

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE UN SISTEMA MIMO OFDM



**Juan Camilo Lotero Castro
Greisy Melissa Muñoz Prado**

Universidad del Cauca
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán
2013**

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE UN SISTEMA MIMO OFDM



**Juan Camilo Lotero Castro
Greisy Melissa Muñoz Prado**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones**

**Directora:
Ing. Claudia Milena Hernández Bonilla**

Universidad del Cauca
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán
2013**

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS MIMO-OFDM.....	1
1.2	MOTIVACIÓN.....	2
1.3	OBJETIVOS	2
1.3.1	Objetivo General.....	2
1.3.2	Objetivos Específicos	2
1.4	ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO.....	3
2	GENERALIDADES	5
2.1	MODULACIÓN	5
2.1.1	Modulación de Amplitud en Cuadratura	5
2.1.2	Modulación de Amplitud en Cuadratura de 16 Estados.....	5
2.1.3	Modulación de Amplitud de Cuadratura de 64 Estados.....	6
2.2	TECNICA DE TRANSMISIÓN OFDM.....	8
2.2.1	Definición.....	8
2.2.2	Representación Matemática de la Señal OFDM	9
2.2.3	Ortogonalidad entre Portadoras	11
2.3	GENERACIÓN DE LA SEÑAL OFDM.....	13
2.3.1	Esquema del Transmisor OFDM	14
2.3.2	Esquema del Receptor OFDM.....	15
2.4	SISTEMA DE COMUNICACIÓN MIMO.....	16
2.4.1	Multiplexación Espacial	16
2.4.2	Diversidad Espacial	18
2.4.3	Precodificación	19
2.5	ARREGLO DE ANTENAS	20
2.6	CANAL DE COMUNICACIÓN	21
2.6.1	Canal AWGN.....	21
2.6.2	Canal Rayleigh	21

2.6.3	Desplazamiento Doppler	22
2.7	PROCESO DE DETECCIÓN.....	22
2.7.1	Algoritmo de Forzado a Cero	23
2.7.2	Algoritmo de Mínimo Error Cuadrático Medio.....	24
2.8	SISTEMA MIMO-OFDM	24
2.8.1	Transmisor MIMO-OFDM	25
2.8.2	Receptor MIMO-OFDM	26
3	METODOLOGÍA.....	28
3.1	PROCESO DE DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN.....	28
3.2	FASE 1: DEFINICIÓN DEL SISTEMA	29
3.3	FASE 2: ANÁLISIS DEL SISTEMA.....	29
3.3.1	Estado del Sistema.....	29
3.3.2	Actividad.....	29
3.3.3	Entidades	30
3.4	FASE 3: FORMULACIÓN DEL MODELO	30
3.4.1	Diagrama en Bloques de OFDM.....	30
3.4.2	Diagrama en Bloques de un Sistema MIMO-OFDM.....	31
3.4.3	Diagrama de Flujo de un Sistema OFDM.....	32
3.4.4	Diagrama de Flujo de un Sistema MIMO-OFDM.....	33
3.4.5	Diagrama de Flujo de la Multiplexación V-BLAST	34
3.4.6	Diagrama de Flujo del Algoritmo ZF	35
3.4.7	Diagrama de Flujo del Algoritmo MMSE.....	36
3.5	FASE 4: SELECCIÓN DEL LENGUAJE	37
3.6	FASE 5: CODIFICACIÓN DEL MODELO	37
3.6.1	Transmisor MIMO.....	38
3.6.2	Transmisor OFDM.....	38
3.6.3	Canal.....	39
3.6.4	Receptor OFDM	40
3.6.5	Detector.....	40
3.6.6	Receptor MIMO	41
3.6.7	Principal.....	42

3.6.8	Espectro	42
3.7	FASE 6: VALIDACIÓN.....	43
3.7.1	Validación 1	43
3.7.2	Validación 2	45
3.7.3	Validación 3	47
3.8	FASE 7: EXPERIMENTACIÓN.....	51
3.9	FASE 8: IMPLANTACIÓN	51
3.10	FASE 9: MONITOREO Y CONTROL	51
4	EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
4.1	PARAMETROS DE CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACION.....	53
4.2	ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA MIMO-OFDM EN TERMINOS DE LA BER	54
4.2.1	Escenario 1	54
4.2.2	Escenario 2	56
4.2.3	Escenario 3	58
4.2.4	Escenario 4	60
4.3	ANÁLISIS DEL <i>THROUGHPUT</i> DEL SISTEMA MIMO-OFDM	62
4.3.1	Escenario 1	63
4.3.2	Escenario 2	65
4.3.3	Escenario 3	67
4.3.4	Escenario 4	69
4.4	ANÁLISIS DEL ANCHO DE BANDA DEL SISTEMA MIMO- OFDM.....	73
4.4.1	Espectro de la Señal OFDM con igual Periodo de Bit y Diferente Modulación.....	74
4.4.2	Espectro de la Señal OFDM con Diferente Periodo de Bit e igual Modulación.....	76
4.4.3	Espectro de la Señal OFDM cuando se varía el Número de Portadoras y se mantiene constante el Número de Puntos en la IFFT/FFT	78
4.4.4	Espectro de la Señal OFDM cuando se varía el Número de Puntos en la IFFT/FFT y se mantiene constante el Número de Portadoras.....	79

4.5	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DEL SISTEMA MIMO-OFDM	80
4.5.1	Escenario1	81
4.5.2	Escenario 2	83
4.5.3	Escenario 3	85
4.5.4	Escenario 4	87
4.6	COMPARACION DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA MIMO-OFDM CON EL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA OFDM.....	90
4.6.1	Comparación de la BER	90
4.6.2	Comparación del <i>Throughput</i> y la Eficiencia Espectral	92
4.7	TIEMPO DE EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN.....	95
5	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	97
5.1	CONCLUSIONES	97
5.1.1	Respecto a la metodología.....	97
5.1.2	Respecto a los resultados de simulación	97
5.2	TRABAJOS FUTUROS	99
	REFERENCIAS.....	100
	ANEXO A	103
A.1	Algoritmos de Detección Lineal	103
A.1.1	Algoritmo de Detección de Forzado a Cero (ZF).....	103
A.1.2	Algoritmo de Detección de Mínimo Error Cuadrático Medio (MMSE)	105
	REFERENCIAS ANEXO A.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Diagrama de Constelación 16-QAM.....	6
Figura 2.2	Diagrama de Constelación 64 QAM	7
Figura 2.3	Generación Señal OFDM	10
Figura 2.4	Transmisor OFDM.....	14
Figura 2.5	Receptor OFDM	15
Figura 2.6	Sistema MIMO.....	16
Figura 2.7	Multiplexación Espacial	17
Figura 2.8	Transmisor MIMO con Esquema V-BLAST	17
Figura 2.9	Receptor MIMO con Esquema V-BLAST	18
Figura 2.10	Diversidad espacial	18
Figura 2.11	Transmisor MIMO con Codificación Espacio-Temporal	19
Figura 2.12	Recetor MIMO con Decodificación Espacio-Temporal	19
Figura 2.13	Sistema MIMO-OFDM.....	25
Figura 2.14	Transmisor MIMO-OFDM con Esquema de Multiplexación V-BLAST	25
Figura 2.15	Receptor MIMO-OFDM	26
Figura 3.1	Desarrollo del Modelo de Simulación	28
Figura 3.2	Diagrama en Bloques de OFDM	30
Figura 3.3	Diagrama en Bloques del Sistema MIMO-OFDM.....	31
Figura 3.4	Diagrama de Flujo de un Sistema OFDM.....	32
Figura 3.5	Diagrama de Flujo de un Sistema MIMO-OFDM.....	33
Figura 3.6	Diagrama de Flujo del Esquema V-BLAST [25]	34
Figura 3.7	Diagrama de Flujo del Algoritmo ZF [25].....	35
Figura 3.8	Diagrama de Flujo del Algoritmo MMSE [25]	36
Figura 3.9	Diagrama de Clases del Modelo	37
Figura 3.10	Clase Transmisor MIMO	38
Figura 3.11	Clase Transmisor OFDM.....	38
Figura 3.12	Clase Canal.....	39
Figura 3.13	Clase Receptor OFDM	40
Figura 3.14	Clase Detector.....	40
Figura 3.15	Clase Receptor MIMO.....	41
Figura 3.16	Clase Principal	42
Figura 3.17	Clase Espectro	43
Figura 3.18	Esquema del sistema MIMO-OFDM sin Canal.....	44
Figura 3.19	Desempeño del Sistema sin Canal	44

Figura 3.20	Diagrama de Constelación de los Símbolos de la Modulación 16-QAM en Transmisión y Recepción, con Arreglo de Antenas 4x4 y Algoritmo de Detección MMSE	45
Figura 3.21	Esquema del sistema MIMO-OFDM con Canal.....	46
Figura 3.22	Diagrama de Constelación de Símbolos Transmitidos y Recibidos con Canal de Comunicación para una SNR de 25 dB.....	46
Figura 3.23	Diagrama de Constelación de los Símbolos Recibidos con Canal de Comunicación para una SNR de 40 dB	47
Figura 3.24	Sistema MIMO-OFDM empleado para la validación 3	47
Figura 3.25	Desempeño del Sistema Validación 3.....	49
Figura 4.1	Tasa de Error de Bit del sistema MIMO-OFDM con Modulación 16-QAM y Arreglo de Antenas 2x2	55
Figura 4.2	Tasa de Error de Bit del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 64-QAM y Arreglo de Antenas 2x2	56
Figura 4.3	Comparación de la BER entre los escenarios 1 y 2 con Algoritmo de Detección MMSE	57
Figura 4.4	Tasa de Error de Bit del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 16-QAM y Arreglo de Antenas 4x4	58
Figura 4.5	Comparación de la BER entre los sistemas MIMO-OFDM 2x2 y MIMO-OFDM 4x4 cuando emplean la Modulación 16-QAM.....	60
Figura 4.6	Tasa de Error de Bit del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 64-QAM y Arreglo de Antenas 4x4	61
Figura 4.7	Comparación de la BER entre los sistemas MIMO-OFDM 4x4 con 16-QAM y MIMO-OFDM 4x4 CON 64-QAM	61
Figura 4.8	<i>Throughput</i> del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 16-QAM, Arreglo de Antenas 2x2 y Algoritmos de Detección ZF y MMSE	64
Figura 4.9	<i>Throughput</i> del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 64-QAM y Arreglo de Antenas 2x2.....	66
Figura 4.10	Comparación entre el <i>Throughput</i> de los escenarios 1 y 2	66
Figura 4.11	<i>Throughput</i> del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 16-QAM y Arreglo de Antenas 4x4.....	68
Figura 4.12	Comparación entre el <i>Throughput</i> de los escenarios 1 y 3	69
Figura 4.13	<i>Throughput</i> del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 64-QAM y Arreglo de Antenas 4x4.....	70
Figura 4.14	Comparación entre el <i>Throughput</i> de los escenarios 3 y 4	71
Figura 4.15	Tasa de Error de Bloque para los Escenarios 1, 2, 3 y 4	72
Figura 4.16	Espectros de la Señal OFDM para los Escenarios 1 y 3.....	74
Figura 4.17	Espectros de la Señal OFDM para los Escenarios 2 y 4.....	75

Figura 4.18	Espectros de la Señal OFDM con $T_b=7.56 \mu s$ y $T_b=30.24 \mu s$	77
Figura 4.19	Espectros de la Señal OFDM con $N_c < N_f$ y con $N_c = N_f$	78
Figura 4.20	Espectros de la Señal OFDM con $N_f=1024$ y $N_f=2048$	79
Figura 4.21	Eficiencia Espectral del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 16-QAM, Arreglo de Antenas 2x2 y Algoritmos de Detección ZF y MMSE	82
Figura 4.22	Eficiencia Espectral del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 64-QAM, Arreglo de Antenas 2x2y Algoritmo de Detección MMSE.	84
Figura 4.23	Comparación entre la Eficiencia Espectral de los Escenarios 1 y 2.....	85
Figura 4.24	Eficiencia Espectral del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 16-QAM, Arreglo de Antenas 4x4 y Algoritmo de Detección MMSE	86
Figura 4.25	Comparación entre la Eficiencia Espectral de los escenarios 1 y 3.....	87
Figura 4.26	Eficiencia Espectral del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 64-QAM, Arreglo de Antenas 4x4 y Algoritmo de Detección MMSE	88
Figura 4.27	Comparación entre la Eficiencia Espectral de los Escenarios 3 y 4.....	89
Figura 4.28	BER para los Sistemas OFDM y MIMO-OFDM.....	91
Figura 4.29	Comparación entre el <i>Throughput</i> de los Sistemas OFDM, MIMO-OFDM 2x2 y MIMO-OFDM 4x4.....	92
Figura 4.30	Comparación entre la Eficiencia Espectral de los Sistemas OFDM, MIMO-OFDM 2x2 y MIMO-OFDM 4x4	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1	Valores de BER Alcanzados para Diferentes Arreglos de Antenas.....	50
Tabla 3.2	Escenarios de simulación.....	51
Tabla 4.1	Numero de Tramas y Longitud de Trama para los Escenarios de Simulación.....	54
Tabla 4.2	Valores de SNR Requeridos para Determinados Valores de BER.....	56
Tabla 4.3	Valores de BER para los Escenarios 1 y 3.....	59
Tabla 4.4	Valores de SNR Requeridos para Determinados Valores de BER.....	59
Tabla 4.5	Valores de BER para una SNR de 30 dB.....	62
Tabla 4.6	Valores del <i>Throughput</i> obtenidos en la Simulación para Valores de SNR en el Escenario 1.....	64
Tabla 4.7	Valores del <i>Throughput</i> obtenidos en la Simulación para Valores de SNR en el Escenario 3.....	68
Tabla 4.8	Valores Teóricos de la Tasa Máxima de Transmisión de Datos y Valores Prácticos con Algoritmo de Detección MMSE para una SNR de 35 dB.....	71
Tabla 4.9	Valores del Ancho de Banda teóricos y simulados con $T_b=15.12 \mu s$	76
Tabla 4.10	Valores de la Eficiencia Espectral para Valores de SNR en el Escenario 1.....	83
Tabla 4.11	Valores Teóricos y Simulados de la Eficiencia Espectral con Algoritmo de Detección MMSE para una SNR de 35 dB.....	89
Tabla 4.12	Valores de BER para OFDM y MIMO-OFDM.....	92
Tabla 4.13	Tiempo de Ejecución de los Escenarios de Simulación.....	95
Tabla 4.14	Tiempo de Ejecución de la Simulación para Diferente Número de Puntos de la IFFT/FFT.....	95

LISTA DE ACRÓNIMOS

AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i> , Ruido Gaussiano Blanco Aditivo.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
BPSK	<i>Binary Phase-Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria.
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting – Terrestrial</i> , Difusión de Video Digital Terrestre.
ICI	<i>Intercarrier Interference</i> , Interferencia Interportadora.
ISI	<i>Intersymbol Interference</i> , Interferencia Intersimbólica.
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> , Múltiples Entradas Múltiples Salidas.
MMSE	<i>Minimum Mean Square Error</i> , Error Cuadrático Medio Mínimo.
M-PSK	<i>M-ary Phase-Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase M-aria.
M-QAM	<i>M-ary Quadrature Amplitude Modulation</i> , Modulación por Amplitud en Cuadratura M-aria.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
V-BLAST	<i>Vertical Bell Labs Layered Space-Time</i> , Codificación Vertical Espacio Temporal por Capas de Laboratorios Bell.
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> , Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , Red de Área Local Inalámbrica.
ZF	<i>Zero Forcing</i> , Forzado a Cero.



1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS MIMO-OFDM

En los últimos años los sistemas de comunicaciones móviles han buscado mejorar la calidad de los servicios, incrementar la tasa de bit y la cobertura de la red; con el fin de satisfacer la creciente demanda de servicios de banda ancha y las exigencias de los usuarios.

Existen tecnologías que llaman el interés de los desarrolladores de sistemas de comunicación móvil porque permiten alcanzar dicho objetivo, tal es el caso de la tecnología MIMO-OFDM, que utiliza los Sistemas de Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*) y la técnica de transmisión de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) combinando la ventaja que tiene OFDM de mitigar la Interferencia Intersimbólica (ISI, *Inter Symbol Interference*) con las altas tasas de bit que ofrece MIMO cuando implementa el esquema de Multiplexación Espacial (SM, *Spatial Multiplexing*). De esta manera la técnica MIMO-OFDM, permite que dos o más transmisiones OFDM ocurran simultáneamente sobre distintos canales en la misma frecuencia, lo que incrementa la tasa de bit y la eficiencia espectral.

MIMO implementa dos esquemas de funcionamiento: diversidad espacial y multiplexación espacial. El primero envía la misma información de forma simultánea por varias antenas, con el fin de mejorar el desempeño del sistema de comunicación en términos de la Tasa de Error de Bits (BER, *Bit Error Rate*). En el esquema de multiplexación espacial la información se divide en varios flujos que se envían de manera simultánea en la misma frecuencia a través de cada una de las antenas transmisoras, permitiendo incrementar la tasa de bit.

En este documento se realiza un estudio de las características y funcionamiento de los sistemas MIMO y OFDM con el propósito de analizar su desempeño en función de: BER, *throughput*, ancho de banda y eficiencia espectral. En el sistema implementado en simulación se utiliza el esquema de Codificación Vertical



Espacio Temporal por Capas de Laboratorios Bell (V-BLAST, *Vertical Bell Labs Layered Space-Time*), variando el tipo de modulación, algoritmo de detección y arreglo de antenas del sistema.

1.2 MOTIVACIÓN

MIMO-OFDM ofrece una mejora en las comunicaciones inalámbricas, al ser una combinación de dos tecnologías eficientes para aumentar la tasa de bit, siendo una opción para diversos estándares como: IEEE 802.11n, 802.16m y LTE [1].

