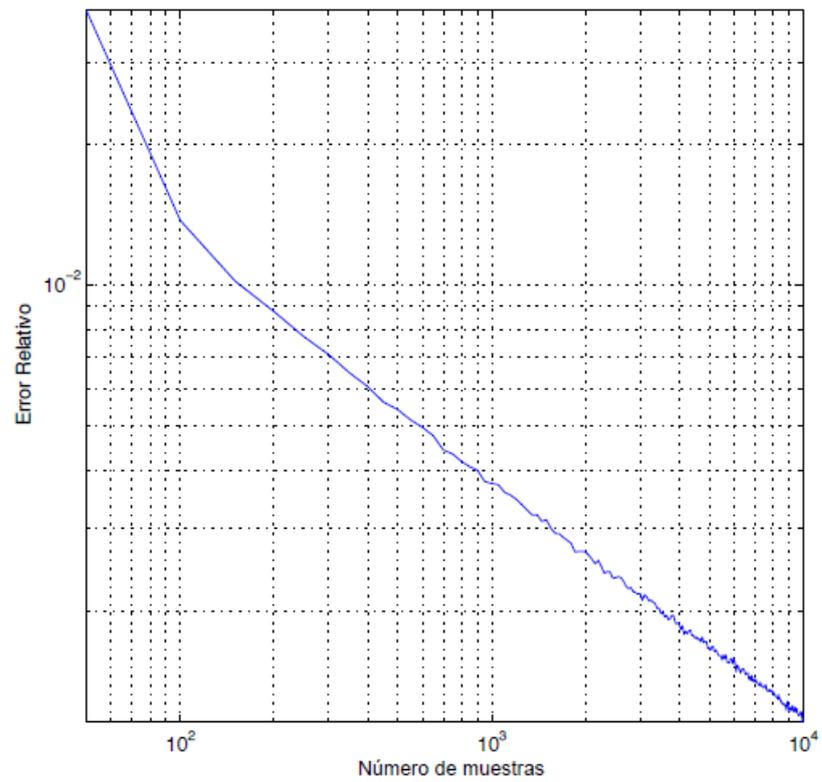


Figura 3. 6: Error relativo vs número de muestras en la modulación 16-QAM.  
Elaborado por: Autor.

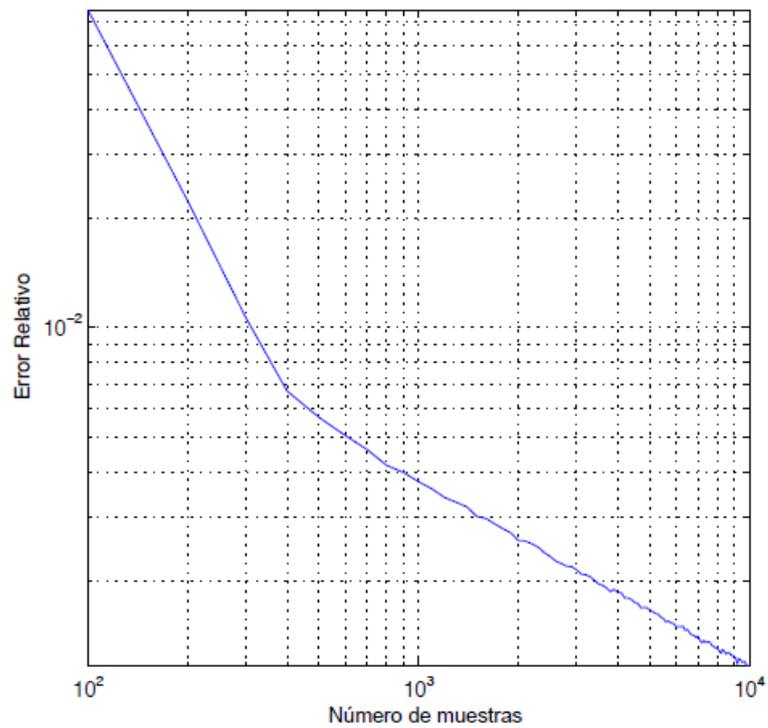


Figura 3. 7: Error relativo vs número de muestras en la modulación 64-QAM.  
Elaborado por: Autor.

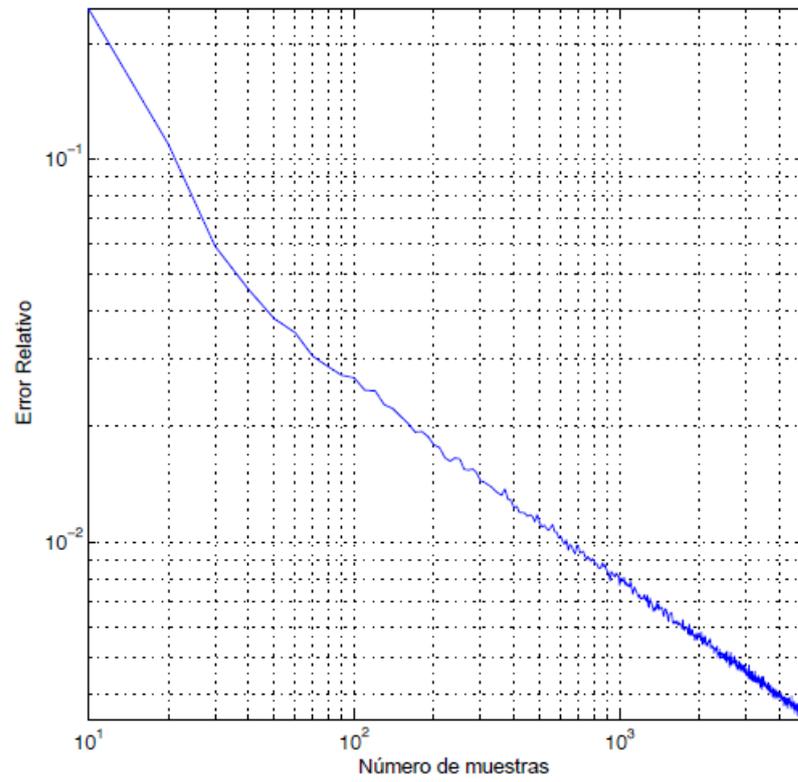


Figura 3. 8: Error relativo vs número de muestras en la modulación 8-PSK.  
Elaborado por: Autor.

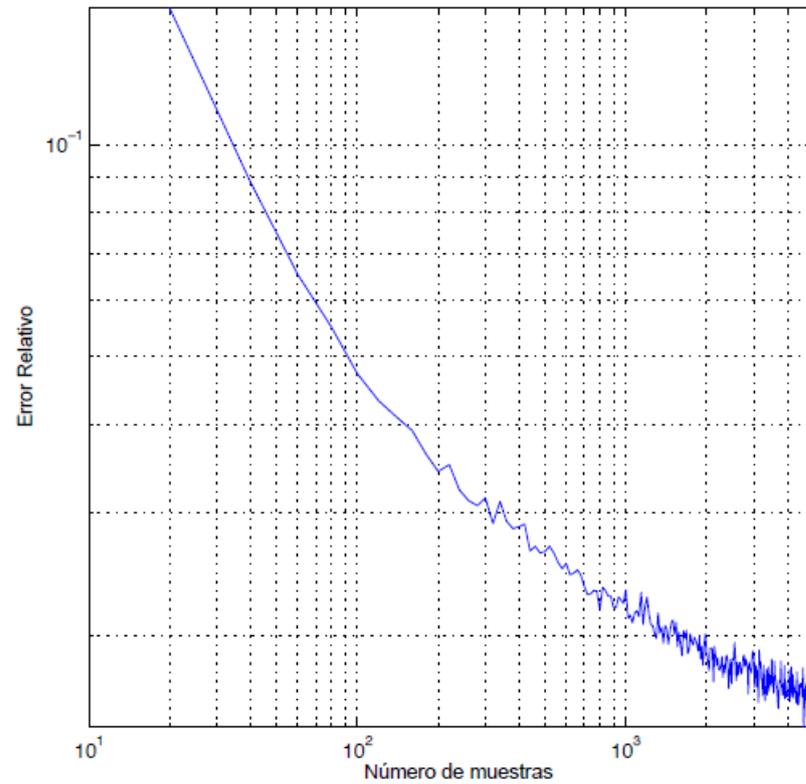


Figura 3. 9: Error relativo vs número de muestras en la modulación 16-PSK.  
Elaborado por: Autor.