Mediante la transmisión de flujos simultáneos brindan una solución para problemas como la ISI y el Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia (FSF, *Frequency Selective Fading*). Es decir, MIMO-OFDM posee características necesarias para la implementación de los actuales y futuros sistemas inalámbricos como lo son las Redes de Área Local Inalámbrica (WLAN, *Wireless Local Area Network*) y sistemas celulares de Cuarta Generación (4G, *Fourth Generation*) [2].

En la actualidad se encuentran pocos estudios relacionados con el análisis de desempeño a nivel físico de los sistemas MIMO-OFDM, por esto es necesario el estudio y análisis del mismo, modificando diferentes parámetros del sistema para observar su incidencia en el desempeño, justificando de esta manera el desarrollo del presente trabajo de grado.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Analizar el desempeño a nivel físico de un enlace¹ de comunicación basado en la técnica de transmisión OFDM y sistemas MIMO.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Modelar un enlace de comunicación que emplee la técnica de transmisión OFDM y sistemas MIMO por medio de la aplicación y adaptación de una metodología.
- Evaluar el desempeño a nivel físico de un enlace de comunicación que emplee la técnica de transmisión OFDM y sistemas MIMO.

¹Se considera una simulación a nivel de enlace de un sistema MIMO-OFDM 2x2 y 4x4, trabajando bajo el esquema de multiplexación espacial V-BLAST, modulaciones 16 QAM y 64QAM, algoritmos de detección ZF y MMSE, y modelo de canal AWGN.



1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO

El trabajo de grado está organizado de la siguiente manera:

En el capítulo 2, se explica el funcionamiento de los sistemas OFDM, los aspectos generales de los sistemas de comunicación MIMO (multiplexación, diversidad espacial y precodificación), así mismo se estudia la arquitectura V-BLAST, el canal de comunicación con Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*) y el funcionamiento de los algoritmos de detección Forzado a Cero (ZF, *Zero Forcing*) y Error Cuadrático Medio Mínimo (MMSE, *Minimum Mean Square Error*), por último se describe el proceso en transmisión y recepción de un sistema MIMO-OFDM.

En el capítulo 3, se presenta la metodología de desarrollo escogida para obtener el modelo de la simulación de este trabajo de grado. Se analizan aspectos como la definición del sistema, formulación del modelo, selección de la herramienta de simulación, codificación del modelo y validación del sistema.

En el capítulo 4, se evalúa y analiza el desempeño a nivel físico en los escenarios de simulación del sistema MIMO-OFDM, además se realiza una comparación del desempeño de este sistema frente al de un sistema OFDM.

En el capítulo 5, se establecen las conclusiones del trabajo de grado y las líneas futuras en el estudio de los sistemas MIMO-OFDM.





2 GENERALIDADES

En este capítulo se explica el funcionamiento de la técnica de transmisión OFDM, los sistemas MIMO y el funcionamiento en conjunto de MIMO-OFDM, se considera la técnica de Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) y los algoritmos de detección ZF y MMSE para la recuperación de la señal transmitida por el canal AWGN.

2.1 MODULACIÓN

Es la operación mediante la cual ciertas características de una señal portadora, se modifican en función de una señal moduladora, para que esta última pueda ser transmitida. La modulación mejora la resistencia de la señal frente al ruido e interferencia.

2.1.1 Modulación de Amplitud en Cuadratura

La Modulación de Amplitud en Cuadratura consiste en cambiar la amplitud de dos portadoras de acuerdo a las características de la señal moduladora, las cuales tienen igual frecuencia y están desfasadas 90° entre sí; al final las dos señales moduladas se suman y se transmite la señal resultante. La modulación QAM aumenta la eficiencia espectral al transmitir dos señales en la misma frecuencia en valores altos de Relación de Potencia de Señal a Potencia de Ruido (SNR, *Signal to Noise Relation*) [3].

2.1.2 Modulación de Amplitud en Cuadratura de 16 Estados

La modulación 16-QAM mapea la información en 16 símbolos diferentes, formados por 4 bits cada uno. En la figura 2.1 se presenta su diagrama de constelación.

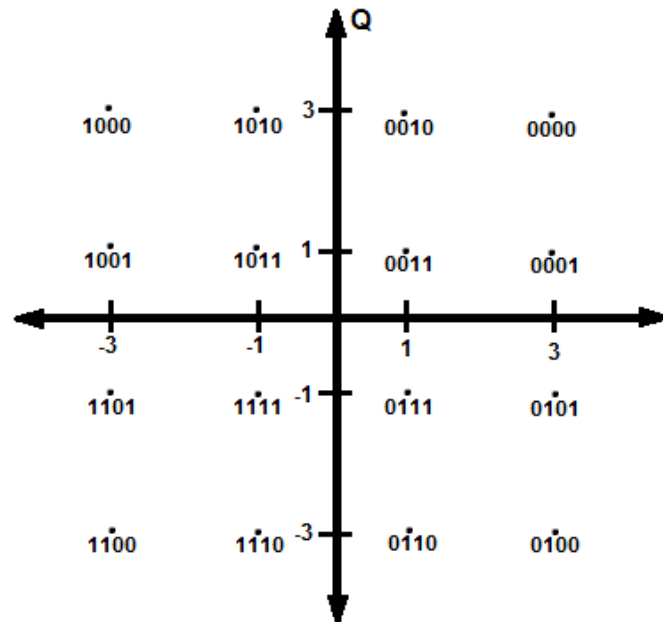


Figura 2.1 Diagrama de Constelación 16-QAM

Los dos primeros bits representan el cuadrante donde se encuentra el símbolo y los dos últimos bits indican su posición en el cuadrante [4]. Los símbolos correspondientes a la modulación 16-QAM se presentan en el conjunto α .

$$\alpha = \{-3 - 3j, -3 - j, -3 + 3j, -3 + j, -1 - 3j, -1 - j, -1 + 3j, -1 + j, 1 - 3j, 1 - j, 1 + 3j, 1 + j, 3 - 3j, 3 - j, 3 + 3j, 3 + j\}$$

2.1.3 Modulación de Amplitud de Cuadratura de 64 Estados

La modulación 64QAM transmite la información en 64 símbolos diferentes y cada uno está formado por 6 bits. En la figura 2.2 se presenta su diagrama de constelación.

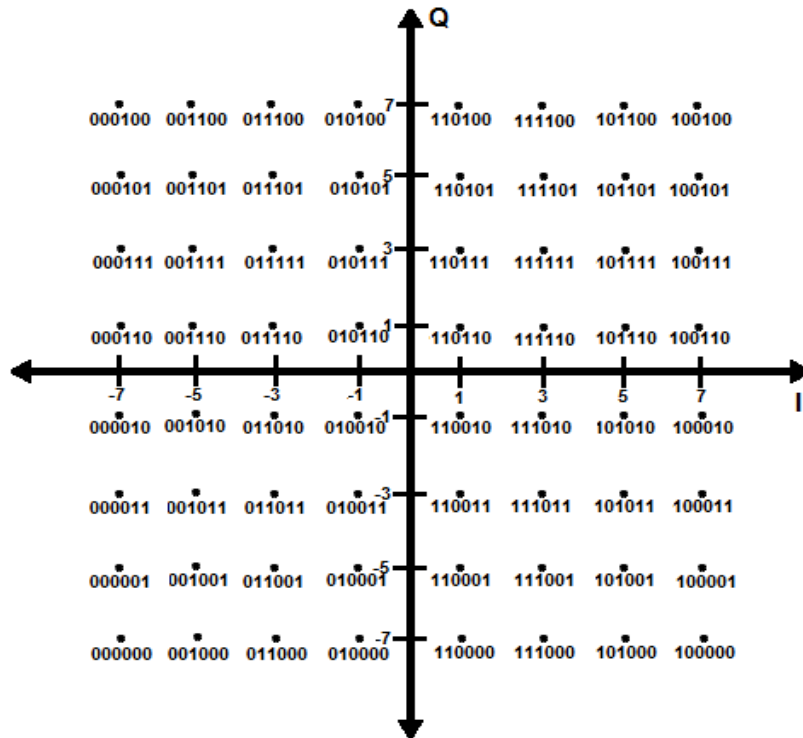


Figura 2.2 Diagrama de Constelación 64 QAM

Los símbolos correspondientes a la modulación 64 QAM se presentan en el conjunto Φ .

$$\Phi = \{-7 - 7j, -7 - 5j, -7 - 3j, -7 - j, -7 + j, -7 + 3j, -7 + 5j, -7 + 7j, -5 - 7j, -5 - 5j, -5 - 3j, -5 - j, -5 + j, -5 + 3j, -5 + 5j, -5 + 7j, -3 - 7j, -3 - 5j, -3 - 3j, -3 - j, -3 + j, -3 + 3j, -3 + 5j, -3 + 7j, -1 - 7j, -1 - 5j, -1 - 3j, -1 - j, -1 + j, 1 + 3j, 1 + 5j, 1 + 7j, 1 - 7j, 1 - 5j, 1 - 3j, 1 - j, 1 + j, 1 + 3j, 1 + 5j, 1 + 7j, 3 - 7j, 3 - 5j, 3 - 3j, 3 - j, 3 + j, 3 + 3j, 3 + 5j, 3 + 7j, 5 - 7j, 5 - 5j, 5 - 3j, 5 - j, 5 + j, 5 + 3j, 5 + 5j, 5 + 7j, 7 - 7j, 7 - 5j, 7 - 3j, 7 - j, 7 + j, 7 + 3j, 7 + 5j, 7 + 7j\}$$

Cada esquema de modulación representa los símbolos mediante un determinado número de bits (η_i) de acuerdo al orden de modulación escogido (M). El número de bits por símbolo está dado por la ecuación 2.1.

$$\eta_i = \log_2 M \quad (2.1)$$

Y el periodo de cada símbolo (T) esta dado en la ecuación 2.2, donde T_b representa el periodo de cada bit.



$$T = \eta * T_b \quad (2.2)$$

Por definición $T_b = \frac{1}{R_b}$, $T = \frac{1}{R_s}$ y $BW = \frac{1}{T}$, donde R_b es la tasa de bit, R_s es la tasa de símbolo y BW es el ancho de banda de la señal, entonces R_b esta dada en la ecuación 2.3.

$$R_b = \eta * R_s = \eta * BW \quad (2.3)$$

Lo que significa que el ancho de banda dado en la ecuación 2.4 es equivalente a la tasa de bits sobre el número de bits, el cual representa la eficiencia espectral de cada esquema de modulación.

$$BW = R_b / \eta \quad (2.4)$$

Cuando se utiliza una constelación de orden superior como 64-QAM, es posible transmitir más bits por símbolo que una modulación de orden bajo como 16-QAM. Sin embargo, si la energía promedio de la constelación sigue siendo la misma, los símbolos deben estar más cercanos y por lo tanto son más susceptibles al ruido, lo cual implica tener una BER más alta. De esta manera es conveniente emplear la modulación 64-QAM en valores altos de SNR.

Los símbolos presentados en los conjuntos α y Φ se normalizan en la simulación de este trabajo de grado, para asegurar una misma distribución de energía entre ellos. La ecuación 2.4 presenta el factor de normalización para la modulación M-QAM [5].

$$F = \sqrt{\frac{3}{2(M-1)}} \quad (2.4)$$

2.2 TECNICA DE TRANSMISIÓN OFDM

2.2.1 Definición

OFDM es una técnica de transmisión que divide el ancho de banda disponible en varios subcanales de banda estrecha a frecuencias equidistantes, cada subcanal se modula individualmente utilizando QAM), y se transmiten simultáneamente en forma superpuesta y paralela, con el objetivo de incrementar el periodo del símbolo a transmitir en el dominio del tiempo, de tal forma que sea mayor a la dispersión del canal [5]. En este trabajo de grado no se considera esta condición



porque no se implementa un canal Rayleigh, se emplea un canal AWGN, estos canales se describen en los apartados 2.6.1 y 2.6.2.

Por lo tanto, una señal OFDM consiste en N subportadoras adyacentes y ortogonales que se encuentran espaciadas una distancia Δf en el dominio de la frecuencia. Todas las portadoras son ortogonales entre sí, siempre y cuando Δf y el periodo del símbolo a transmitir T se escojan de tal manera que cumplan con la ecuación 2.5. La demostración de esta ecuación se presenta en el apartado 2.2.3.

$$\Delta f = 1/T \quad (2.5)$$

Esta técnica de transmisión aumenta la velocidad de transmisión de datos ó disminuye la tasa de error de bits en el receptor, en comparación con esquemas de modulación de portadora única, además, utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*) para el cálculo eficiente de la Transformada Discreta (DFT, *Discret Fourier Transform*), la cual se utiliza para el procesamiento digital de la señal [5].

OFDM además de ser una técnica de transmisión también es un caso especial de modulación multiportadora. Por lo tanto puede ser reconocido ya sea como una técnica de transmisión o un esquema de modulación [6].

2.2.2 Representación Matemática de la Señal OFDM

La salida del transmisor OFDM se define como la suma de múltiples portadoras que son multiplicadas por los símbolos modulados $X_i = [X_0, X_1, \dots, X_{i-1}]$ como se muestra en la figura 2.3.

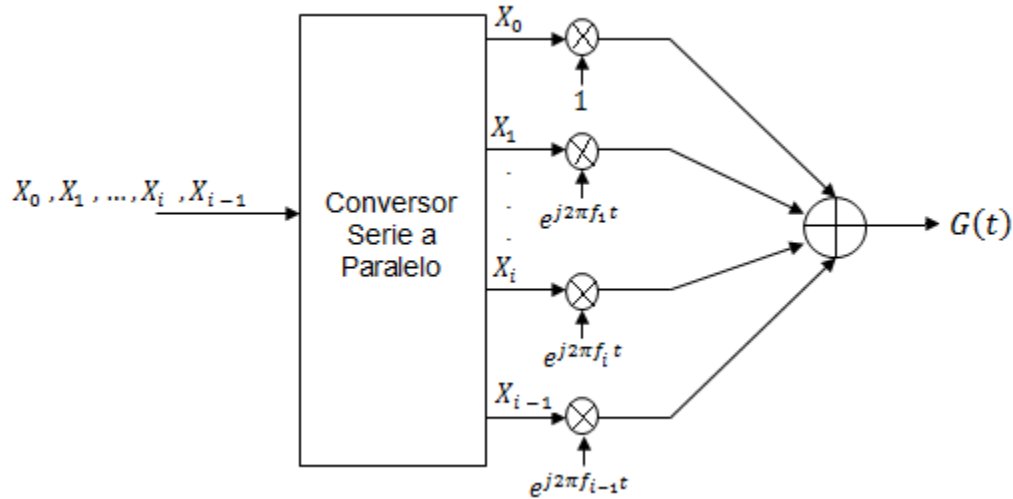


Figura 2.3 Generación Señal OFDM

Los símbolos modulados K a transmitir son: X_i , $i = 0, 1, \dots, K - 1$, donde X_i es el número complejo dado por la constelación de QAM y la i -ésima frecuencia portadora para X_i es f_i , entonces la señal OFDM $G(t)$ está dada por la ecuación 2.6.

$$G(t) = \sum_{i=0}^{K-1} X_i e^{j2\pi f_i t} \text{rect}_T(t) \quad (2.6)$$

Donde $\text{rect}_T(t)$ representa un pulso rectangular de duración t .

Si se muestrea la señal $G(t)$, N veces en el tiempo del símbolo T , con una frecuencia f_s que es un múltiplo del espaciamento entre portadoras Δf , entonces el intervalo de cada muestra t_s se describe en la ecuación 2.7.

$$t_s = T/N = 1/(\Delta f * N) \quad (2.7)$$

Y la señal OFDM muestreada es dada por la ecuación 2.8 donde n es el número de muestra.

$$G(nt_s) = \sum_{i=0}^{K-1} X_i e^{j2\pi f_i n t_s} \text{rect}_T(nt_s) \quad (2.8)$$

Como las frecuencias portadoras están uniformemente espaciadas en el dominio de la frecuencia por un espaciamento Δf , entonces $f_i = i\Delta f$, $i = 0, 1, \dots, K - 1$, por lo tanto la ecuación 2.8 cambia por la expresión dada en la ecuación 2.9.

$$G(nt_s) = \sum_{i=0}^{K-1} X_i e^{j2\pi i \Delta f n t_s} \text{rect}_T(nt_s) \quad (2.9)$$



Ahora bien, despejando Δf de 2.7 y reemplazando en la ecuación 2.9, la señal OFDM queda descrita por la ecuación 2.10 [5].

$$G(n) = G(nt_s) = \sum_{i=0}^{K-1} X_i e^{\frac{j2\pi i n}{N}} \quad (2.10)$$

Si se toma una secuencia $g(i) = X_i$ para $0 \leq i \leq K$ y $g(i) = 0$ para $K < i \leq N$, entonces la ecuación 2.10 cambia a la forma descrita en la ecuación 2.11.

$$G(n) = \sum_{i=0}^{N-1} g(i) e^{\frac{j2\pi i n}{N}}; \quad n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (2.11)$$

Si se compara la ecuación 2.12, la cual describe la forma general de la Transformada Inversa de Fourier en Tiempo Discreto (IDFT, *Inverse Discrete Fourier Transform*), con la ecuación 2.11, se observa que esta última es equivalente a la IDFT sin el factor multiplicativo.

$$Y(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y(i) e^{\frac{j2\pi i n}{N}}; \quad n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (2.12)$$

Por lo tanto, las muestras en el tiempo del símbolo OFDM $G(n)$ corresponden con la IDFT de la secuencia $g(k)$. De esta manera en la Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*) cada símbolo X_k es multiplicado por una subportadora, es por esto que la IFFT se utiliza para la generación de la señal OFDM.

2.2.3 Ortogonalidad entre Portadoras

La técnica de transmisión OFDM permite organizar un conjunto de subportadoras de tal modo que no exista interferencia entre ellas. Para esto las subportadoras adyacentes deben ser ortogonales.

Matemáticamente es posible tener un conjunto de señales Ψ , donde Ψ_p indica la p -ésima señal y Ψ_q la q -ésima señal del conjunto, las señales Ψ_p y Ψ_q son ortogonales si cumplen con la propiedad de correlación dada en las ecuaciones 2.13.a y 2.13.b durante el periodo del símbolo modulado T [6].

$$R_{\Psi_p, \Psi_q(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T \Psi_p(t) \cdot \Psi_q^*(t) dt = \begin{cases} 1, & \text{si } p = q \\ 0, & \text{si } p \neq q \end{cases} \quad (2.13.a)$$

$$R_{\Psi_p, \Psi_q(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T e^{j2\pi(p-q)\Delta f t} dt \quad (2.13.b)$$



Donde * denota la señal compleja conjugada de Ψ_q , $f_p = p\Delta f$ y $f_q = q\Delta f$, reemplazando en la ecuación 2.13.b se obtiene la ecuación 2.14.

$$R_{\Psi_p, \Psi_q}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T e^{j2\pi(f_p - f_q)t} dt \quad (2.14)$$

Si $f_p = f_q$, la solución de la integral dada en la ecuación 2.14 se presenta en la ecuación 2.15, por lo tanto las señales son iguales.

$$\frac{1}{T} \int_0^T 1 dt = 1 \quad (2.15)$$

Si $f_p \neq f_q$, la solución de la integral en la ecuación 2.14 está dada en 2.16.

$$\frac{1}{T} \left[\frac{e^{j2\pi(f_p - f_q)t}}{j2\pi(f_p - f_q)} \right]_0^T = 0 \quad (2.16)$$

Para que la igualdad se cumpla, $e^{j2\pi(f_p - f_q)T} = 1$. Este factor también se representa en términos de las funciones trigonométricas seno y coseno como se muestra en la ecuación 2.17.

$$e^{j2\pi(f_p - f_q)T} = \cos(2\pi(f_p - f_q)T) + j \sin(2\pi(f_p - f_q)T) \quad (2.17)$$

Donde $\sin(2\pi(f_p - f_q)T) = 0$, siempre que $(2\pi(f_p - f_q)T) = 2\pi n$, por lo tanto $e^{j2\pi(f_p - f_q)T} = \cos(2\pi(f_p - f_q)T) = 1$. Estas igualdades se cumplen si el argumento de la función coseno es $2\pi n$, tal como se muestra en la ecuación 2.18.

$$2\pi(f_p - f_q)T = 2\pi n \quad (2.18)$$

Despejando la ecuación 2.18, la separación entre subportadoras se representa mediante la ecuación 2.19.

$$(f_p - f_q) = n/T \quad (2.19)$$

Por lo tanto la diferencia entre subportadoras adyacentes $f_s = f_p - f_q$ debe ser igual al inverso del periodo del símbolo modulado T para cumplir la condición de ortogonalidad. Esta relación está dada en la ecuación 2.20.

$$\Delta f = 1/T \quad (2.20)$$

Así el conjunto de subportadoras ortogonales entre sí, se representan mediante la notación compleja en banda base dada en la ecuación 2.21.



$$C(t) = e^{j2\pi i \Delta f t} \text{rect}_t(t) \quad (2.21)$$

donde $f_i = i\Delta f$ denota la frecuencia central de la subportadora i -ésima.

2.3 GENERACIÓN DE LA SEÑAL OFDM

La señal de entrada de un sistema OFDM es una trama serie de datos (codificados o sin codificar). Esta señal se divide en varios flujos en paralelo, cada flujo se modula de acuerdo al esquema de modulación seleccionado (M-QAM). A la salida del modulador se obtienen símbolos complejos y a cada uno de ellos se les asigna una portadora por medio de la IFFT que se encarga de generar múltiples portadoras ortogonales. El ancho de banda total de la señal OFDM está dado por la ecuación 2.22 [7].

$$BW = N_c * \Delta f \quad (2.22)$$

Donde N_c representa el número de portadoras y Δf la separación que hay entre ellas. Luego se adiciona el prefijo cíclico para mitigar la ISI y la Interferencia Interportadora (ICI, *Inter Carrier Interference*), generando la señal OFDM, esta pasa por un conversor digital-analógico (DAC, *Digital-to-Analog Converter*) el cual entrega una señal analógica en banda base que se modula en fase y cuadratura por medio de un modulador I/Q, estas dos componentes se combinan y la señal resultante se modula en radiofrecuencia para ser transmitida por el canal [7].

En este trabajo de grado no se considera necesario la inserción del prefijo cíclico debido a que no se implementa un canal con multitrayectoria que genere ISI o ICI. Sin embargo a continuación se explica el proceso completo que realiza el transmisor OFDM para enviar la señal de información y el receptor OFDM para recuperar la señal transmitida.

2.3.1 Esquema del Transmisor OFDM

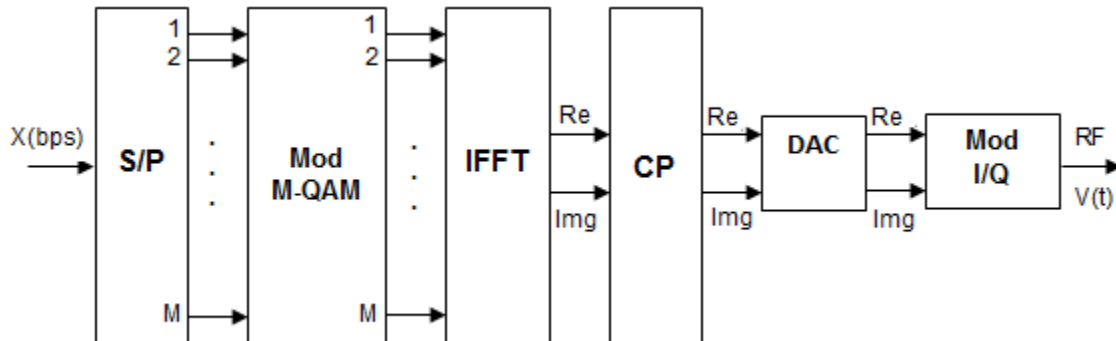


Figura 2.4 Transmisor OFDM

En la figura 2.4 se presenta el esquema del transmisor OFDM. La señal a ser transmitida de alta velocidad pasa a través de un conversor serie-paralelo, que genera M flujos de datos paralelos y de menor velocidad para incrementar el periodo de los símbolos obtenidos a la salida del modulador.

Los flujos paralelos ingresan al bloque correspondiente a la modulación (mapeador M-ario), para este trabajo de grado se utiliza las modulaciones 16-QAM y 64-QAM. Como resultado se obtienen símbolos que tienen componentes en fase y cuadratura representados por números complejos.

Los símbolos obtenidos después de la modulación ingresan al bloque de la IFFT, donde se le asigna una subportadora a cada uno, es decir cada subportadora se modula por un símbolo 16-QAM o 64-QAM, conformando el símbolo OFDM² $G_i(t)$. Como resultado se obtienen muestras complejas del símbolo OFDM en el dominio del tiempo.

Luego, se inserta al comienzo de cada símbolo el prefijo cíclico, el cual está constituido por las últimas $l_p(t)$ muestras de $G_i(t)$, de esta manera el símbolo OFDM es periódico [8]. El símbolo OFDM con prefijo cíclico se representa en la ecuación 2.23.

$$V(t) = G_i(t) + l_p(t) \quad (2.23)$$

² Se considera $G_i(t)$ como cada símbolo OFDM que conforma la señal $G(t)$.



Dónde:

$G_k(t)$: símbolo OFDM.

$l_p(t)$: longitud del prefijo añadido a cada símbolo.

$V(t)$: símbolo OFDM con prefijo cíclico.

A continuación los símbolos $V(t)$ pasan a través de un conversor paralelo-serie, el cual entrega la señal OFDM; esta última se procesa mediante un DAC y un modulador I/Q.

2.3.2 Esquema del Receptor OFDM

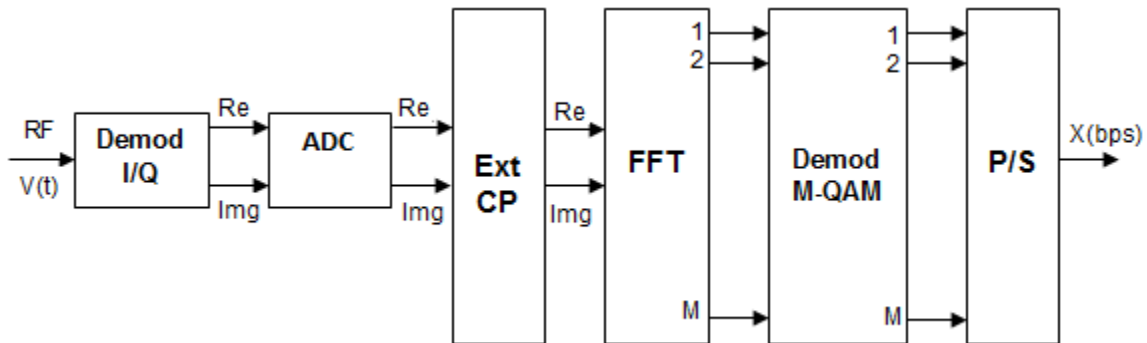


Figura 2.5 Receptor OFDM

La figura 2.5 representa el receptor OFDM. La señal recibida a través del canal de transmisión pasa por un demodulador I/Q que demodula la señal en fase y cuadratura para luego ser procesada por el Conversor Analógico Digital (ADC, *Analog-to-Digital Converter*), el cual entrega una versión digital de la señal.

Posteriormente, la señal constituida por varios símbolos $V(t)$, ingresa al bloque de extracción del prefijo cíclico para remover las muestras correspondientes a $l_p(t)$, después se aplica la FFT que se encarga de realizar la demodulación de las subportadoras que transportan los símbolos QAM, obteniéndose N muestras en frecuencia de la señal OFDM, siendo las K primeras los símbolos QAM transmitidos, como se muestra en la ecuación 2.24 [9].

$$g(i) = \sum_{n=0}^{N-1} G(n)e^{-j2\pi in/N}; \quad i = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (2.24)$$

Cada símbolo QAM se demodula para recuperar la información. Los flujos de

información pasan a través del conversor paralelo-serie el cual entrega la señal recibida.

2.4 SISTEMA DE COMUNICACIÓN MIMO

Es un sistema basado en el uso de múltiples antenas en transmisión y recepción que trabajan de forma conjunta para explotar la capacidad del canal o mejorar el desempeño del sistema. MIMO crea múltiples enlaces de comunicación entre las diferentes antenas transmisoras y receptoras, los símbolos transmitidos X_{NT} pueden diferenciarse con técnicas de codificación y algoritmos de detección en el lado del receptor [10] siendo Y_{NR} los símbolos recibidos. El esquema del sistema MIMO se presenta en la figura 2.6.

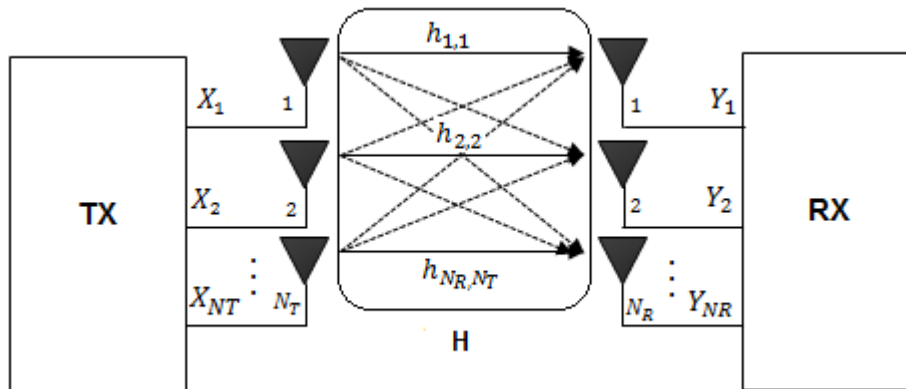


Figura 2.6 Sistema MIMO

Su funcionamiento se basa en tres tipos de técnicas principales: multiplexación espacial, diversidad espacial y precodificación, los cuales se describen a continuación.

2.4.1 Multiplexación Espacial

En esta técnica la señal a transmitir se divide en varios flujos de datos paralelos a través de un demultiplexor, los flujos se envían en la misma frecuencia por medio de las antenas transmisoras, explotando de esta manera la dimensión espacial del canal radio, sin embargo requiere el uso de técnicas de decodificación en el receptor para recuperar dichos flujos de datos [11]. El uso de esta técnica permite un aumento en la tasa de bit y se puede emplear con o sin conocimiento del estado del canal. La figura 2.7 presenta el esquema de multiplexación espacial,

donde (a b c d e f) representa los bits a transmitir, $(X_1, X_2 \dots, X_{NT})$ los símbolos modulados transmitidos y $(Y_1, Y_2 \dots, Y_{NR})$ los símbolos modulados recibidos.

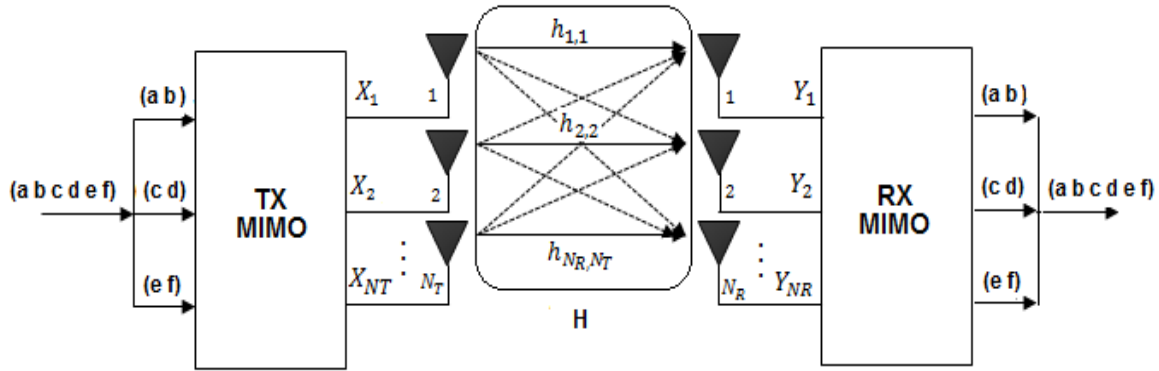


Figura 2.7 Multiplexación Espacial

El proceso de dividir el flujo de datos se puede realizar de tres formas diferentes de acuerdo a la posición del demultiplexor en el lado del transmisor: Codificación Horizontal (H-BLAST, *Horizontal Bell Labs Layered Space-Time*), Vertical (V-BLAST, *Vertical Bell Labs Layered Space-Time*), y Diagonal (D-BLAST, *Diagonal Bell Labs Layered Space-Time*) [12]. En este trabajo de grado se escoge la codificación vertical V-BLAST que consiste en codificar, entrelazar y mapear en sus correspondientes símbolos el flujo de datos inicial (a b c d e f), luego el flujo de símbolos resultante se demultiplexa en función de las N_T antenas transmisoras, como resultado se obtienen N_T flujos de símbolos que se representan como $(X_1, X_2 \dots, X_{NT})$. En las figuras 2.8 y 2.9 se muestran los diagramas generales del transmisor y receptor MIMO cuando implementan el esquema de codificación V-BLAST respectivamente [12].

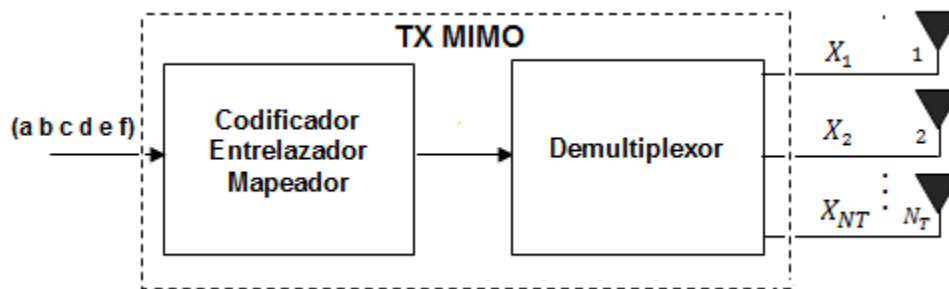


Figura 2.8 Transmisor MIMO con Esquema V-BLAST

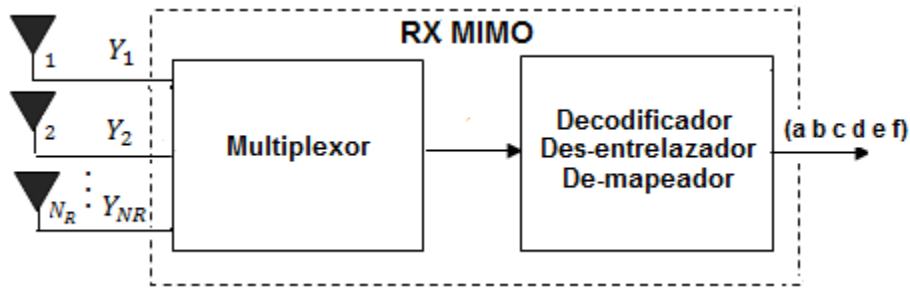


Figura 2.9 Receptor MIMO con Esquema V-BLAST

2.4.2 Diversidad Espacial

A diferencia de la multiplexación espacial, en esta técnica se transmite el mismo flujo de datos $(a b c)$ por todas las antenas de transmisión, la diversidad espacial combate el desvanecimiento que sufre la señal cuando se transmite por el canal radio, mejorando la calidad de la información en términos de la BER. No es necesario que el transmisor tenga conocimiento previo de las propiedades del canal para aplicar esta técnica [11]. El esquema general del sistema MIMO cuando utiliza diversidad espacial se muestra en la figura 2.10, donde $(a b c)$ representa el flujo de datos a transmitir, $(X_1, X_2, \dots, X_{N_T})$ y $(Y_1, Y_2, \dots, Y_{N_R})$ representan los símbolos transmitidos y recibidos respectivamente.