Ahora, las figuras 3.10 a 3.13 muestran el error relativo con respecto al número de bits transmitidos en las modulaciones digitales 4-QAM, 8-QAM, 64-QAM y 8-PSK (no se consideraron 16-QAM y 16-PSK) en presencia de una SNR de 20 dB. Comparando estas gráficas entre sí, no se observa ninguna distinción correlativa entre ellas, tal como sucedió en el análisis con respecto al número de muestras. Sin embargo, esto sería lógico dado que se está considerando la señal antes del demodulador, lo cual indica que no se tiene conocimiento de los bits por símbolo.

La figura 3.10 muestra la potencia promedio del error relativo en la búsqueda de centros de cluster en una señal 4-QAM con una SNR de 20 dB en la que a mayor número de bits disminuye el error relativo usando la modulación 4-QAM. De manera similar sucede en los resultados obtenidos del error relativo contra el número de bits en las figuras 3.11 a 3.13.

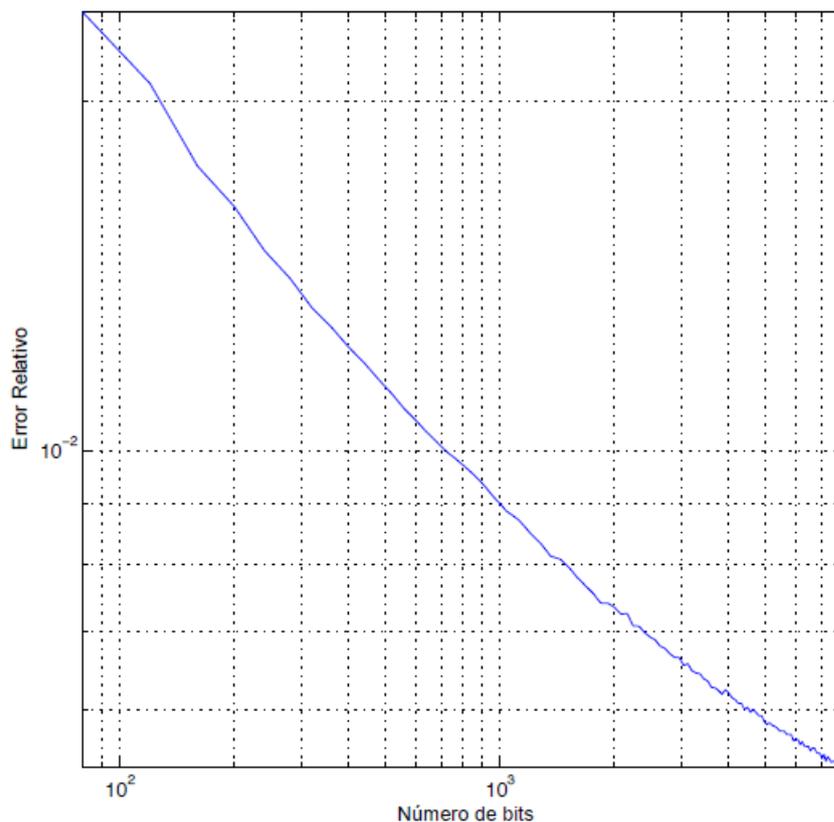


Figura 3. 10: Error relativo vs número de bits en la modulación 4-QAM.  
Elaborado por: Autor.

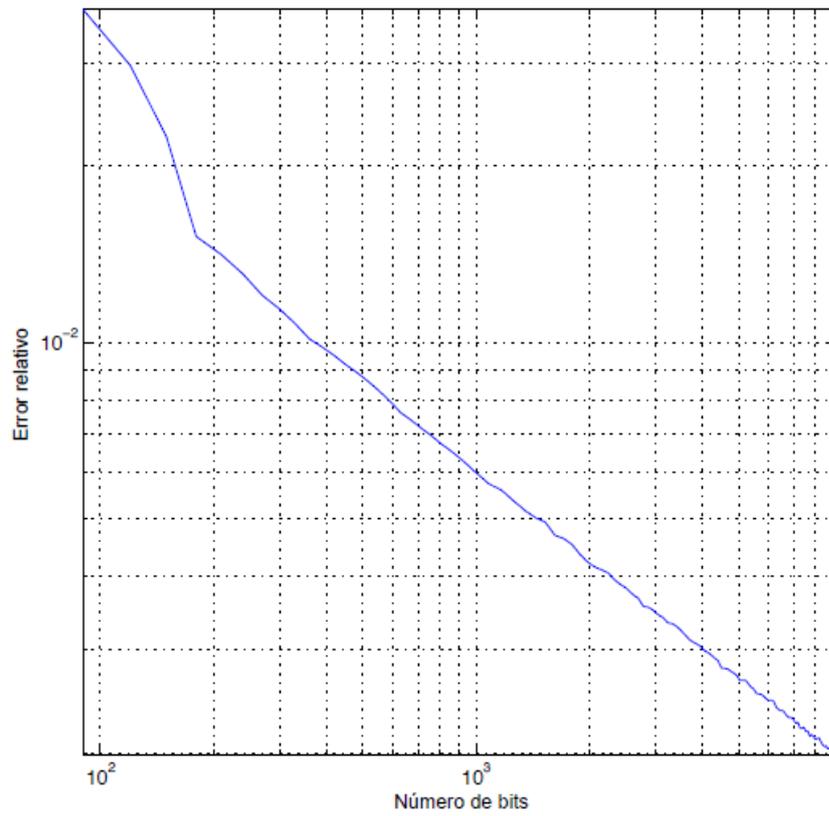


Figura 3. 11: Error relativo vs número de bits en la modulación 8-QAM.  
Elaborado por: Autor.

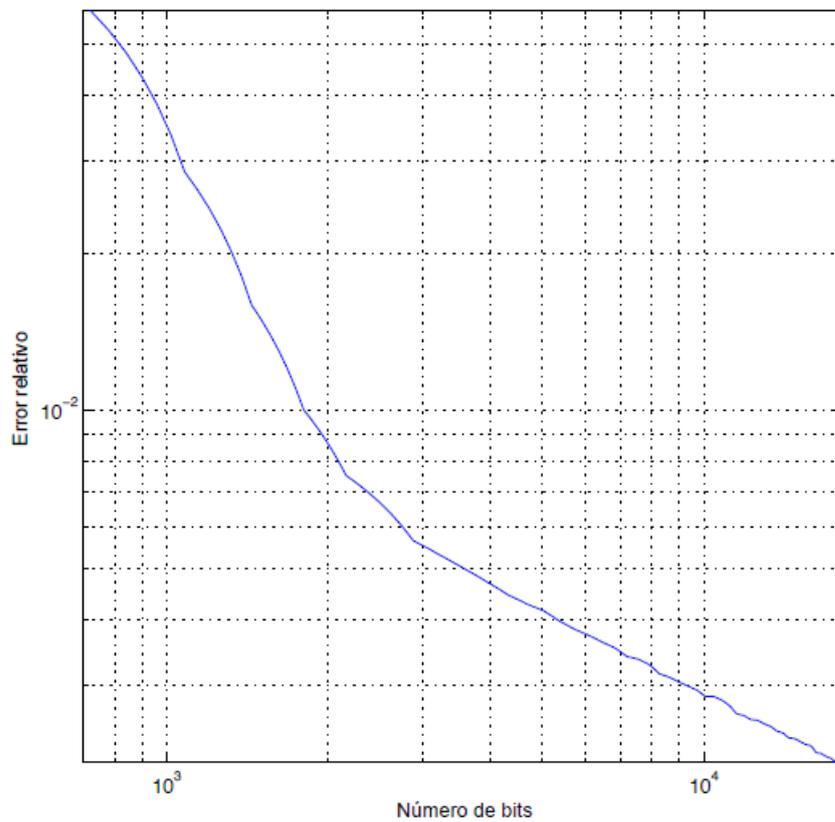


Figura 3. 12: Error relativo vs número de bits en la modulación 64-QAM.  
Elaborado por: Autor.

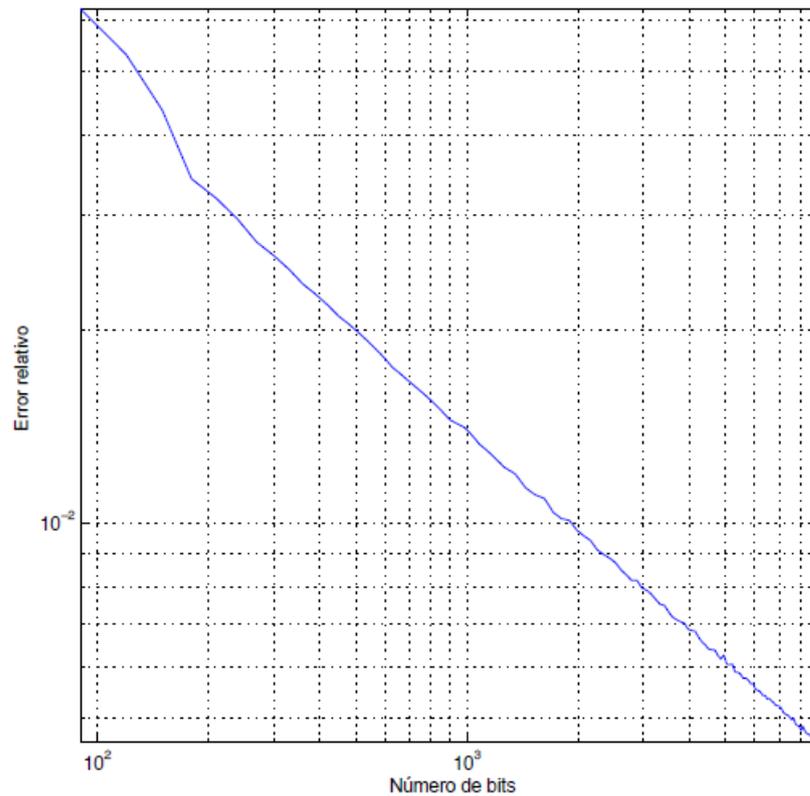


Figura 3. 13: Error relativo vs número de bits en la modulación 8-PSK.  
Elaborado por: Autor.

Las figuras 3.14 y 3.15 muestran los errores relativos que indican la desviación de los centros de clústeres encontrados con relación a los estados de modulación reales para las modulaciones estudiadas con respecto a la relación señal a ruido (SNR). El número de muestras en todas estas simulaciones es de 512.

El error relativo (véase la figura 3.14) muestra la desviación de los centros de cluster encontrados con respecto a los centros de cluster reales en señales 4-QAM y 8-QAM con respecto a la SNR. Se observa en la figura 3.14 que las modulaciones 4-QAM y 8-QAM tienen una SNR de 30 dB y 18 dB máximas y en ambos casos presentan una menor tasa de error.

De manera similar, la figura 3.15 muestra la desviación de los centros de cluster para las señales de modulación 16-PSK y 8-PSK. De la figura 3.15 se denota que la SRN de 30 dB (máxima) en la modulación 16-PSK tiene la menor tasa de error con relación a la modulación 8-PSK que es un poco mayor la tasa de error.

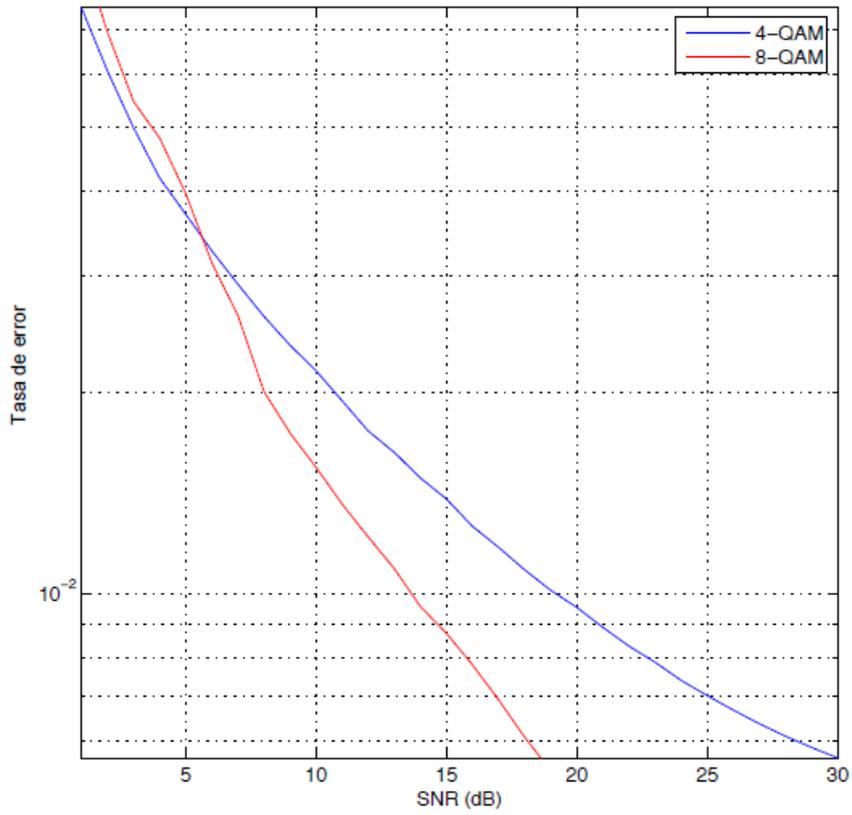


Figura 3. 14: Comparativa de la tasa de error en las modulaciones QAM.  
Elaborado por: Autor.

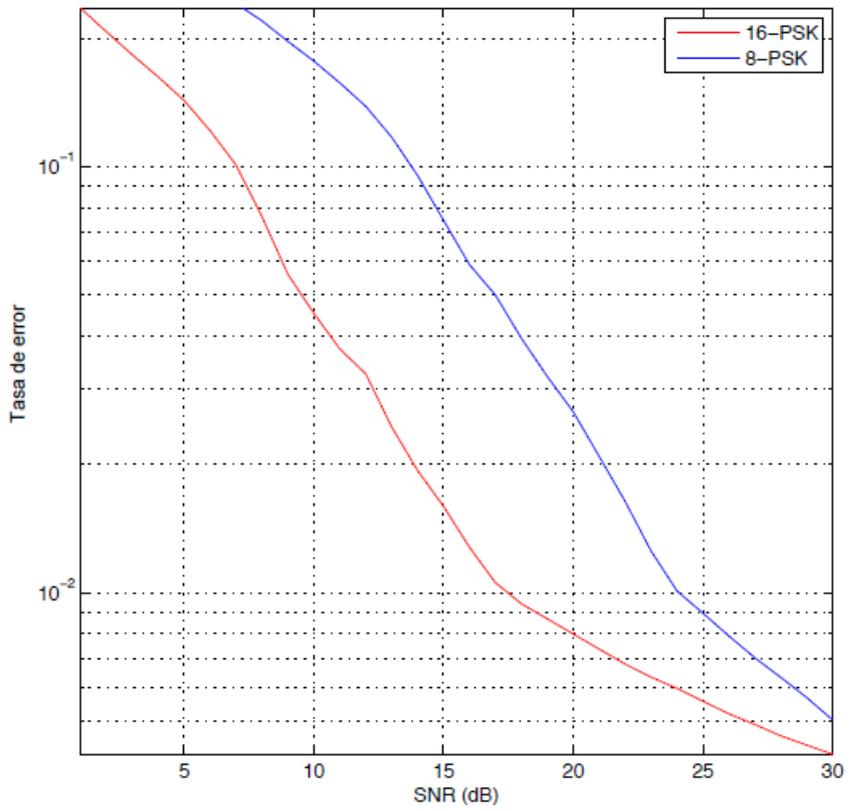


Figura 3. 15: Comparativa de la tasa de error en las modulaciones PSK.  
Elaborado por: Autor.

Las figuras 3.16 a 3.19 muestran el error desviación acumulada (CDE) o llamado error relativo para una modulación 8-PSK en el receptor, cuando se compara con el esquema de modulación 8-PSK en el banco de modulaciones realizado y es comparado con los esquemas de modulaciones QPSK, 8-QAM, 16-QAM y 16-PSK. Se ha elegido la modulación 8-PSK como ejemplo para compararlo con los esquemas de modulación de orden superior e inferior. En ambos casos se observa que el error relativo presenta un nivel de umbral distinto para elegir el esquema de modulación correcto.

Esta distinción funciona bien para niveles de relación señal a ruido (SNR) tan bajos como 3 dB. Si se elige un umbral cuidadosamente establecido de forma que el CDE derivado del esquema de modulación correcto sea menor y el CDE de los esquemas de modulación incorrectos sea mayor que este umbral, se podrá configurar el clasificador de una manera que elija la modulación correcta.