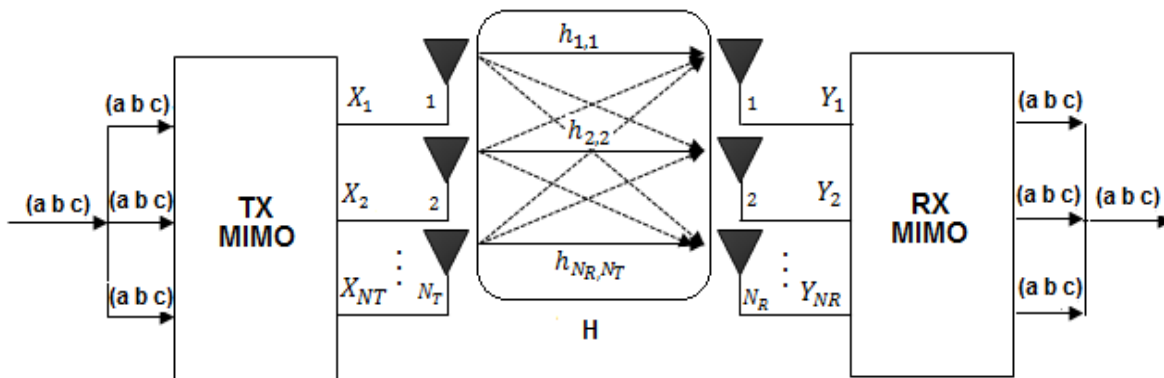


Figura 2.10 Diversidad espacial

En las figuras 2.11 y 2.12 se presentan los diagramas del transmisor y receptor MIMO respectivamente, cuando implementan la técnica de diversidad espacial, en la cual se utiliza la Codificación Espacio Temporal (STC, *Space-Time Coding*) que se encarga de realizar las conversiones serie-paralelo y paralelo-serie de los

símbolos transmitidos y recibidos respectivamente. En el transmisor MIMO el flujo de datos a transmitir se codifica, entrelaza y mapea, luego se realiza la codificación STC y los símbolos resultantes se transmiten por el canal.

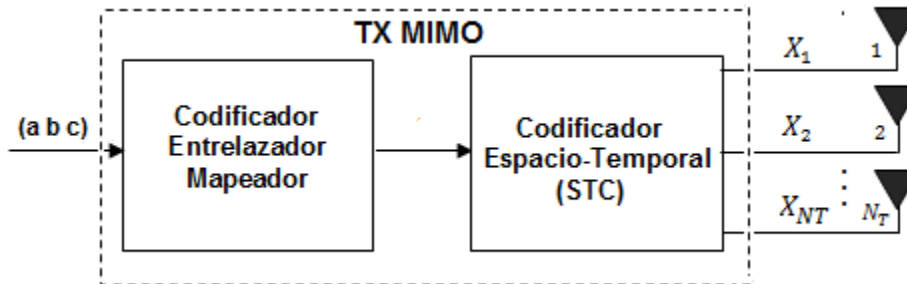


Figura 2.11 Transmisor MIMO con Codificación Espacio-Temporal

A los símbolos recibidos en el receptor MIMO se les aplica la decodificación STC, luego se decodifican, des-entrelazan y de-mapean para recuperar el flujo de datos transmitido.

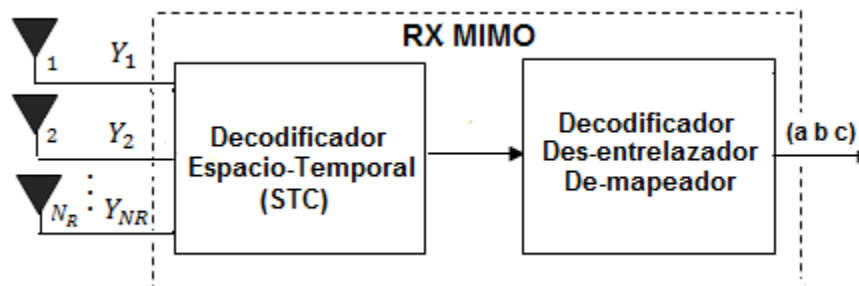


Figura 2.12 Recetor MIMO con Decodificación Espacio-Temporal

2.4.3 Precodificación

Es considerada una técnica de procesamiento de señales que se lleva a cabo en el transmisor a partir de la información de estado de canal, con el fin de mitigar la interferencia entre antenas, mejorando el desempeño del sistema y simplificando el proceso de detección en el receptor [13].

El proceso de precodificación puede ser representado mediante la multiplicación de una matriz de precodificación W y el vector de datos conformado por los símbolos modulados X_k , por lo tanto el vector de símbolos pre-codificados a transmitir X tiene la forma dada en la ecuación 2.25 [14].



$$X = W * X_k \quad (2.25)$$

Teniendo en cuenta que generalmente esta técnica se utiliza en sistemas donde existen múltiples usuarios para combatir la Interferencia Multiusuario (MUI, *Multi-User Interference*), no se elige porque el análisis de este trabajo de grado se enfoca en el desempeño de un sistema MIMO-OFDM, para lo cual se utiliza un único receptor.

2.5 ARREGLO DE ANTENAS

Los diferentes trayectos entre antenas conforman lo que se conoce como matriz de canal. Matemáticamente la señal recibida en un sistema MIMO se puede expresar de la forma descrita en la ecuación 2.26 [15].

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Donde $y(t)$ y $x(t)$ representan las señales recibida y transmitida respectivamente en el dominio del tiempo, H es la matriz de canal de dimensiones $M \times N$, siendo M el número de antenas transmisoras, N el número de antenas receptoras y $n(t)$ es la señal de ruido que se adiciona a la señal transmitida.

Se conoce como arreglo de antenas al conjunto de antenas empleadas en el transmisor y receptor y varía dependiendo de los requerimientos del sistema. En un sistema MIMO 2x2 se tienen dos antenas en transmisión y dos antenas en recepción, las señales recibidas en cada antena y_1 y y_2 se describen en las ecuaciones 2.27.a y 2.27.b [16].

$$y_1 = h_{1,1}x_1 + h_{1,2}x_2 + n_1 \quad (2.27.a)$$

$$y_2 = h_{2,1}x_1 + h_{2,2}x_2 + n_2 \quad (2.27.b)$$

Además de la configuración 2x2, en este trabajo de grado se consideran los sistemas MIMO 4x4, cuyas señales recibidas y_1, y_2, y_3, y_4 están dadas por las ecuaciones 2.28.a, 2.28.b, 2.28.c, 2.28.d respectivamente.

$$y_1 = h_{1,1}x_1 + h_{1,2}x_2 + h_{1,3}x_3 + h_{1,4}x_4 + n_1 \quad (2.28.a)$$

$$y_2 = h_{2,1}x_1 + h_{2,2}x_2 + h_{2,3}x_3 + h_{2,4}x_4 + n_2 \quad (2.28.b)$$

$$y_3 = h_{3,1}x_1 + h_{3,2}x_2 + h_{3,3}x_3 + h_{3,4}x_4 + n_3 \quad (2.28.c)$$

$$y_4 = h_{4,1}x_1 + h_{4,2}x_2 + h_{4,3}x_3 + h_{4,4}x_4 + n_4 \quad (2.28.d)$$



2.6 CANAL DE COMUNICACIÓN

Un canal de comunicación es el medio por el cual se envía información desde el transmisor hacia el receptor. Dentro de los modelos de canales inalámbricos de comunicación se encuentran los canales de Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*) y Rayleigh, los cuales se describen a continuación.

2.6.1 Canal AWGN

Es un tipo de canal que agrega ruido blanco Gaussiano a la señal transmitida, de tal forma que la magnitud de la respuesta en frecuencia del canal es plana, es decir, todas las componentes en frecuencia de la señal se afectan de forma igual por el canal.

La salida de un canal AWGN se representa en la ecuación 2.29:

$$y(t) = x(t) + n(t) \quad (2.29)$$

Donde $x(t)$ es la señal transmitida que entra al canal y $n(t)$ es un proceso aleatorio que representa el ruido que se adiciona a la señal, con una densidad espectral de potencia constante en todas las frecuencias de valor $N_0/2$, es decir, equivalente a la mitad de la densidad espectral de potencia de ruido N_0 , con media cero e independiente de la señal de entrada. La señal $x(t)$ se asume limitada en frecuencia, con ancho de banda B y con potencia finita [17].

Aunque este tipo de canal es ideal, se selecciona en este trabajo de grado para llevar a cabo el análisis del desempeño del sistema MIMO-OFDM, porque es un canal estándar en los sistemas de comunicaciones inalámbricos para evaluar la degradación de la señal transmitida.

2.6.2 Canal Rayleigh

Es un modelo de canal relacionado con escenarios donde la propagación de la señal a transmitir se realiza por diversos caminos, los cuales reciben el nombre de multitrayectorias. Estas son generadas por reflexiones y/o difracciones de las señales transmitidas sobre superficies ubicadas entre el transmisor y el receptor. El canal Rayleigh genera un desvanecimiento multitrayectoria, este ocasiona en la señal atenuaciones y retardos variantes con el tiempo, lo cual implica una degradación significativa en el desempeño del sistema de comunicación [17].



Normalmente este tipo de canal es usado en ambientes móviles, donde los canales se caracterizan por las múltiples versiones de la misma señal en el receptor (réplicas), con retardos y amplitudes diferentes, lo que produce dos tipos de interferencia: constructiva, que ocurre cuando la señal directa y algunas réplicas llegan en fase al receptor, ocasionando un incremento en el nivel de potencia de la señal recibida; y destructiva que sucede cuando la señal directa y algunas réplicas llegan en contrafase al receptor, lo que conlleva a un decremento en el nivel de la potencia de la señal recibida. En la ecuación 2.30 se presenta la señal de salida de un canal Rayleigh [18].

$$y(t) = \hat{H} \cdot x(t) + n(t) \quad (2.30)$$

Donde $n(t)$ representa la señal de ruido AWGN, $y(t)$ es la señal recibida que depende del producto de la señal transmitida $x(t)$ por la matriz de transferencia del canal Rayleigh \hat{H} .

2.6.3 Desplazamiento Doppler

El desplazamiento *Doppler* consiste en un cambio en las frecuencias de las señales recibidas respecto a las transmitidas cuando existe un movimiento relativo entre el transmisor y el receptor, esto genera un desplazamiento de la frecuencia portadora percibida por el receptor. El ensanchamiento *Doppler* se produce debido a que el movimiento relativo entre el transmisor y el receptor para cada una de las trayectorias puede ser distinto ya que las señales que se transmiten por los diferentes trayectos no sufren un desplazamiento *Doppler* igual. Cuando se suman en el receptor todas las señales reflejadas con la señal directa, se percibe un ensanchamiento del ancho de banda de la señal recibida dado en la ecuación 2.31.

$$B_D = 2f_c * (v/c) \quad (2.31)$$

Donde f_c es la frecuencia portadora, v es la velocidad del receptor y c es la velocidad de la luz.

2.7 PROCESO DE DETECCIÓN

Los sistemas MIMO que implementan la técnica de multiplexación espacial pueden transmitir datos a una mayor velocidad que los sistemas que usan



diversidad espacial, sin embargo es necesario utilizar algoritmos de detección que permitan recuperar en gran medida la información enviada [14], aumentando la complejidad en el receptor.

El método de detección lineal de la señal trata todas las señales transmitidas como interferencia, excepto el flujo de datos que se quiere detectar de la antena deseada [14].

El proceso de detección en el receptor se basa en la estimación de la señal enviada $x(t)$ de acuerdo a la señal recibida $y(t)$ junto con una matriz W que varía de acuerdo al tipo de algoritmo de detección lineal que se emplee y que permite mitigar la interferencia, la relación de estos parámetros se describe mediante la ecuación 2.32 [19].

$$s(t) = Wy(t) = WHx(t) + Wn(t) \quad (2.32)$$

Donde $s(t)$ representa la señal estimada. A continuación se describen los algoritmos que constituyen los métodos de detección lineal.

2.7.1 Algoritmo de Forzado a Cero

Este algoritmo realiza una inversión de la matriz de coeficientes del canal³, para satisfacer el criterio de *Zero-Forcing* por medio del cálculo de la pseudo-inversa de la matriz H , con el objetivo de mitigar la interferencia.

La matriz W correspondiente al algoritmo ZF está dada por la pseudo-inversa de *Moore-Penrose* de H , la cual se representa en la ecuación 2.33.

$$W = (H^H H)^{-1} H^H \quad (2.33)$$

Donde H^H es la matriz Hermitiana de H que tiene la característica de ser igual a la matriz transpuesta conjugada y se define en la ecuación 2.34.

$$H^H = H \quad (2.34)$$

Cuando se obtiene $s(t)$, se compara con la señal transmitida $x(t)$ en el receptor para encontrar la BER.

El detector ZF solamente funciona adecuadamente para valores altos de SNR. Cuando se trabaja con valores de SNR bajos, se produce una amplificación de ruido considerable, lo que degrada el desempeño del sistema [19] (para mayor

³Los coeficientes de la matriz del canal son valores aleatorios variantes en el tiempo, dado que cambian en cada simulación y están relacionados con el número de antenas de transmisión y recepción.



información ver Anexo A).

2.7.2 Algoritmo de Mínimo Error Cuadrático Medio

Para reducir el efecto de la amplificación del ruido, se hace necesario utilizar el algoritmo de detección lineal Mínimo Error Cuadrático Medio (MMSE, *Minimum Mean Squared Error*), el cual considera tanto la interferencia como el ruido para la estimación de los símbolos transmitidos.

Esta técnica trata de minimizar al máximo el Error Cuadrático Medio (MSE, *Mean Square Error*), que sirve como medida para estimar la calidad del sistema [20] y su objetivo es encontrar una matriz que al multiplicarla por $y(t)$ de la ecuación 2.32 el ruido resultante sea mínimo [21]. Esta matriz recibe el nombre de pseudo-inversa para MMSE y está dada por la ecuación 2.35 [22].

$$W = (H^H H + \frac{1}{SNR} I)^{-1} H^H \quad (2.35)$$

Donde I es la matriz identidad. El desempeño del algoritmo MMSE es mejor que el de ZF, sobre todo en sistemas donde la SNR es baja, sin embargo requiere mayor procesamiento computacional que ZF, debido al aumento en el número de operaciones necesarias para el cálculo de la pseudo-inversa (para observar el desarrollo matemático remitirse al Anexo A).

2.8 SISTEMA MIMO-OFDM

La implementación de múltiples antenas transmisoras y receptoras en un sistema de comunicaciones incrementa la tasa de bit cuando se utiliza el esquema de multiplexación espacial, sin embargo cuando se presenta interferencia intersimbólica debido al multitrayecto originado en el canal, la detección de la señal se vuelve compleja y difícil de implementar.

Para combatir este problema, los sistemas MIMO combinan el procesamiento de señales con la técnica de transmisión OFDM que utiliza portadoras ortogonales entre sí, facilitando la detección en el receptor [22]. La figura 2.13 muestra el esquema general de un sistema MIMO-OFDM, donde $(X_1, X_2, \dots, X_{NT})$ y $(Y_1, Y_2, \dots, Y_{NR})$ representan los símbolos transmitidos y recibidos respectivamente.

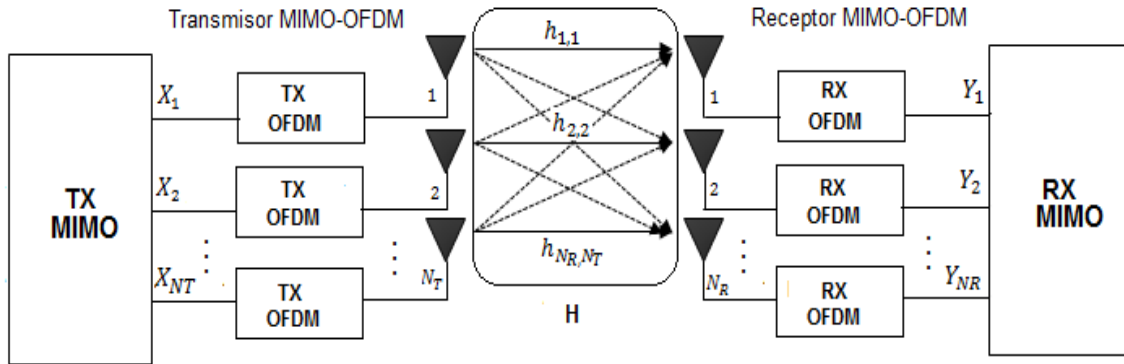


Figura 2.13 Sistema MIMO-OFDM

2.8.1 Transmisor MIMO-OFDM

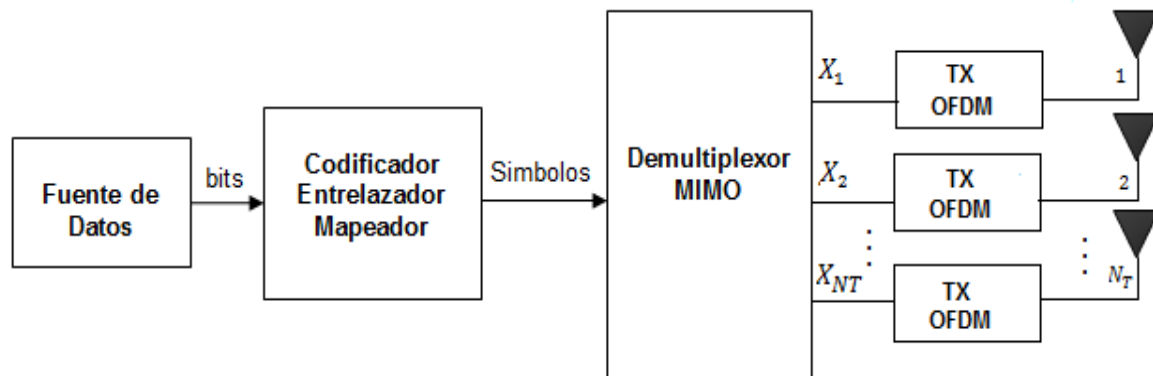


Figura 2.14 Transmisor MIMO-OFDM con Esquema de Multiplexación V-BLAST

La figura 2.14 representa el bloque transmisor de un sistema MIMO-OFDM que implementa el esquema de codificación V-BLAST, donde ingresa un flujo de bits, los cuales se codifican, se entrelazan y se mapean, como resultado se obtienen símbolos seriales que se demultiplexan en función de las N_T antenas en transmisión, siendo $(X_1, X_2, \dots, X_{N_T})$ los símbolos resultantes, los cuales siguen el proceso que se explicó en el apartado 2.3.1. Finalmente, los símbolos OFDM originados por cada transmisor OFDM se transmiten por las N_T antenas a través del canal de comunicaciones.