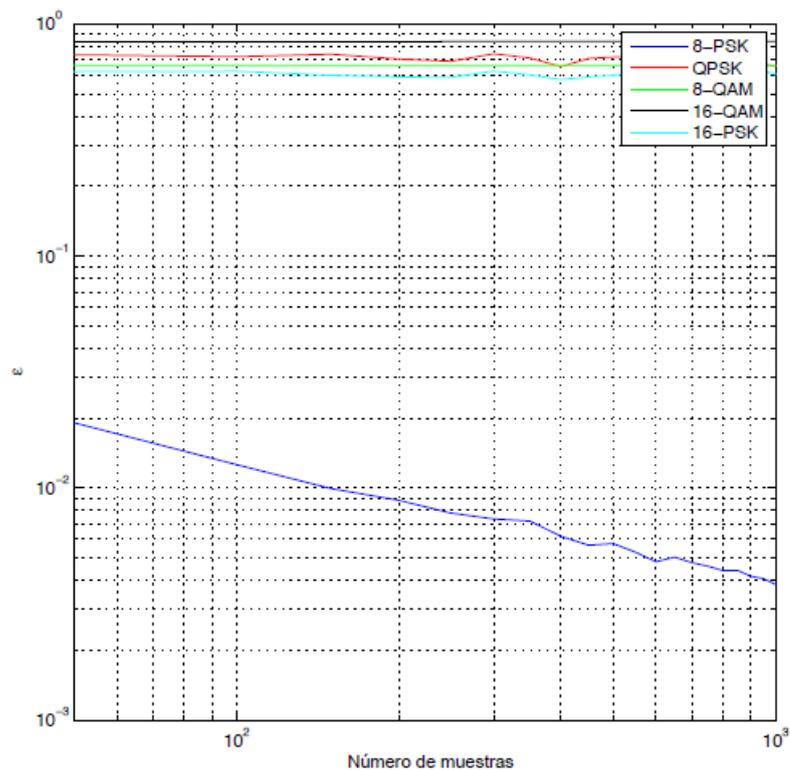


Figura 3. 16: Comparativa de la potencia de error relativo con una SNR de 20 dB.  
Elaborado por: Autor.

De manera similar, las figuras 3.17, 3.18 y 3.19 muestran la comparación de la potencia promedio de error con SNR de 10, 5 y 3 dB, respectivamente.

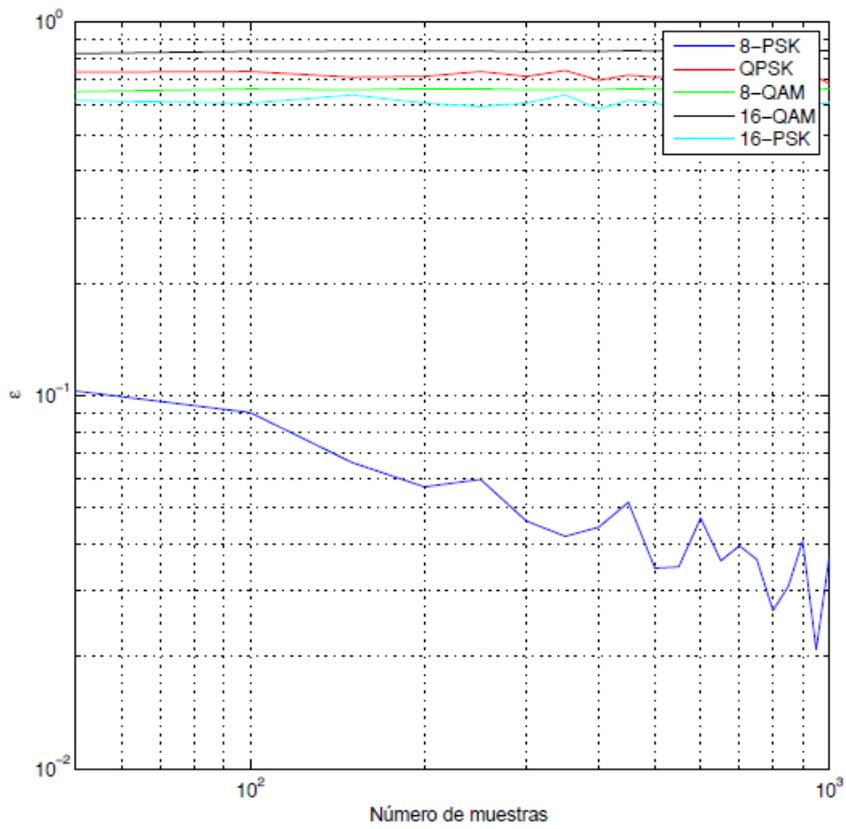


Figura 3. 17: Comparativa de la potencia de error relativo con una SNR de 10 dB.  
Elaborado por: Autor.

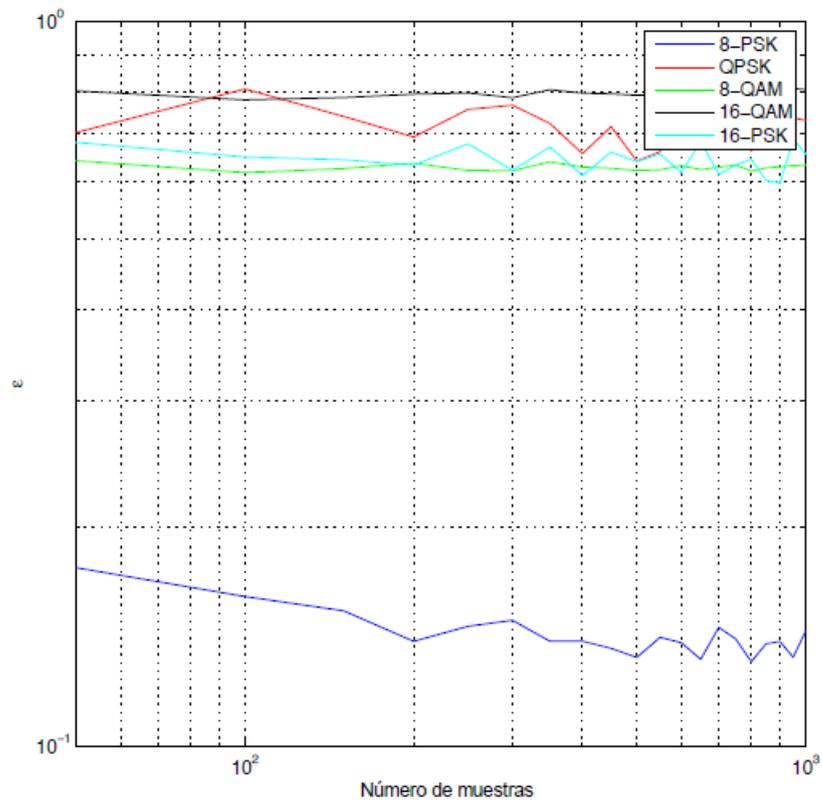


Figura 3. 18: Comparativa de la potencia de error relativo con una SNR de 5 dB.  
Elaborado por: Autor.

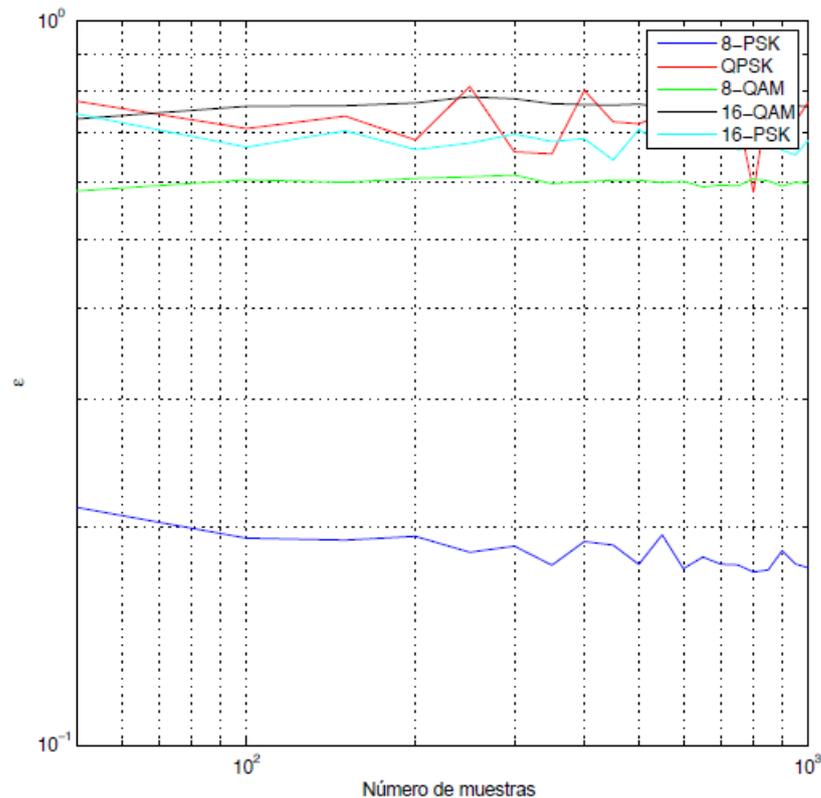


Figura 3. 19: Comparativa de la potencia de error relativo con una SNR de 3 dB.  
Elaborado por: Autor.