En la configuración del esquema de multiplexación V-BLAST la codificación, el mapeo y el entrelazado se realizan en forma conjunta antes de la demultiplexación de los datos que se transmiten, sin embargo en la simulación realizada no se

implementan dos de estos procesos: codificación y entrelazado, ya que son técnicas que mejoran el desempeño del sistema, y el objetivo de este trabajo de grado es analizarlo de una manera más sencilla.

Con el uso de la multiplexación espacial se logra aumentar la velocidad de transmisión de los datos pero esto no implica que la calidad del sistema sea mejor. [23]

2.8.2 Receptor MIMO-OFDM

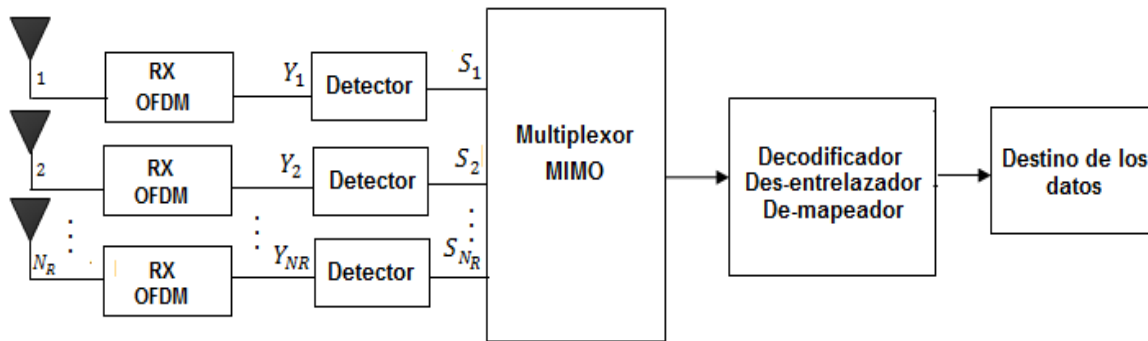


Figura 2.15 Receptor MIMO-OFDM

La figura 2.15 muestra el diagrama en bloques de un receptor MIMO-OFDM, en el cual los símbolos OFDM se reciben por las N_R antenas de recepción, luego se procesan de acuerdo a lo explicado en el apartado 2.3.2. A la salida del receptor OFDM se obtienen los símbolos modulados recibidos representados por $(Y_1, Y_2, \dots, Y_{N_R})$, los cuales se multiplican por la matriz pseudoinversa W definida para cada algoritmo de detección lineal: ZF o MMSE, con el fin de realizar la estimación de los símbolos transmitidos.

Los símbolos estimados representados por $(S_1, S_2, \dots, S_{N_R})$ se multiplexan para obtener de nuevo los símbolos seriales transmitidos, los cuales se decodifican, des-entrelazan y des-mapean con el objetivo de recuperar la información contenida en los símbolos de la constelación perteneciente a la modulación utilizada en el transmisor [23].





3 METODOLOGÍA

Este capítulo presenta la metodología para la simulación de sistemas de telecomunicaciones [24], adaptada para realizar la simulación del sistema MIMO-OFDM, con el fin de cumplir los objetivos propuestos.

3.1 PROCESO DE DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN

La metodología a seguir para la creación y desarrollo de una simulación que permita analizar el desempeño del nivel físico de un sistema MIMO OFDM, se resume en el diagrama de flujo que se muestra en la figura 3.1.

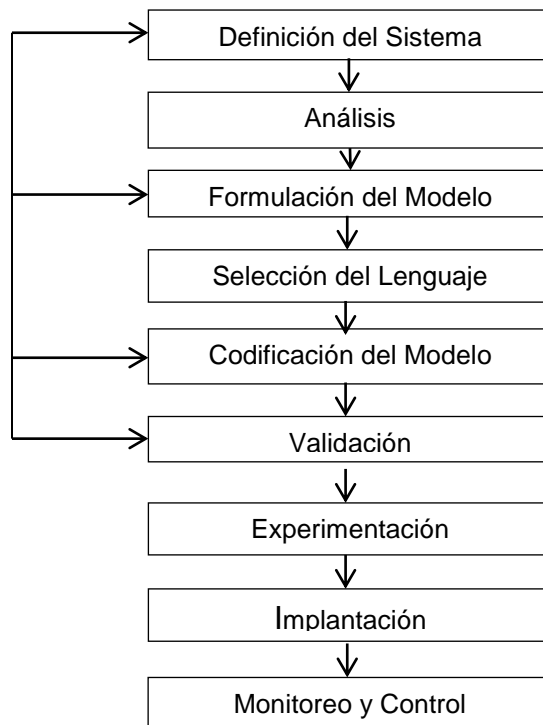


Figura 3.1 Desarrollo del Modelo de Simulación

A continuación se presenta el desarrollo de cada fase.



3.2 FASE 1: DEFINICIÓN DEL SISTEMA

El sistema a desarrollar es un sistema MIMO OFDM con arreglo de antenas 2x2 y 4x4, con canal AWGN, trabajando bajo el esquema de multiplexación V-BLAST, empleando modulaciones 16-QAM y 64-QAM y algoritmos de detección ZF y MMSE.

3.3 FASE 2: ANÁLISIS DEL SISTEMA

En esta fase se describen las interacciones lógicas entre las variables de decisión. A continuación se definen el estado del sistema y las actividades:

3.3.1 Estado del Sistema

El sistema trabaja con dos tipos de variables: principales y secundarias. Las principales son aquellas que influyen directamente en los resultados obtenidos de la simulación y las secundarias son las que influyen en las variables principales.

1. Variables principales:

- Número de bits enviados.
- Tasa de error de bits.
- Tamaño de la transformada de Fourier.
- Orden de modulación.
- Tipo de algoritmo de detección.
- Número de portadoras.

2. Variables secundarias:

- Número de antenas.
- Tipo del canal: AWGN.
- Vector de símbolos transmitidos.
- Vector de símbolos recibidos.
- Matriz de transferencia del canal.
- Tipo de multiplexación: V-BLAST.

3.3.2 Actividad

Las actividades principales son la transmisión y recepción de los símbolos OFDM. En estas actividades, el tiempo de ejecución varía dependiendo de factores como: el algoritmo de detección, número de antenas, tamaño de la FFT, número de portadoras, bits enviados y tipo de modulación.



3.3.3 Entidades

Una entidad puede ser cualquier objeto dentro del sistema, que puede ser estática o dinámica dependiendo de su función. Las entidades estáticas del sistema corresponden a los algoritmos de detección, el modelo de canal, número de portadoras y el número de puntos de la FFT/IFFT, las dinámicas corresponden al arreglo de antenas, el orden de la modulación; que influyen en el comportamiento de las entidades estáticas.

3.4 FASE 3: FORMULACIÓN DEL MODELO

Es necesario implementar un código lógico-matemático que defina y respalde de forma exacta todas las interacciones entre las variables del sistema, sus relaciones lógicas, diagramas de flujo y en bloque, que permitan explicar de forma detallada el modelo. Para realizar la formulación del modelo se tienen en cuenta los aspectos relacionados con el objetivo de este trabajo de grado, como el desempeño de los algoritmos de detección ZF y MMSE, y la técnica de transmisión OFDM que trabaja conjuntamente con un sistema de múltiples antenas.

3.4.1 Diagrama en Bloques de OFDM

El diagrama en bloques del sistema OFDM se observa en la figura 3.2.

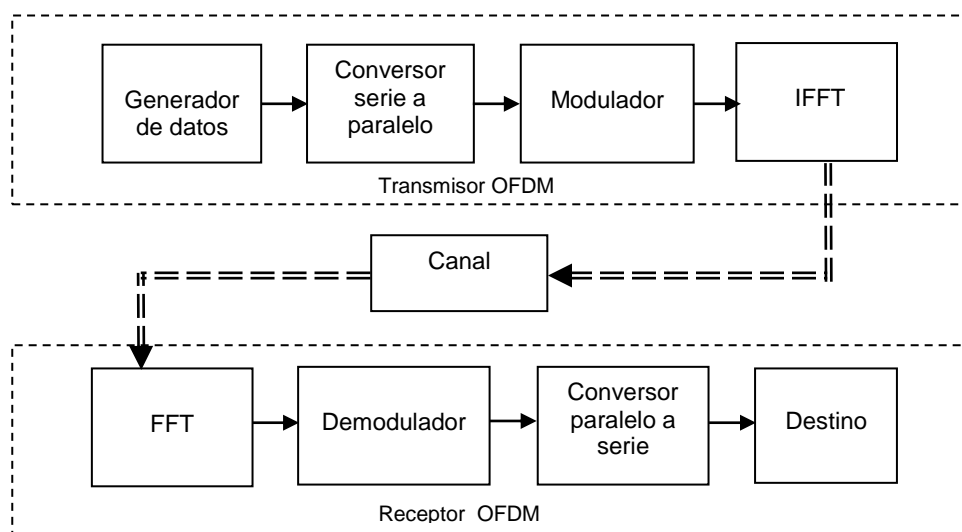


Figura 3.2 Diagrama en Bloques de OFDM



3.4.2 Diagrama en Bloques de un Sistema MIMO-OFDM

A continuación en la figura 3.3 se presenta el diagrama en bloques de un sistema MIMO-OFDM.

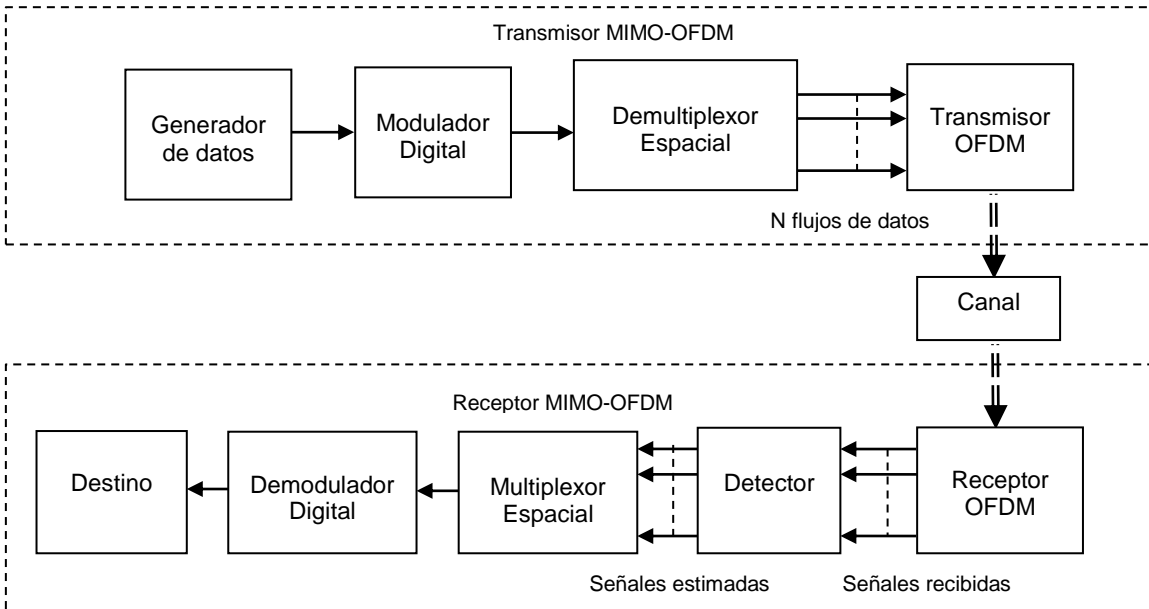


Figura 3.3 Diagrama en Bloques del Sistema MIMO-OFDM

A continuación se presentan los diagramas de flujo de los sistemas OFDM y MIMO-OFDM implementados en el código de la simulación, así mismo se muestra el diagrama de flujo de la técnica de multiplexación espacial V-BLAST y de los algoritmos de detección utilizados en este trabajo de grado, con el fin de brindar un análisis más detallado del sistema. En la figura 3.4 se muestra el diagrama de flujo de un sistema OFDM.



3.4.3 Diagrama de Flujo de un Sistema OFDM

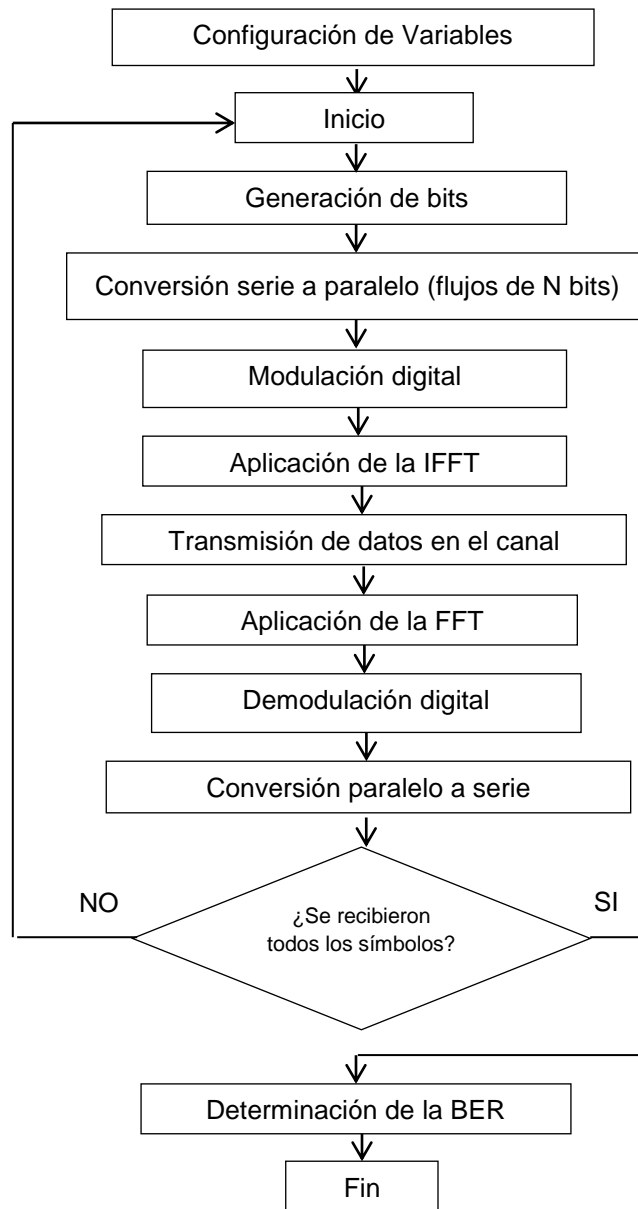


Figura 3.4 Diagrama de Flujo de un Sistema OFDM



3.4.4 Diagrama de Flujo de un Sistema MIMO-OFDM

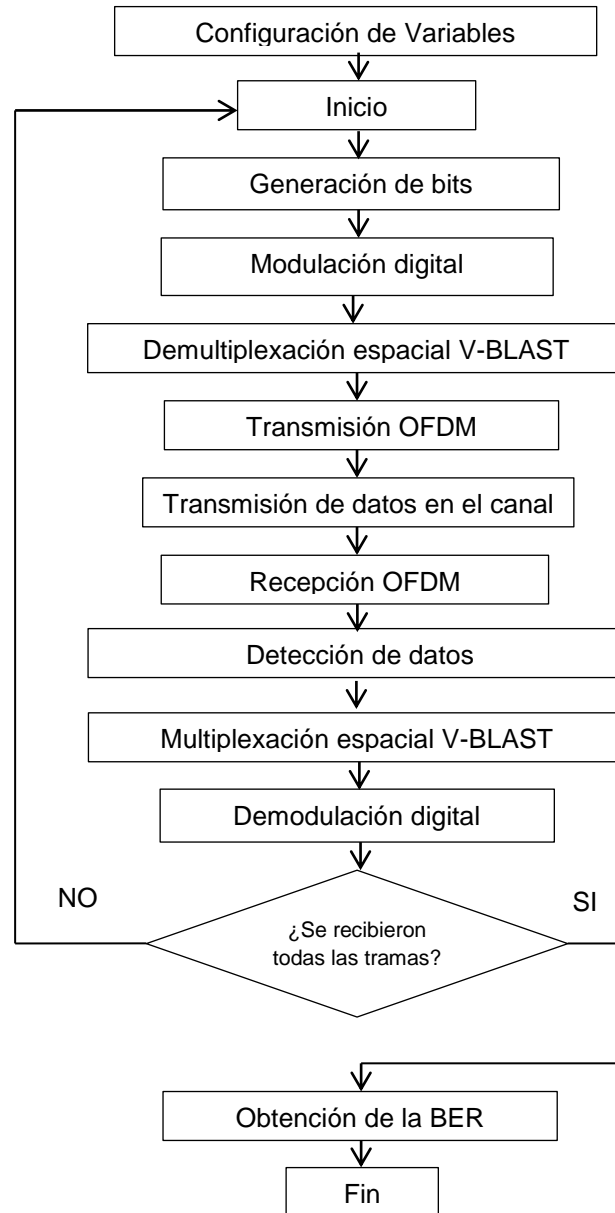


Figura 3.5 Diagrama de Flujo de un Sistema MIMO-OFDM



3.4.5 Diagrama de Flujo de la Multiplexación V-BLAST

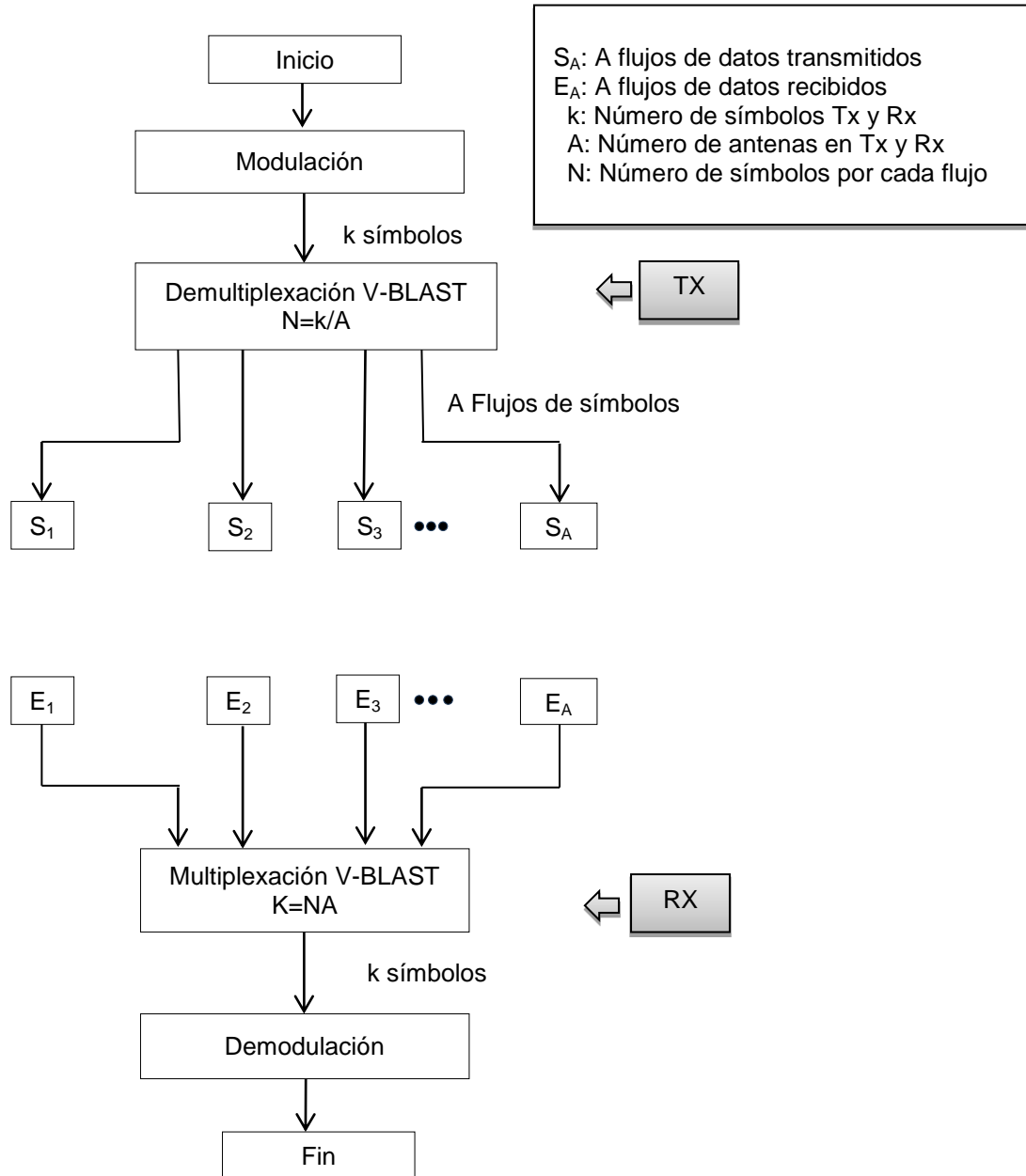


Figura 3.6 Diagrama de Flujo del Esquema V-BLAST [25]



3.4.6 Diagrama de Flujo del Algoritmo ZF

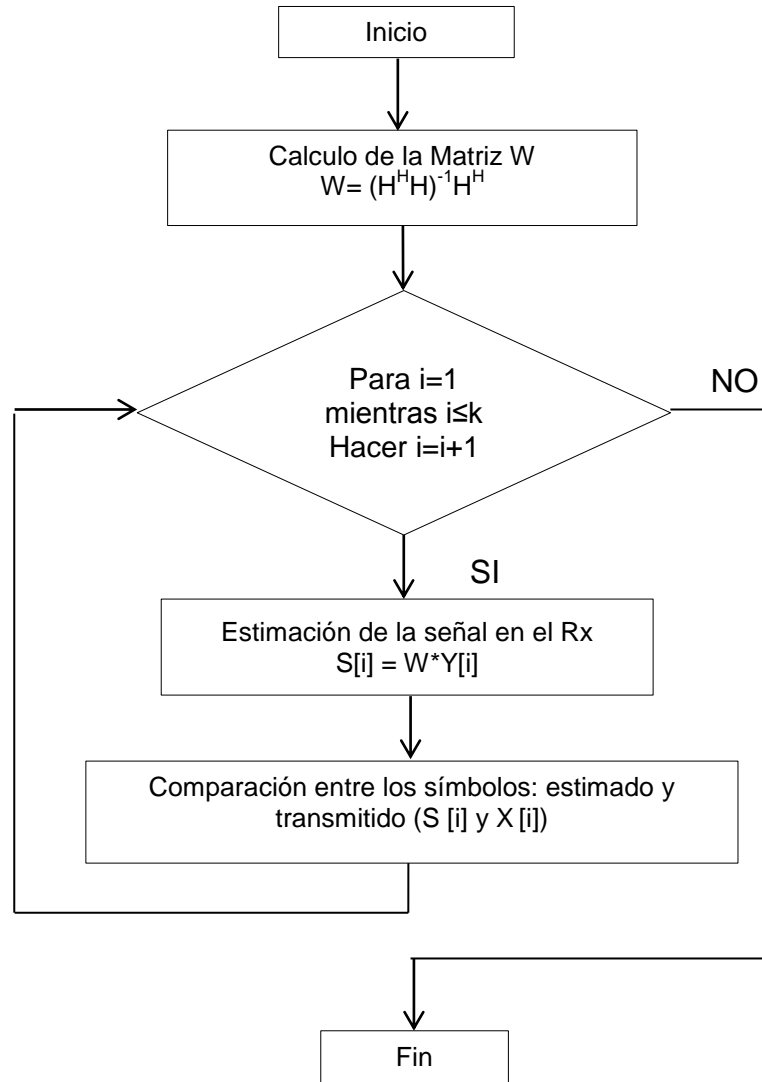


Figura 3.7 Diagrama de Flujo del Algoritmo ZF [25]

En el diagrama de flujo de la figura 3.7, W representa la matriz pseudo-inversa del algoritmo ZF, Y[i] es símbolo i-esimo recibido, H representa la matriz del canal, X [i] es el símbolo i-esimo transmitido, S[i] es el símbolo i-esimo estimado y k es número total de símbolos transmitidos.



3.4.7 Diagrama de Flujo del Algoritmo MMSE

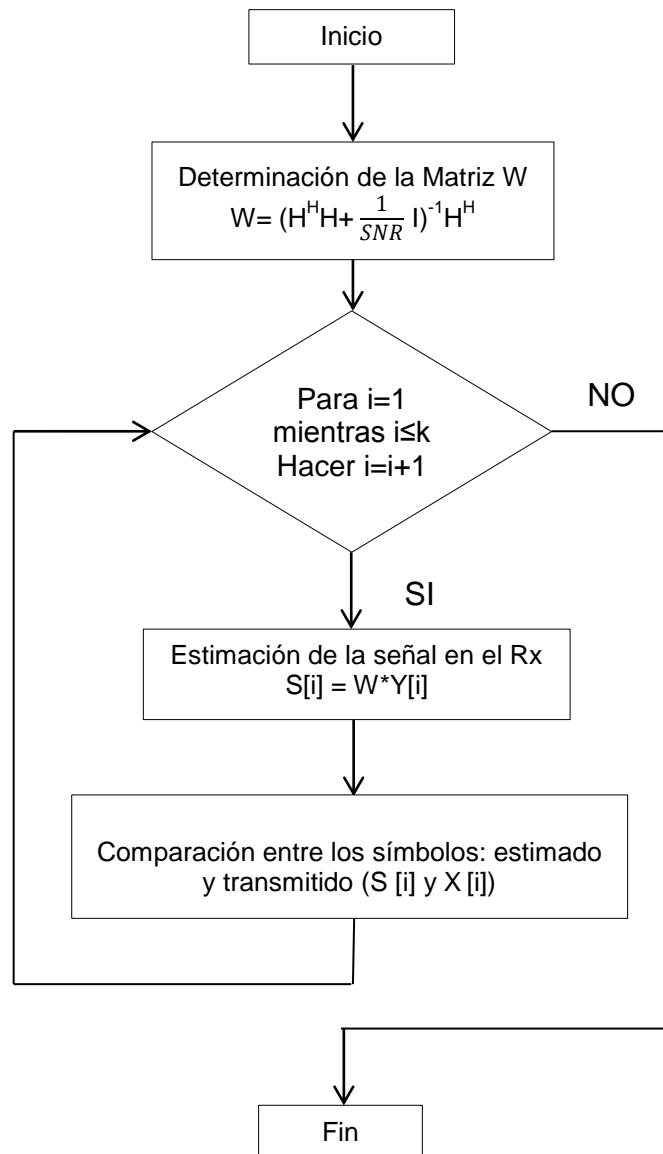


Figura 3.8 Diagrama de Flujo del Algoritmo MMSE [25]

En el diagrama de flujo de la figura 3.8, W representa la matriz pseudo-inversa del algoritmo MMSE, $Y[i]$ es símbolo i -ésimo recibido, H representa la matriz del canal, $X[i]$ es el símbolo i -ésimo transmitido, k es número total de símbolos transmitidos, $S[i]$ es el símbolo i -ésimo estimado y $1/SNR$ representa la relación entre la potencia de ruido y la potencia de la señal.



3.5 FASE 4: SELECCIÓN DEL LENGUAJE

Se escogió MATLAB como herramienta para simular el sistema, porque es un software muy usado para el análisis de señales en universidades, centros de investigación y desarrollo. La Universidad del Cauca cuenta con licencias y emplea este entorno para sus proyectos de investigación.

Esta herramienta permite que el usuario manipule matrices, implemente algoritmos, represente datos, cálculos y funciones, además facilita la creación de interfaces gráficas que posibilitan una interacción amigable con el sistema [26]; dichas prestaciones contribuyen con el desarrollo de la simulación del sistema a implementar en este trabajo de grado.

3.6 FASE 5: CODIFICACIÓN DEL MODELO

Consiste en generar un código computacional acorde al modelo diseñado, para cada uno de los bloques de la figura 3.3. A continuación se muestra el diagrama de clases de las funciones implementadas en la simulación realizada en este trabajo de grado.

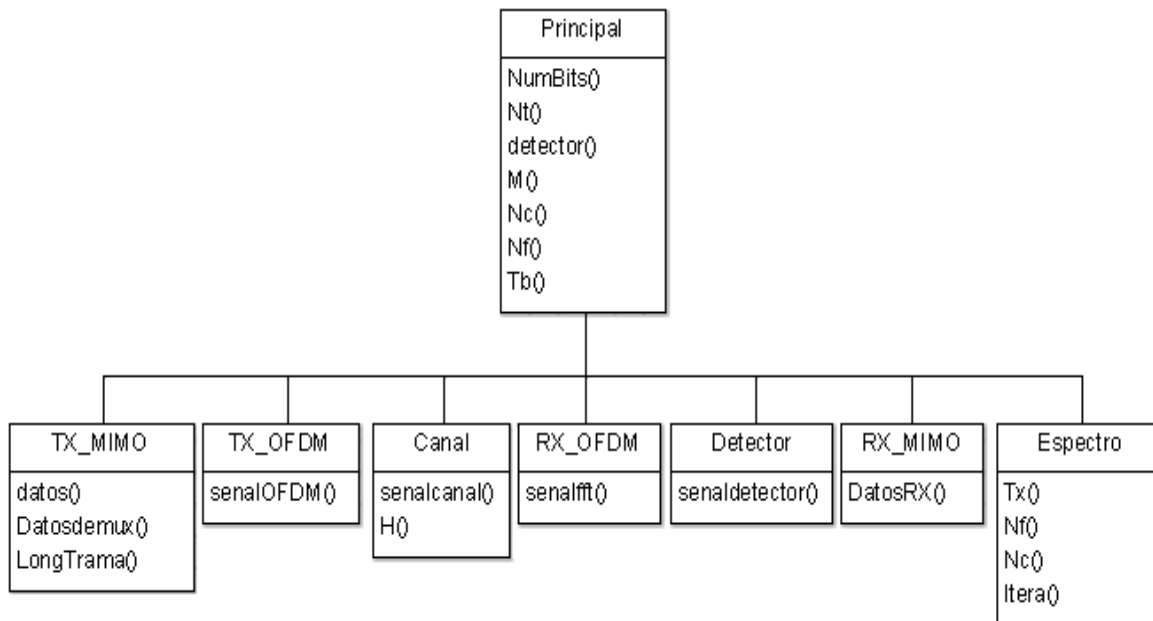


Figura 3.9 Diagrama de Clases del Modelo

En la figura 3.9 se presenta la estructura del código implementado en la simulación. A continuación se explica cada clase.



3.6.1 Transmisor MIMO

En la figura 3.10 se muestra el diagrama de la clase Transmisor MIMO.

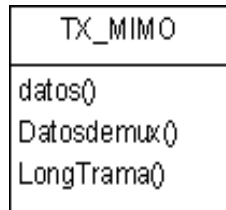


Figura 3.10 Clase Transmisor MIMO

Proceso:

En esta clase se generan los bits de información de forma aleatoria, posteriormente se modulan con el esquema 16QAM o 64 QAM y finalmente se demultiplexan los símbolos por las N_t antenas con el esquema V-BLAST.

Parámetros de entrada:

- N_t : número de antenas en transmisión y recepción.
- M : orden de la modulación.
- NumTramas: número de tramas.
- NumBits: número de bits transmitidos.

Parámetros de salida:

- datos: datos binarios transmitidos.
- Datosdemux: símbolos modulados y demultiplexados transmitidos.
- LongTrama: longitud de la trama.

3.6.2 Transmisor OFDM

La figura 3.11 presenta el diagrama de la clase Transmisor OFDM.

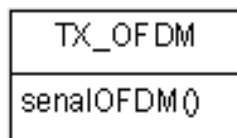


Figura 3.3.11 Clase Transmisor OFDM



Proceso:

Se aplica la Transformada Inversa de Fourier a los símbolos demultiplexados, de esta manera son transmitidos hacia el canal.

Parámetros de entrada:

- Datosdemux: símbolos demultiplexados en el transmisor MIMO.
- Nf: número de puntos de la FFT.
- Nt: número de antenas en transmisión y recepción.
- Nc: número de portadoras.
- ltera: factor de relación entre el número total de tramas y el número de portadoras para aplicar la IFFT/FFT.

Parámetros de salida:

- senalOFDM: símbolos OFDM.

3.6.3 Canal

La clase Canal se presenta en la figura 3.12.

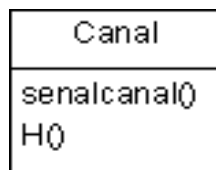


Figura 3.12 Clase Canal

Proceso:

Se genera la matriz del canal, la cual se multiplica por los símbolos OFDM transmitidos y se adiciona ruido blanco Gaussiano.

Parámetros de entrada:

- senalOFDM: símbolos OFDM.
- SNRdB: relación Señal a Ruido en decibelios.
- Nt: número de antenas en transmisión y recepción.
- Nf: número de puntos de la FFT.
- ltera: factor de relación entre el número total de tramas y el número de portadoras para aplicar la IFFT/FFT.

Parámetros de salida:

- senalcanal: señal OFDM con ruido blanco Gaussiano.
- H: matriz de transferencia del canal.



3.6.4 Receptor OFDM

La figura 3.13 presenta el diagrama de la clase Receptor OFDM.

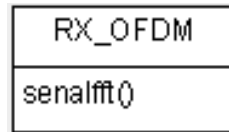


Figura 3.13 Clase Receptor OFDM

Proceso:

Recibe los símbolos OFDM con ruido blanco Gaussiano y se les aplica la Transformada Rápida de Fourier.

Parámetros de entrada:

- `senalcanal`: símbolos OFDM recibidos con ruido blanco Gaussiano.
- `Nt`: número de antenas en transmisión y recepción.
- `Nf`: número de puntos de la FFT.
- `Nc`: número de portadoras.
- `Itera`: factor de relación entre el número total de tramas y el número de portadoras para aplicar la IFFT/FFT.

Parámetros de salida:

- `senalfft`: símbolos modulados recibidos.

3.6.5 Detector

La figura 3.14 presenta el diagrama de la clase Detector.

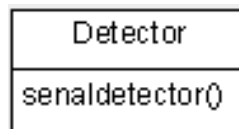


Figura 3.14 Clase Detector

Proceso:

Se emplean los algoritmos ZF y MMSE en el receptor OFDM para detectar los símbolos recibidos. Este proceso se realiza de forma diferente para cada detector mediante el cálculo de la matriz pseudo-inversa W explicado en el capítulo 2, con el objetivo de obtener una estimación de los símbolos transmitidos.