En las figuras 3.20 a 3.24 se presentan las gráficas comparativas del error de desviación acumulada ( $\varepsilon_{CDE}^2$ ) de la potencia promedio para señales recibidas con modulación 8-PSK frente a las demás modulaciones digitales, QPSK, 8-QAM, 16-QAM y 16-PSK con una relación señal a ruido (SNR) de 20, 15, 10, 5 y 3 dB, respectivamente. En todas las gráficas comparativas se tienen 1000 muestras.

De las cinco figuras (3.20 a 3.24) se observa que en la figura 3.20 con una SNR de 20 dB se tiene el más bajo valor del error de desviación acumulada, es decir, por debajo de  $10^{-4}$ . La figura 3.21 muestra el segundo valor más bajo del error de desviación por debajo de  $10^{-3}$  para una SNR de 15 dB. Mientras que para las figuras 3.22 a 3.24 los valores del error de desviación acumulada son los más altos en comparación con las figuras 3.20 y 3.21.

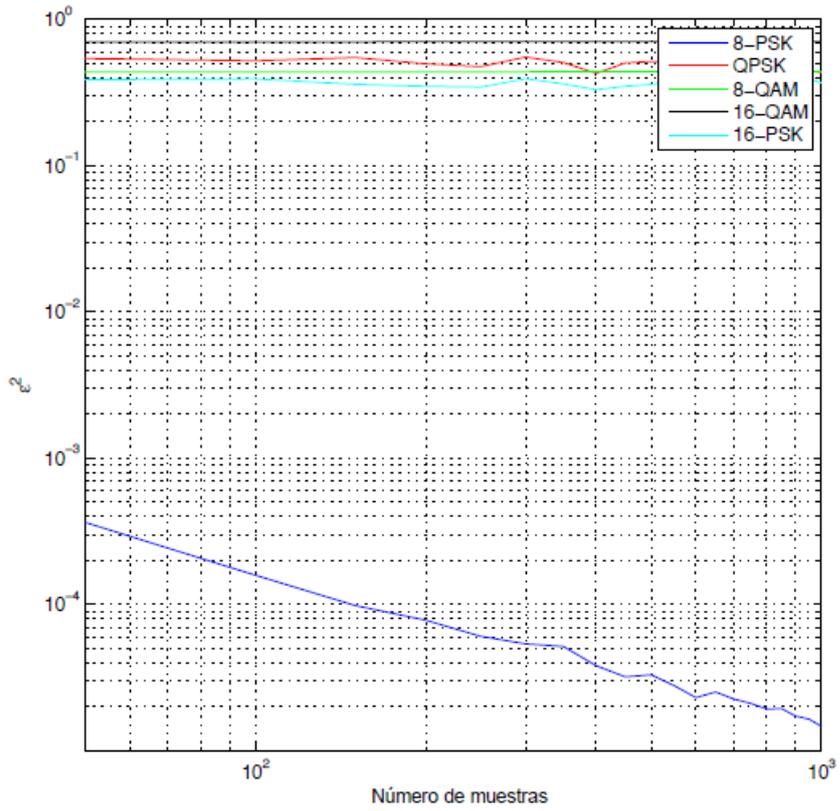


Figura 3. 20: Comparativa del error de desviación acumulada para una SNR de 20 dB.

Elaborado por: Autor.

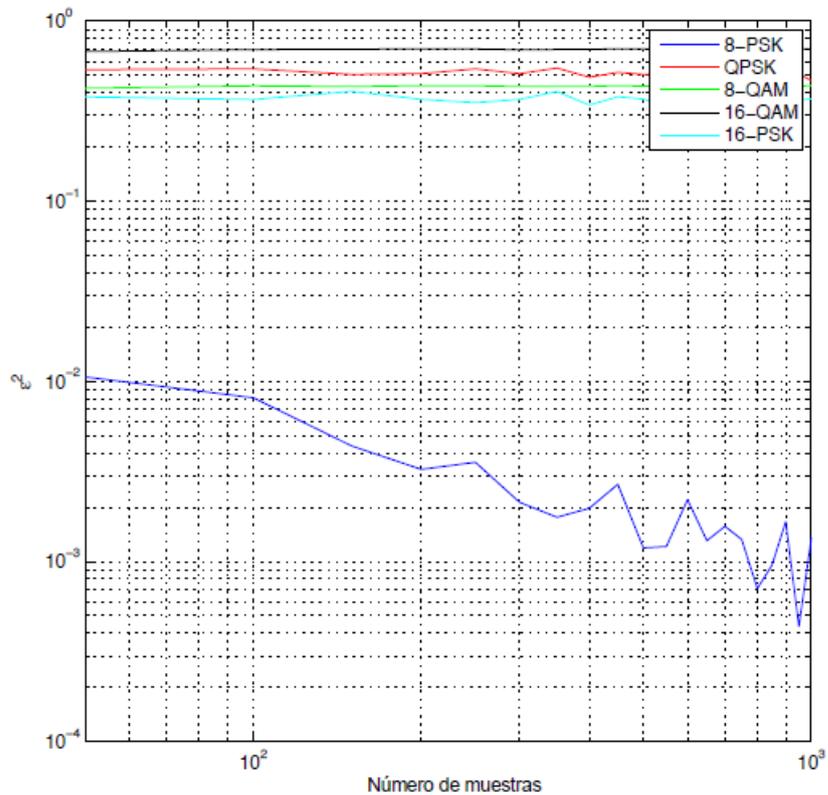


Figura 3. 21: Comparativa del error de desviación acumulada para una SNR de 10 dB.

Elaborado por: Autor.

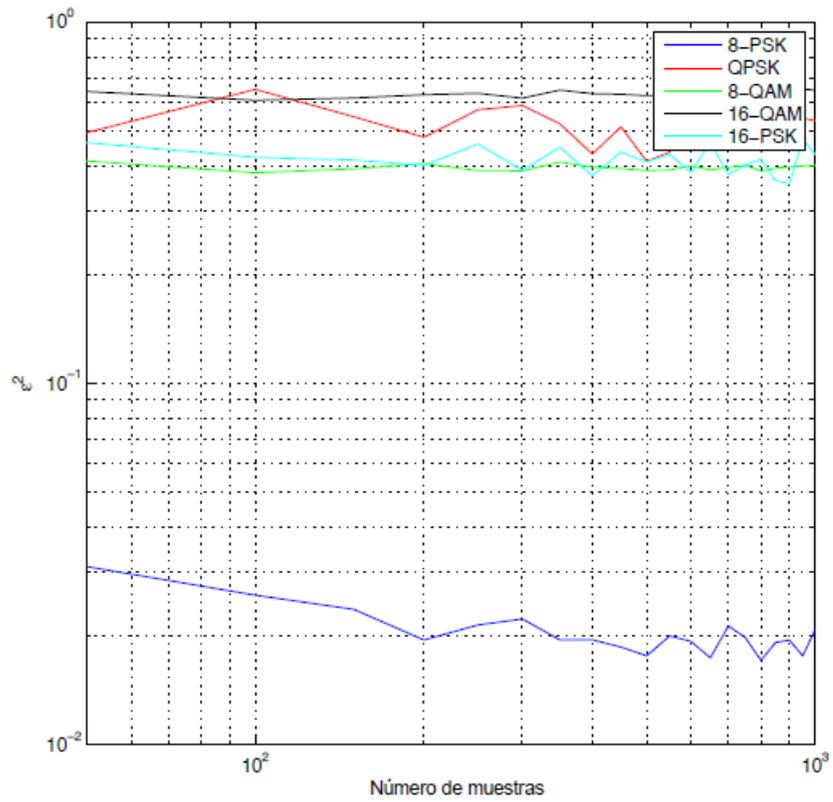


Figura 3. 22: Comparativa del error de desviación acumulada para una SNR de 5 dB.

Elaborado por: Autor.

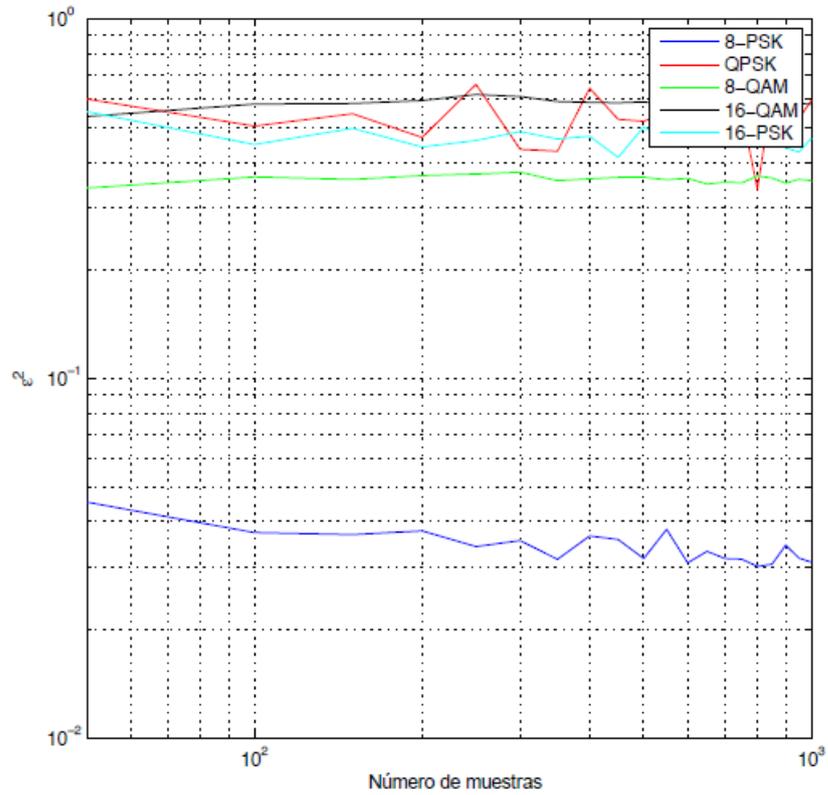


Figura 3. 23: Comparativa del error de desviación acumulada para una SNR de 3 dB.

Elaborado por: Autor.

Las figuras 5.24 a 5.29 ofrecen más ejemplos sobre el rendimiento de este algoritmo. Estos incluyen la aplicación del clasificador a las señales moduladas 16-PSK (véanse las figuras 3.24 y 3.25), 16-QAM (véanse las figuras 3.26 y 3.27) y 64-QAM (véanse las figuras 3.28 y 3.29) recibidas para una relación señal a ruido (SNR) de 20 y 3 dB en cada caso.

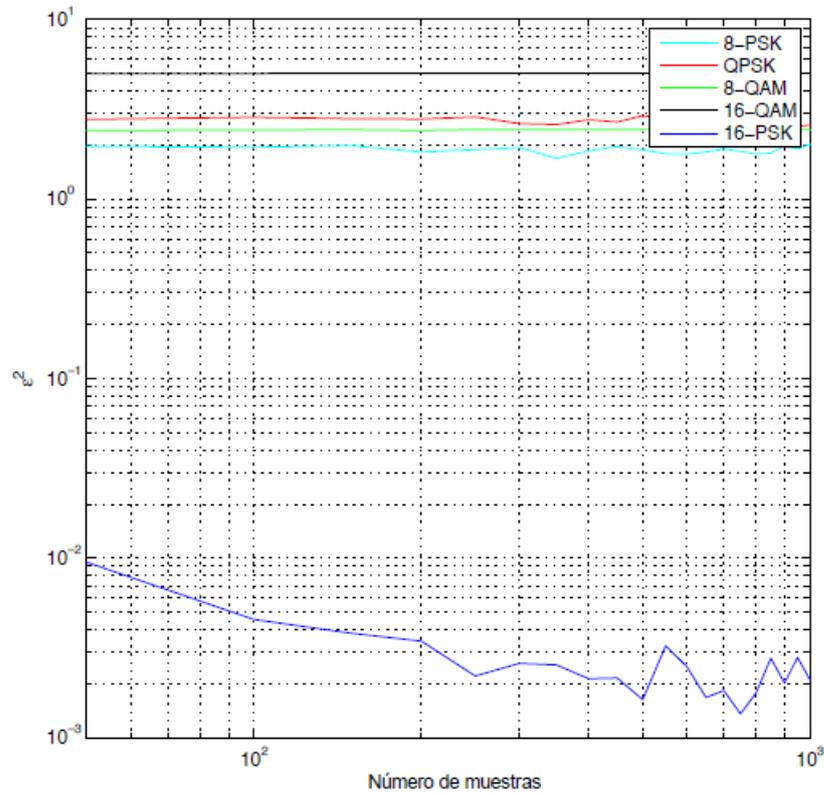


Figura 3. 24: Comparativa del error de desviación acumulada para la modulación 16-PSK apropiada para una SNR de 20 dB.  
Elaborado por: Autor.

En estos casos también hay una muy buena distinción entre los esquemas de modulación correctos e incorrectos en niveles bajos de SNR, lo suficientemente clara como para permitir la clasificación.

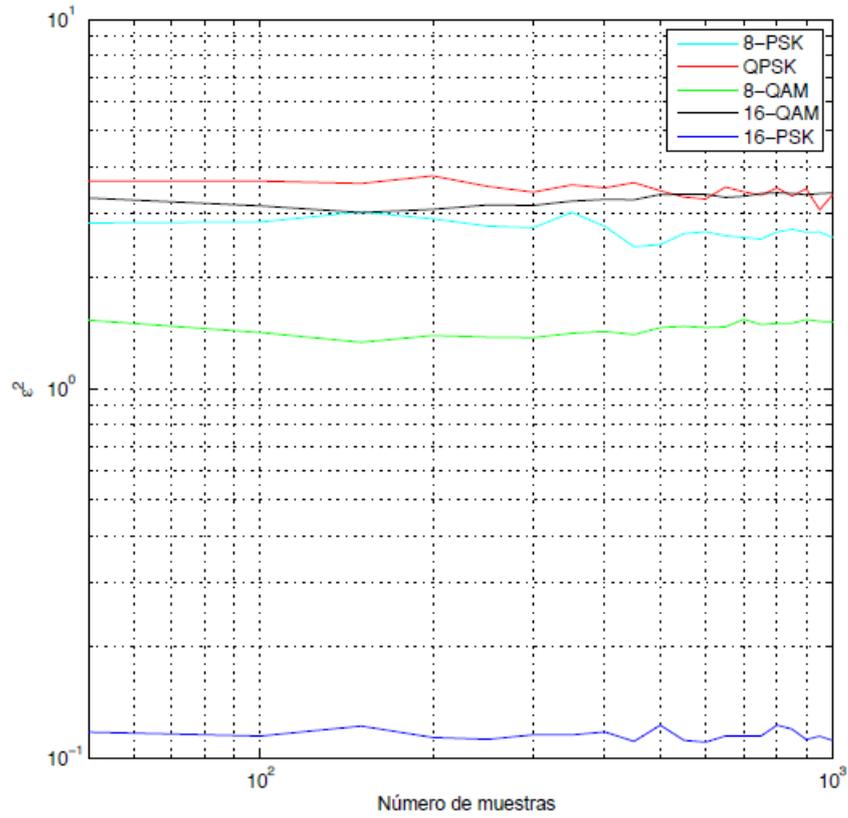


Figura 3. 25: Comparativa del error de desviación acumulada para la modulación 16-PSK apropiada para una SNR de 3 dB.

Elaborado por: Autor.