Parámetros de entrada:

- senalfft: símbolos modulados recibidos.
- H: matriz de coeficientes del canal.
- Nt: número de antenas en transmisión y recepción.
- detector: tipo de detector utilizado.
- SNR_inv: relación de potencia.

Parámetros de salida:

- senaldetector: símbolos estimados.

3.6.6 Receptor MIMO

La figura 3.15 muestra la clase Receptor MIMO.

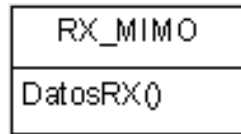


Figura 3.15 Clase Receptor MIMO

Proceso:

Se multiplexan los símbolos estimados provenientes del detector, y se demodulan según el tipo de modulación empleado en el transmisor para obtener los datos binarios transmitidos.

Parámetros de entrada:

- senaldetector: símbolos estimados.
- NumTramas: número de tramas.
- Nt: número de antenas en transmisión y recepción.
- M: orden de la modulación.

Parámetros de salida:

- DatosRX: datos binarios recibidos.



3.6.7 Principal

La figura 3.16 presenta el diagrama de la clase Principal.

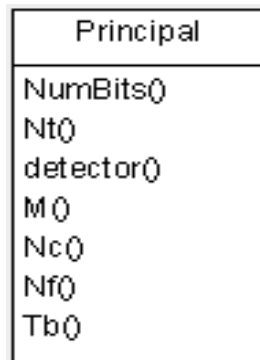


Figura 3.16 Clase Principal

Proceso:

Se define las características del sistema a simular tales como: la cantidad de bits que se envían, el número de antenas en transmisión y recepción, el tipo de detector (ZF o MMSE), el orden de modulación, el número de portadoras, el número de puntos de la FFT y el periodo de bit; también se integran las funciones necesarias para simular las clases descritas anteriormente y se grafican las curvas de los parámetros de desempeño (BER, *Throughput*, ancho de banda y eficiencia espectral) en función de la SNR.

Parámetros de entrada:

- NumBits: número de bits transmitidos.
- Nt: número de antenas en transmisión y recepción.
- detector: tipo de detector utilizado.
- M: orden de la modulación.
- Nc: número de portadoras.
- Nf: número de puntos de la FFT.
- Tb: periodo de bit.

3.6.8 Espectro

La figura 3.17 muestra el diagrama de la clase Espectro.



Espectro
Tx()
Nf()
Nc()
Itera()

Figura 3.17 Clase Espectro

Proceso:

Se implementa para graficar el espectro de la señal OFDM.

Parámetros de entrada:

- Tx: señal OFDM transmitida.
- Nf: número de puntos de la FFT.
- Nc: número de portadoras.
- Itera: factor de relación entre el número total de tramas y el número de portadoras para aplicar la IFFT/FFT.

3.7 FASE 6: VALIDACIÓN

En la actualidad, los sistemas MIMO-OFDM se encuentran aún en fase de investigación, por lo cual es difícil encontrar trabajos relacionados que implementen similares configuraciones de enlace a las configuraciones realizadas en este trabajo de grado. Por lo tanto se realiza un proceso de validación interno.

3.7.1 Validación 1

Se considera un sistema MIMO-OFDM con 4 antenas en transmisión y recepción, modulación 16-QAM y sin adición de ruido en el canal de comunicación como se muestra en la figura 3.18, con el fin de verificar que se reciban correctamente los datos enviados por el transmisor.

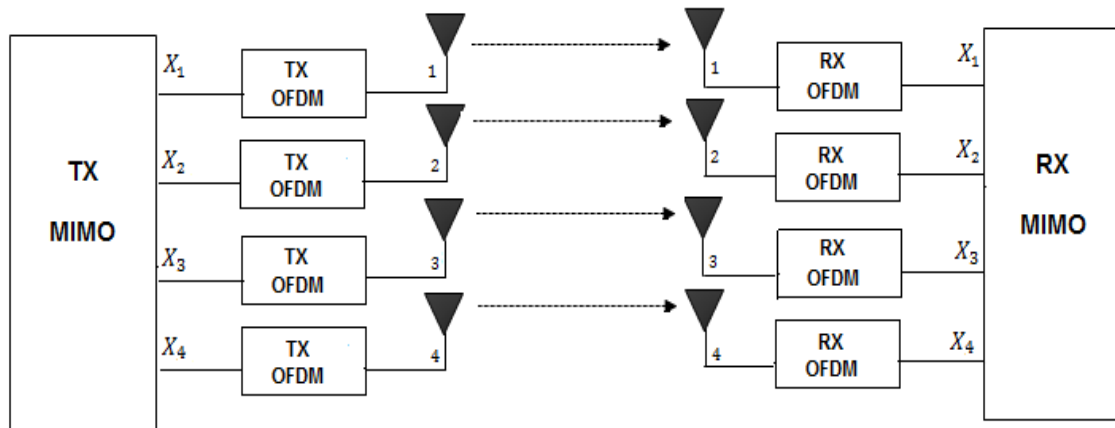


Figura 3.18 Esquema del sistema MIMO-OFDM sin Canal

En la figura 3.19 se presenta el desempeño del sistema, las líneas rectas de color rojo y azul representan los detectores MMSE y ZF respectivamente, las cuales indican que a medida que aumenta la SNR, la tasa de error de bits se mantiene constante en un valor de 10^{-7} , el cual se estableció como valor mínimo de BER en la simulación. Por lo tanto no se presentaron errores en la transmisión de los datos.

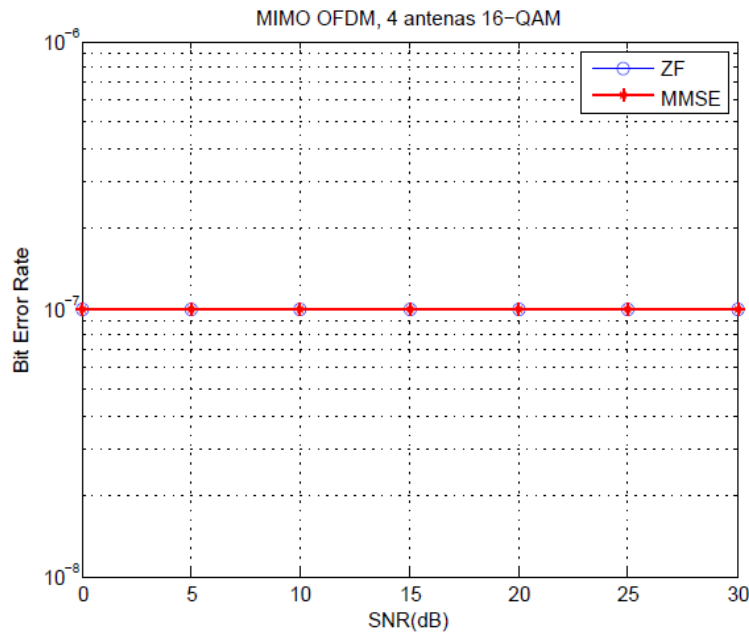


Figura 3.19 Desempeño del Sistema sin Canal



Como los dos detectores presentan igual desempeño, se escoge el detector MMSE para observar el diagrama de constelación de los símbolos recibidos. Los diagramas de constelación mostrados en la figura 3.20 respaldan los resultados de la figura 3.19, se aprecia que los símbolos transmitidos mostrados en la figura 3.20 (a) y recibidos en la figura 3.20 (b) son iguales, ya que están ubicados en la misma posición de cuadratura y fase sin que exista alguna diferencia.

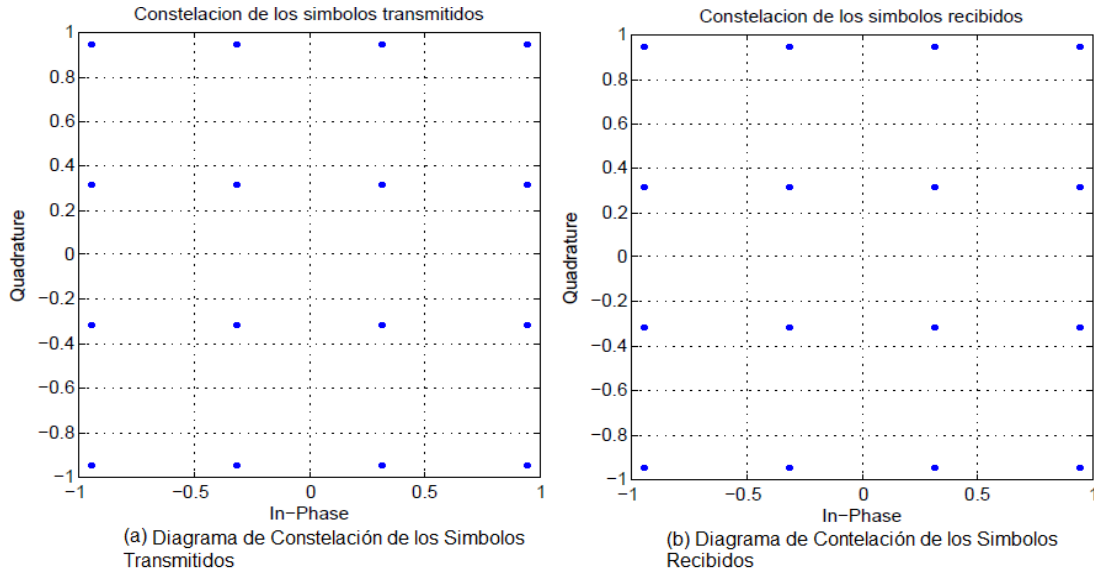


Figura 3.20 Diagrama de Constelación de los Símbolos de la Modulación 16-QAM en Transmisión y Recepción, con Arreglo de Antenas 4x4 y Algoritmo de Detección MMSE

Los resultados obtenidos permitieron validar el desempeño del sistema cuando no existe ruido en el canal de comunicación.

3.7.2 Validación 2

Se considera un sistema MIMO-OFDM con modulación 16-QAM, donde se adiciona ruido AWGN al canal de comunicación. La figura 3.21 presenta el esquema del sistema.

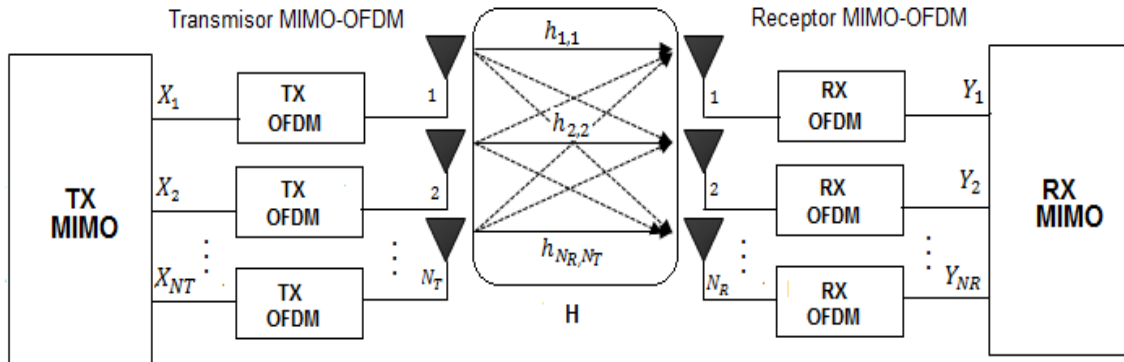


Figura 3.21 Esquema del sistema MIMO-OFDM con Canal

En la figura 3.22 se presentan los diagramas de constelación de los símbolos transmitidos y recibidos para una SNR de 25 dB, estos últimos no reflejan una dispersión considerable.

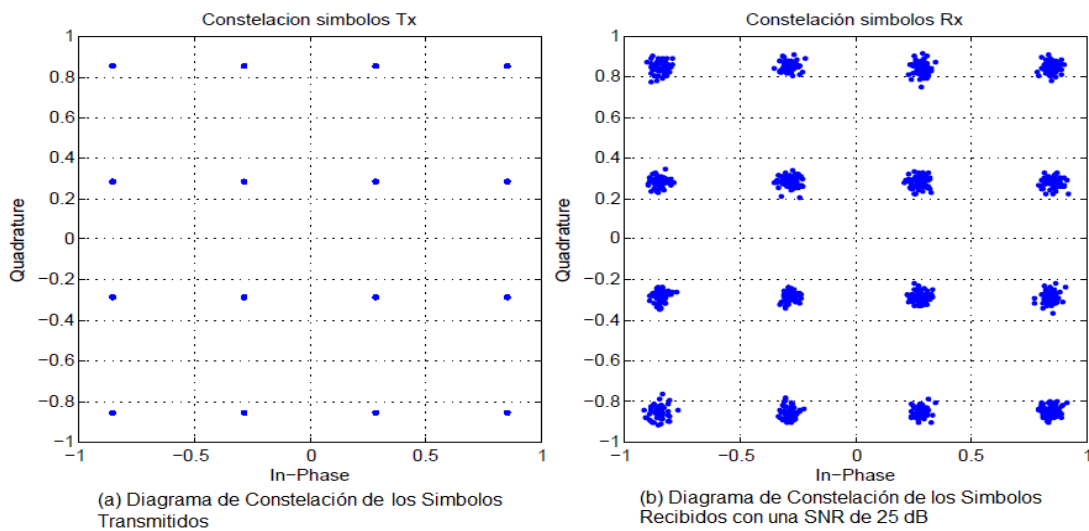


Figura 3.22 Diagrama de Constelación de Símbolos Transmitidos y Recibidos con Canal de Comunicación para una SNR de 25 dB

La figura 3.23 muestra el diagrama de constelación de los símbolos recibidos para una SNR de 40 dB, se aprecia que los símbolos presentan una dispersión menor que los símbolos recibidos con una SNR de 25 dB. Por lo tanto el desempeño del sistema es adecuado, ya que con valores altos de SNR los símbolos recibidos se asemejan a los símbolos transmitidos, alcanzando una BER de 10^{-7} .

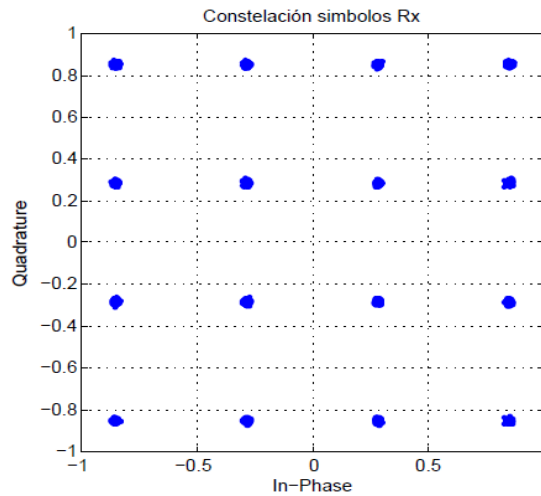


Figura 3.23 Diagrama de Constelación de los Símbolos Recibidos con Canal de Comunicación para una SNR de 40 dB

3.7.3 Validación 3

Este análisis se realiza con el objetivo de comparar la BER en cada antena receptora cuando recibe las señales de todas las antenas de transmisión simultáneamente. Como el efecto es similar en todas las antenas de recepción, la simulación se realizó para una antena, el sistema se muestra en la figura 3.24.

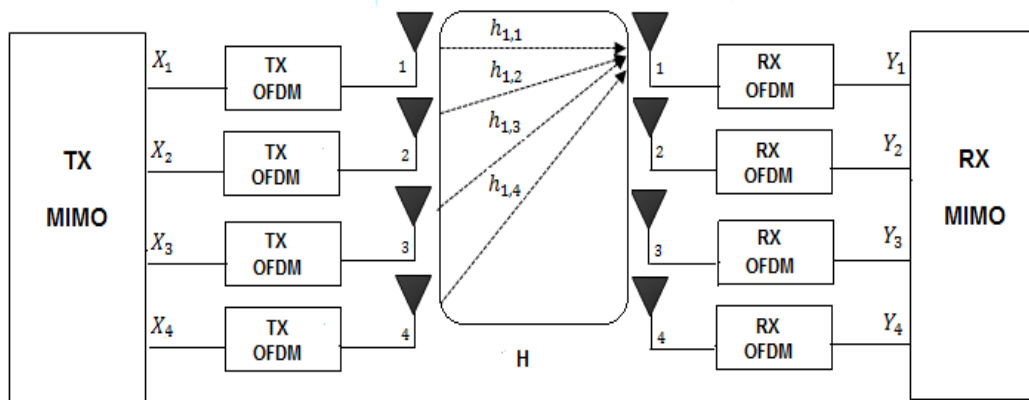
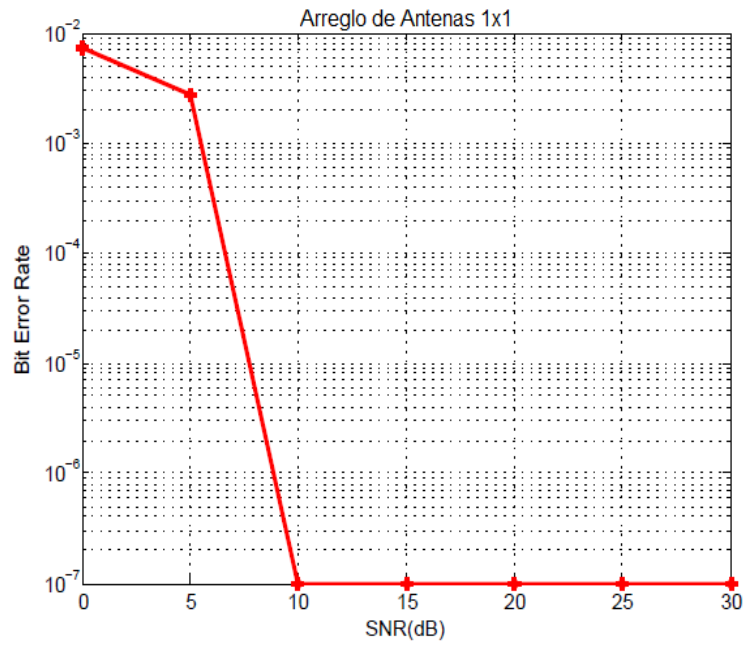
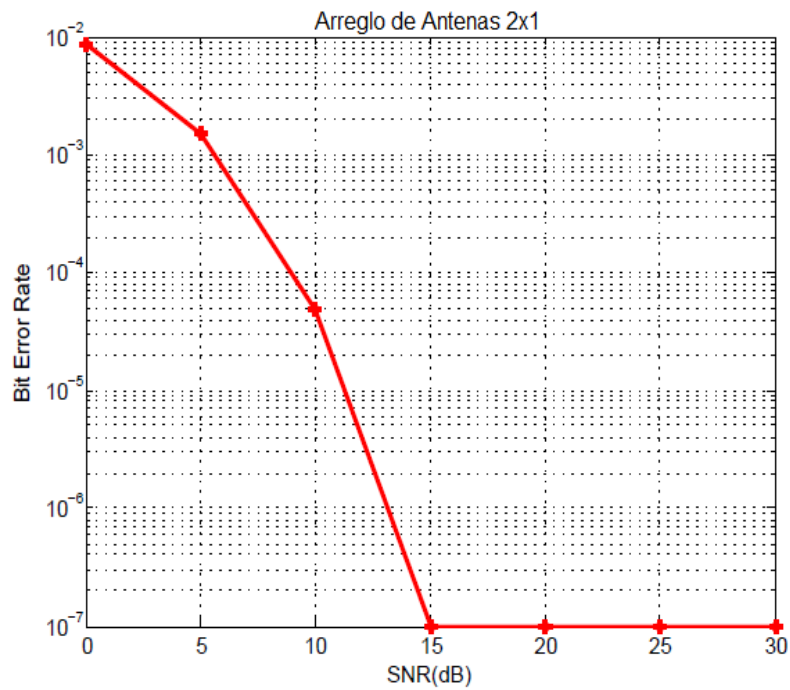