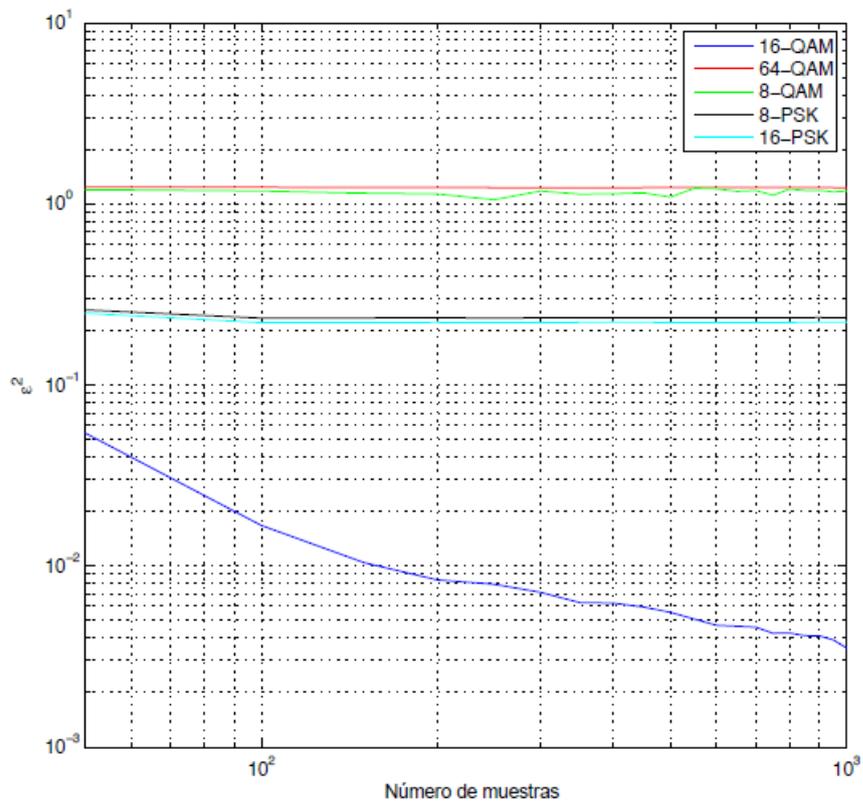


Figura 3. 26: Comparativa del error de desviación acumulada para la modulación 16-QAM apropiada para una SNR de 20 dB.

Elaborado por: Autor.

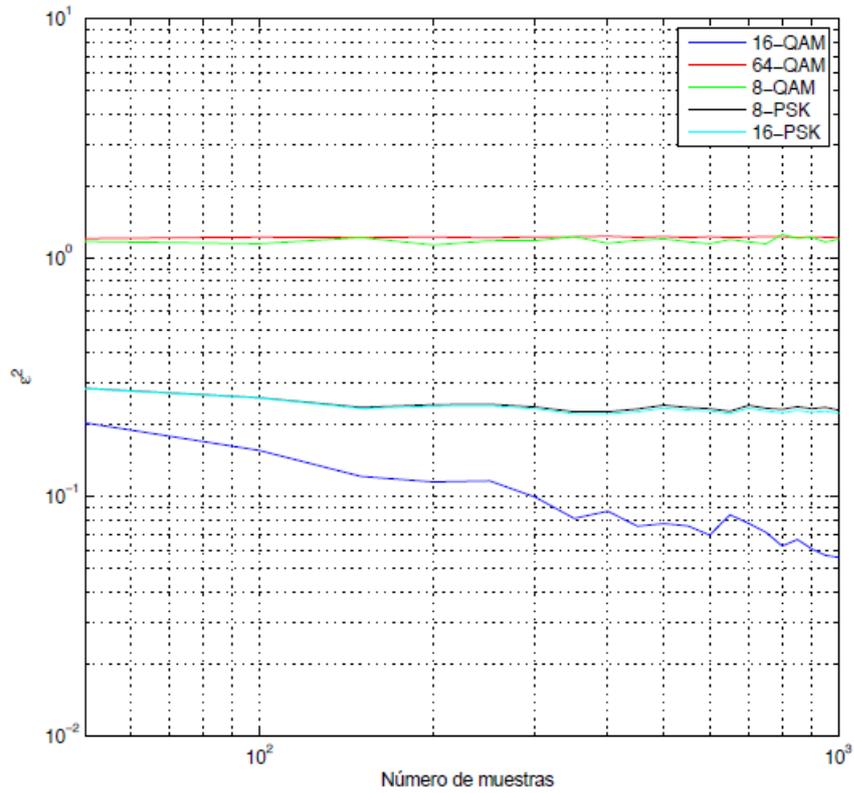


Figura 3. 27: Comparativa del error de desviación acumulada para la modulación 16-QAM apropiada para una SNR de 3 dB.  
Elaborado por: Autor.

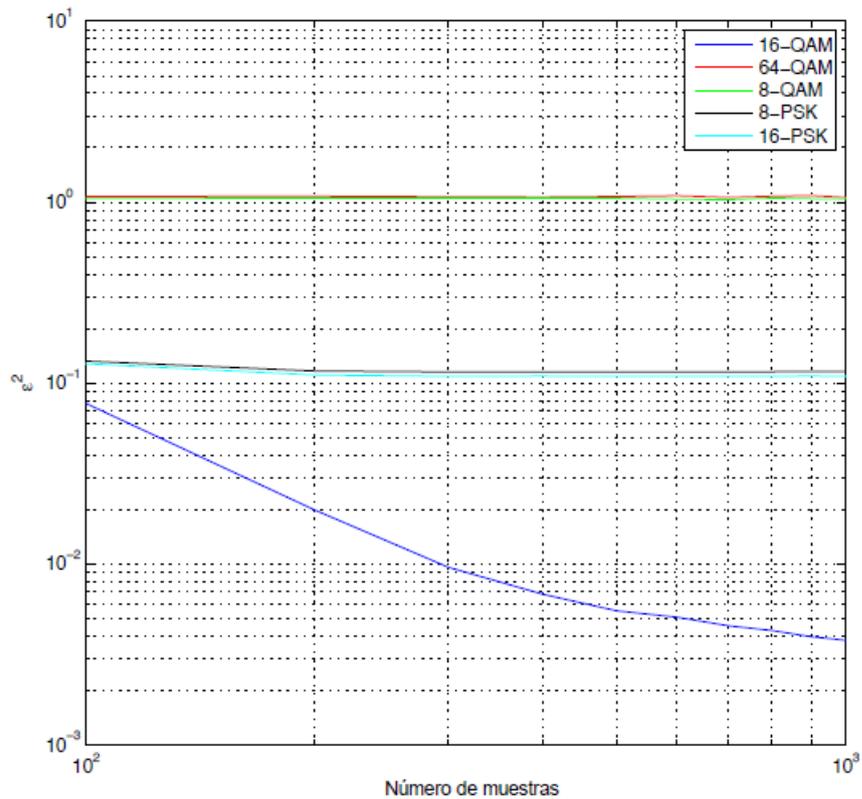


Figura 3. 28: Comparativa del error de desviación acumulada para la modulación 64-QAM apropiada para una SNR de 20 dB.  
Elaborado por: Autor.

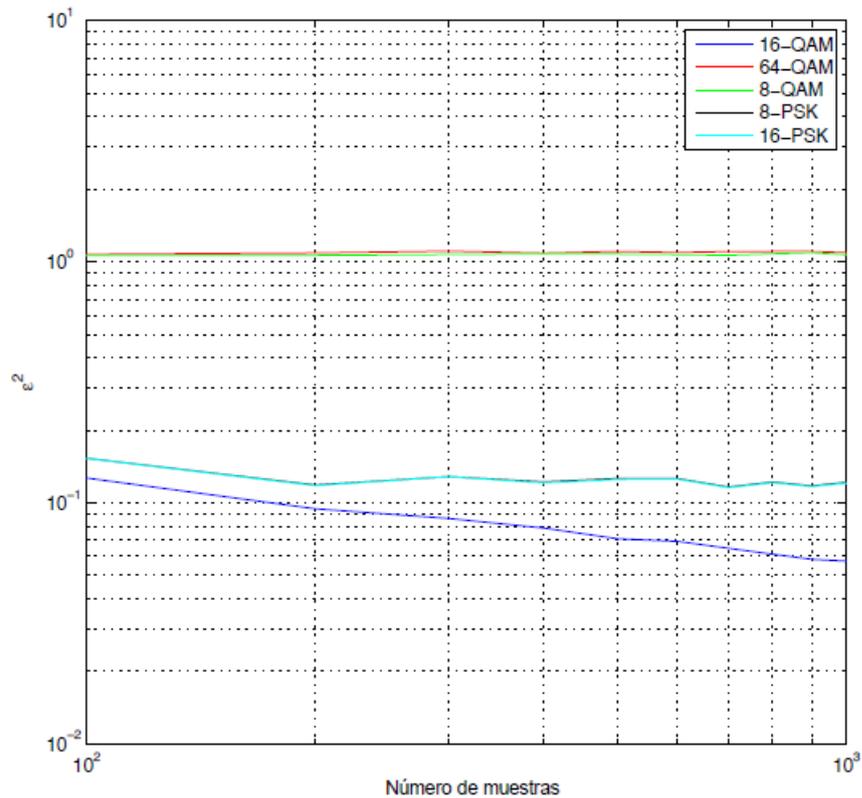


Figura 3. 29: Comparativa del error de desviación acumulada para la modulación 16-QAM apropiada para una SNR de 3 dB.

Elaborado por: Autor.

Las tablas 3.1 a 3.4 muestran algunos de los resultados obtenidos en los casos en que la señal recibida se modula como 16-QAM, 64-QAM, 8-PSK y 16-PSK. Los resultados corresponden a 10.000 muestras de simulación.

Tabla 3. 1: Resultados más eficaces con señal de entrada 16-QAM y canal AWGN.

SNR	4-QAM	8-QAM	16-QAM	64-QAM	8-PSK	16-PSK
10	0	0	100%	0	0	0
8	0	0	100%	0	0	0
6	0	0	99.4%	0	0	0
4	0	0	96%	0	0	0
2	0	0	88%	0	0	0

Elaborado por: Autor.

Hasta aquí, se ha evaluado el rendimiento de este algoritmo de clasificación de la modulación mediante varias simulaciones. Ahora, se puede comparar este método con otros clasificadores. Para ello, los criterios lógicos son la complejidad y la duración de los cálculos (la rapidez con la que pueden

clasificar diferentes modulaciones) y su rendimiento en SNR bajas (la precisión con la que pueden clasificar).

Tabla 3. 2: Resultados más eficaces con señal de entrada 64-QAM y canal AWGN.

<b>SNR</b>	<b>4-QAM</b>	<b>8-QAM</b>	<b>16-QAM</b>	<b>64-QAM</b>	<b>8-PSK</b>	<b>16-PSK</b>
<b>10</b>	0	0	0	100%	0	0
<b>8</b>	0	0	0	100%	0	0
<b>6</b>	0	0	0	100%	3.3%	0
<b>4</b>	0	0	0	100%	4.1%	0
<b>2</b>	0	0	0	60.5%	2.2%	0

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 3: Resultados más eficaces con señal de entrada 8-PSK y canal AWGN.

<b>SNR</b>	<b>4-QAM</b>	<b>8-QAM</b>	<b>16-QAM</b>	<b>64-QAM</b>	<b>8-PSK</b>	<b>16-PSK</b>
<b>10</b>	0	0	0	0	100%	0
<b>8</b>	0	0	0	0	100%	0
<b>6</b>	0	0	0	0	99.9%	0
<b>4</b>	0	0	0	0	87%	0
<b>2</b>	0	0	0	0	6.7%	0

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 4: Resultados más eficaces con señal de entrada 16-PSK y canal AWGN.

<b>SNR</b>	<b>4-QAM</b>	<b>8-QAM</b>	<b>16-QAM</b>	<b>64-QAM</b>	<b>8-PSK</b>	<b>16-PSK</b>
<b>10</b>	0	0	0	0	0	100%
<b>8</b>	0	0	0	0	0	100%
<b>6</b>	0	0	0	0	0	100%
<b>4</b>	0	0	0	0	0	89.5%
<b>2</b>	0	0	0	0	0	43.4%

Elaborado por: Autor.

## CONCLUSIONES

- Se estudiaron las prestaciones del algoritmo de agrupación o Clustering con respecto al número de muestras, el número de bits y el ruido para varios esquemas de modulación digital, tanto PSK y QAM. También se estudió la tasa de error en función del número de muestras en las simulaciones para determinar el número mínimo de muestras para conseguir una tasa de error razonable.
- Para las simulaciones, se han elegido 512 muestras y se ha demostrado que, con una SNR tan baja como 5 dB, el algoritmo puede alcanzar una tasa de error inferior al 1%. También se denota un término como "error relativo" para utilizarlo como parámetro de discriminación entre los esquemas de modulación y se establece un umbral para clasificarlos. Estos resultados mostraron que, para una SNR tan baja como 5 dB, este algoritmo puede ofrecer resultados fiables al discriminar entre 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 8-PSK y 16-PSK. Se demostró que para SNR más bajas, aún puede utilizarse para diferenciar distintas familias de modulaciones o para clasificar un número limitado de modulaciones.

## **RECOMENDACIONES.**

- Modelado de simulación en sistemas OFDM para la detección automática de constelaciones.
- Evaluar los sistemas OFDM para la optimización de las pruebas de gaussianidad en radios definidas por software.

## Bibliografía

- Al-Gharabally, M., & Almutairi, A. F. (2019). Frequency-domain subcarrier diversity receiver for discrete Hartley transform OFDM systems. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019(1), 78. <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1398-0>
- Cai, X., Zhou, M., & Huang, X. (2017). Model-Based Design for Software Defined Radio on an FPGA. *IEEE Access*, 5, 8276–8283. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2692764>
- Chowdhury, M., & Biswas, A. (2017). *Wireless communication: Theory and applications*. Cambridge University Press.
- Daoud, O., Hamarsheh, Q., & Al-Sawalmeh, W. (2013). MIMO-OFDM Systems Performance Enhancement Based Peaks Detection Algorithm. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, 7(3), 4. <https://doi.org/10.3991/ijim.v7i3.2302>
- Haykin, S. S., & Moher, M. (2005). *Modern wireless communications*. Pearson/Prentice Hall.
- Ketterl, T. P., Arrobo, G. E., Sahin, A., Tillman, T. J., Arslan, H., & Gitlin, R. D. (2012). In vivo wireless communication channels. *WAMICON 2012 IEEE Wireless & Microwave Technology Conference*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/WAMICON.2012.6208476>
- Marwanto, A., Sarijari, M. A., Fisal, N., Yusof, S. K. S., & Rashid, R. A. (2009). Experimental study of OFDM implementation utilizing GNU Radio and USRP - SDR. *2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, 132–135. <https://doi.org/10.1109/MICC.2009.5431480>
- Samala, S., & Chandraprakash, T. (2018). Case study on channel estimation techniques for MIMO-OFDM Systems. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 6(2), 115–118.

Teja, R. (2021). Wireless Communication: Introduction, Types and Applications. *Electronics Hub*. <https://www.electronicshub.org/wireless-communication-introduction-types-applications/>

Tsoeunyane, L., Winberg, S., & Inggs, M. (2017). Software-Defined Radio FPGA Cores: Building towards a Domain-Specific Language. *International Journal of Reconfigurable Computing*, 2017, 1–28. <https://doi.org/10.1155/2017/3925961>

Xilinx. (2021). *Spartan-7 SP701 FPGA Evaluation Kit*. Xilinx. <https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/sp701.html>



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, **Cherrez Sánchez, Kevin Edison** con C.C: # 092623444-4 autor del Trabajo de Titulación: **Modelado de simulación de transmisión y recepción del sistema OFDM utilizado en comunicaciones inalámbricas** 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, 5 de Mayo del 2021

*Kevin Cherrez S.*

f. \_\_\_\_\_

Nombre: Cherrez Sánchez, Kevin Edison

C.C: 092623444-4

## REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

### FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Modelado de simulación de transmisión y recepción del sistema OFDM utilizado en comunicaciones inalámbricas		
<b>AUTOR(ES)</b>	Cherrez Sánchez, Kevin Edison		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>PROGRAMA:</b>	Ingeniería en Telecomunicaciones		
<b>TITULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	5 de mayo del 2021	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	52
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Sistemas de Transmisión, Comunicaciones Inalámbricas		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Transmisión, Recepción, Multiplexación, Comunicaciones, Modulaciones, Canal.		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>El presente trabajo corresponde al desarrollo del componente práctico del examen complejo denominado "Modelado de simulación de transmisión y recepción del sistema OFDM utilizado en comunicaciones inalámbricas". La multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) es muy utilizada en las comunicaciones inalámbricas fijas y móviles. OFDM es una tecnología abordada por muchos investigadores que publican obras relevantes y también muy utilizada para fines académicos con propuestas de investigación formativa. En el capítulo 1 se describe las generalidades del componente práctico. En el capítulo 2 se desarrolla la parte teórica, canales de comunicación inalámbrica, tecnología OFDM y de radio definida por software. En el capítulo 3 se desarrolla la parte experimental del sistema de transmisión y recepción utilizando OFDM sobre los esquemas de modulación por desplazamiento de fase y amplitud en cuadratura. Los resultados muestran la tasa de error por debajo del 1% utilizando el canal de ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN).</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-9-83841653	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:kcherrezsanchez@gmail.com">kcherrezsanchez@gmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):</b>	<b>Nombre:</b> Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	<b>Teléfono:</b> +593-9-67608298		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec">edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			