Figura 3.24 Sistema MIMO-OFDM empleado para la validación 3

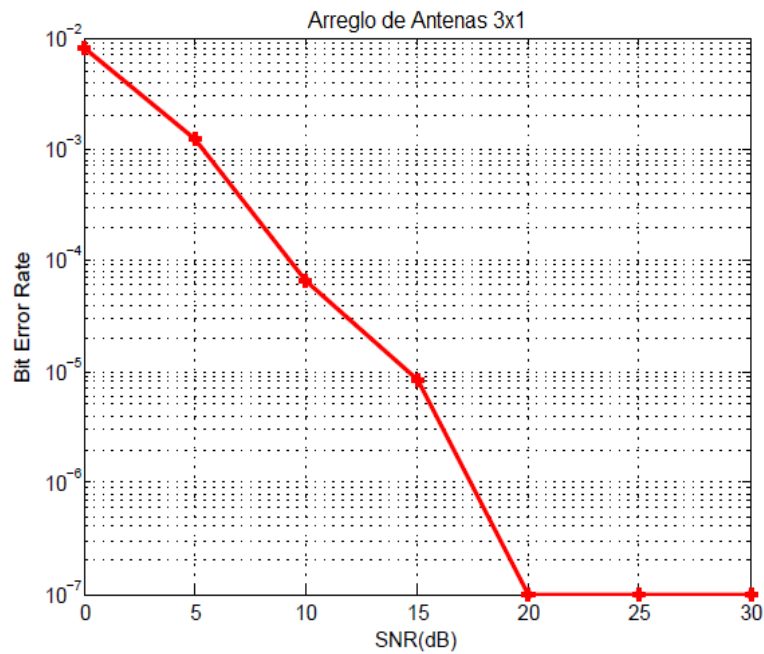
La figura 3.25 muestra las curvas de desempeño del sistema en términos de la BER cuando la antena 1 del receptor recibe las señales provenientes de las cuatro antenas en el transmisor.



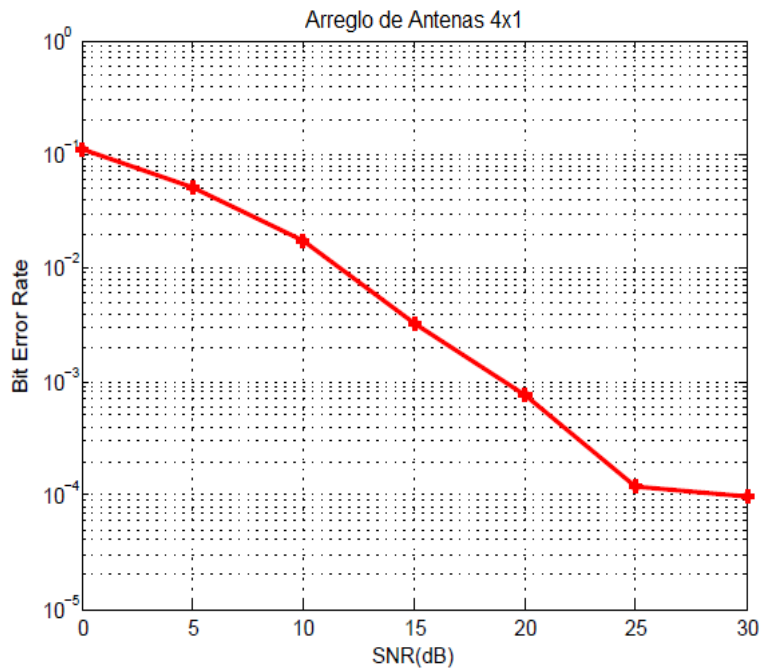
(a) Curva de la BER cuando Transmite la Antena 1



(b) Curva de la BER cuando Transmiten las Antenas 1 y 2



(c) Curva de la BER cuando Transmiten las Antenas 1, 2 y 3



(d) Curva de la BER cuando Transmiten las Antenas 1, 2, 3 y 4

Figura 3.25 Desempeño del Sistema Validación 3



La figura 3.25 (a) presenta la curva de BER cuando transmite la antena 1, se observa que para alcanzar una BER de 10^{-7} , se requiere una SNR de 10 dB. Esto implica que cuando se tiene una antena para transmitir, el sistema requiere un valor bajo de SNR para lograr una BER menor que 10^{-6} , ya que en este caso no existen señales interferentes provenientes de otras antenas.

En la figura 3.25 (b) se tiene la curva de la BER cuando la transmisión en el sistema se realiza por las antenas 1 y 2. Se aprecia que se requiere una SNR mayor en 5 dB para alcanzar una BER de 10^{-7} en comparación a la SNR requerida cuando se transmite por una antena. Además, para lograr una BER de 10^{-4} en este caso se necesita una SNR de 8.78 dB, y cuando trasmite una antena se requiere aproximadamente 2 dB menos. Este aumento en los valores de SNR requeridos para alcanzar un determinado valor de BER se debe a la presencia de una señal interferente que llega al receptor proveniente de la antena 2.

Las figuras 3.25 (c) y 3.25 (d), muestran las curvas de la BER cuando transmiten las antenas 1, 2, 3 y cuando transmiten las antenas 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Se observa que con tres antenas transmitiendo, se requiere 20 dB de SNR para alcanzar una BER de 10^{-7} , mientras que con cuatro antenas en transmisión el valor de BER que se logra es de $3.83 * 10^{-3}$ para el mismo valor de SNR. Es decir que cuando se transmite por las cuatro antenas la BER se incrementa. En la tabla 3.1 se presentan los valores de la BER para los cuatro casos.

SNR (dB)	BER			
	Arreglo de antenas 1x1	Arreglo de antenas 2x1	Arreglo de antenas 3x1	Arreglo de antenas 4x1
0	$7.25 * 10^{-3}$	$8.78 * 10^{-3}$	$7.97 * 10^{-3}$	$1 * 10^{-2}$
5	$2.36 * 10^{-3}$	$1.67 * 10^{-3}$	$1.84 * 10^{-3}$	$4.24 * 10^{-2}$
10	$1 * 10^{-7}$	$4.12 * 10^{-5}$	$6.95 * 10^{-6}$	$1.18 * 10^{-2}$
15	$1 * 10^{-7}$	$1 * 10^{-7}$	$7.76 * 10^{-6}$	$3.54 * 10^{-3}$
20	$1 * 10^{-7}$	$1 * 10^{-7}$	$1 * 10^{-7}$	$7.83 * 10^{-4}$
25	$1 * 10^{-7}$	$1 * 10^{-7}$	$1 * 10^{-7}$	$1.97 * 10^{-4}$
30	$1 * 10^{-7}$	$1 * 10^{-7}$	$1 * 10^{-7}$	$8.30 * 10^{-5}$

Tabla 3.1 Valores de BER Alcanzados para Diferentes Arreglos de Antenas

Los valores que se muestran en la tabla 3.1 confirman que la BER incrementa a medida que aumenta el número de antenas en transmisión para un sistema MIMO que implementa el esquema de multiplexación espacial. Esto demuestra que en el sistema MIMO-OFDM simulado en este trabajo de grado con canal AWGN, los errores en los datos recibidos se deben a las componentes indirectas que llegan a



la antena 1 de recepción provenientes de las antenas 2, 3 y 4, las cuales constituyen las señales interferentes.

3.8 FASE 7: EXPERIMENTACIÓN

En esta fase se definen los escenarios de simulación de acuerdo a las variables de entrada como el número de antenas en transmisión y recepción, el tipo de detector y el orden de la modulación. Se realizaron las posibles combinaciones de los parámetros para un mismo sistema, con el objetivo de comparar cada uno de los escenarios y analizar su desempeño para un sistema MIMO-OFDM. En la tabla 3.2 se muestran los escenarios de simulación analizados en este trabajo de grado.

Escenario	Arreglo de Antenas	Canal	Modulación
1	2x2	AWGN	16 QAM
2	2x2	AWGN	64 QAM
3	4x4	AWGN	16 QAM
4	4x4	AWGN	64 QAM

Tabla 3.2 Escenarios de simulación

Además como análisis adicional se realizó la comparación del desempeño entre un sistema OFDM y MIMO-OFDM, en términos de la BER, *Throughput* y eficiencia espectral.

3.9 FASE 8: IMPLANTACIÓN

En esta fase se ejecuta la mejor opción después de determinar las variables del sistema adecuadas para el buen funcionamiento del sistema en cada escenario; la implantación está fuera del alcance de este trabajo de grado.

3.10 FASE 9: MONITOREO Y CONTROL

Esta fase permite verificar si las fases anteriores se realizaron correctamente, permitiendo que en un futuro se efectúen cambios en la simulación desarrollada, ya sea para evitar fallos, ajustarlo a un sistema en específico o para actualizar el que ya se tiene.





4 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis de desempeño a nivel físico del sistema MIMO-OFDM en términos de: BER, *throughput*, ancho de banda y eficiencia espectral, los cuales se estudian en los cuatro escenarios descritos en la tabla 3.2.

Las modulaciones escogidas para el análisis son 16-QAM y 64-QAM, se implementan dos configuraciones de antenas en transmisión y recepción: 2x2 y 4x4, el canal de comunicaciones es AWGN, y los algoritmos de detección lineal estudiados son: ZF y MMSE. Se compara el desempeño del sistema en términos de la BER para los dos algoritmos de detección, luego se analiza el *throughput*, la eficiencia espectral, el ancho de banda y por último se analiza el tiempo de ejecución de cada escenario. En este capítulo también se realiza una comparación del desempeño del sistema MIMO-OFDM frente al de un sistema OFDM.

En todos los escenarios de simulación se transmitieron 43200 bits, se definieron 900 portadoras, 1024 puntos en la IFFT/FFT y se realizaron 10 simulaciones. La simulación se realizó en un computador Toshiba, con procesador core i5 y 4GB de RAM.

4.1 PARAMETROS DE CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACION

En la simulación la longitud de cada trama se calcula con el orden de la modulación empleada M y el número de antenas en transmisión N_t como se muestra en la ecuación 4.1.

$$LongTrama = \log_2 M * N_t \quad (4.1)$$

El número de tramas transmitidas depende del número de bits enviados (43200 bits) y la longitud de cada trama. El cálculo se presenta en la ecuación 4.2.

$$NumTrama = 43200/LongTrama \quad (4.2)$$

Para los cuatro escenarios de simulación se define un mismo valor de periodo de símbolo modulado $T = 60.48 \mu s$, el cual está dado en la ecuación 4.3.



$$T = \log_2 M * T_b \quad (4.3)$$

Donde M representa el orden de modulación, $\log_2 M$ denota los bits por símbolo y T_b es el periodo de bit. Este último varía en función de la modulación empleada.

Por lo tanto el número de tramas y la longitud de cada trama varían para cada escenario de simulación. En la tabla 4.1 se muestran los valores de estos parámetros en cada escenario.

Escenarios	Número de Tramas	Longitud de Trama (bits)
1. Sistema MIMO-OFDM con arreglo de antenas 2x2 y modulación 16-QAM	5400	8
2. Sistema MIMO-OFDM con arreglo de antenas 2x2 y modulación 64-QAM	3600	12
3. Sistema MIMO-OFDM con arreglo de antenas 4x4 y modulación 16-QAM	2700	16
4. Sistema MIMO-OFDM con arreglo de antenas 4x4 y modulación 64-QAM	1800	24

Tabla 4.1 Numero de Tramas y Longitud de Trama para los Escenarios de Simulación

4.2 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA MIMO-OFDM EN TERMINOS DE LA BER

En esta sección se analiza la BER del sistema MIMO-OFDM para cada escenario de simulación cuando se emplean los algoritmos de detección ZF y MMSE. La expresión para calcular la tasa de error de bit se define en la ecuación 4.4.

$$BER = \frac{\# \text{ Total de Bits Errados}}{\# \text{ Total de Bits Transmitidos}} \quad (4.4)$$

Se consideran valores de SNR entre 0 dB y 30 dB, porque en valores altos de SNR el desempeño de los algoritmos de detección lineal ZF y MMSE converge.

4.2.1 Escenario 1

La figura 4.1 presenta el desempeño en términos de la BER del sistema MIMO-OFDM con arreglo de antenas 2x2 y modulación 16-QAM.

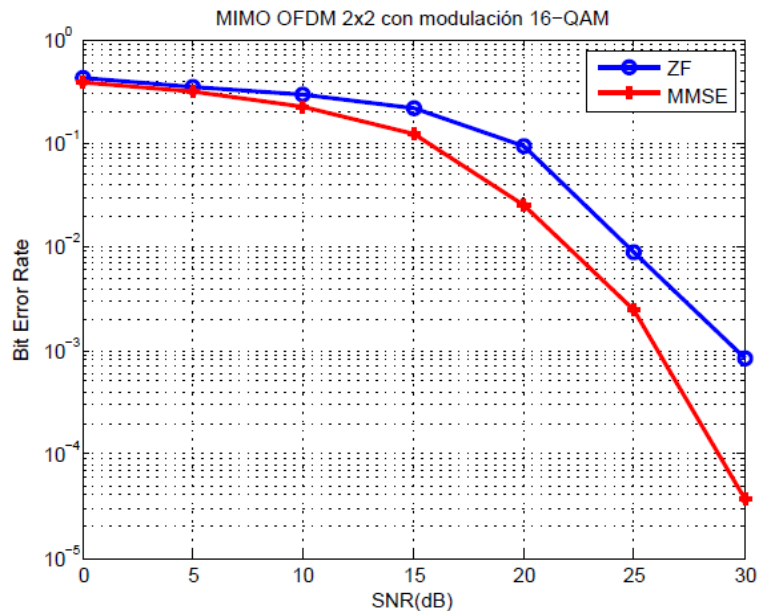


Figura 4.1 Tasa de Error de Bit del sistema MIMO-OFDM con Modulación 16-QAM y Arreglo de Antenas 2x2

Las curvas de color azul y rojo muestran el desempeño del sistema cuando utiliza los algoritmos de detección ZF y MMSE respectivamente. Se observa que a medida que se incrementa la SNR, la tasa de error de bit disminuye. Para alcanzar una BER de 10^{-2} el sistema MIMO-OFDM cuando emplea ZF requiere una SNR de 25 dB aproximadamente, mientras que cuando utiliza MMSE consigue el mismo valor de BER con una SNR menor en 3 dB. Esto demuestra que el sistema MIMO-OFDM con modulación 16-QAM y detección MMSE tiene mejor desempeño, debido a que minimiza la amplificación de ruido AWGN en valores bajos de SNR, ya que tiene en cuenta el factor de ruido del sistema en el cálculo de la matriz pseudoinversa, la cual se utiliza para la estimación de los símbolos en el receptor.

En la tabla 4.2 se muestran los valores de SNR requeridos por el sistema MIMO-OFDM para alcanzar determinados valores de BER cuando utiliza los detectores ZF y MMSE en el receptor.



BER	SNR(dB)	
	ZF	MMSE
10^{-1}	20	15.8
10^{-2}	25	22.1
10^{-3}	30	26.5
10^{-4}	-	28.7

Tabla 4.2 Valores de SNR Requeridos para Determinados Valores de BER

Teniendo en cuenta la tabla 4.2, se observa que para el rango de valores de BER comprendidos entre 10^{-1} y 10^{-4} , la diferencia entre los valores de SNR correspondientes a cada algoritmo de detección no es mayor a 4.2 dB.

Se confirma que el sistema MIMO-OFDM cuando emplea el algoritmo ZF requiere un valor más alto de SNR que cuando implementa MMSE, para alcanzar un mismo valor de BER, es decir, se tiene un incremento de energía cuando se utiliza el algoritmo ZF, mientras que con MMSE se logra un ahorro de energía.

4.2.2 Escenario 2

El desempeño en términos de la BER del sistema MIMO-OFDM cuando emplea dos antenas en transmisión y recepción y modulación 64-QAM se presenta en la figura 4.2.

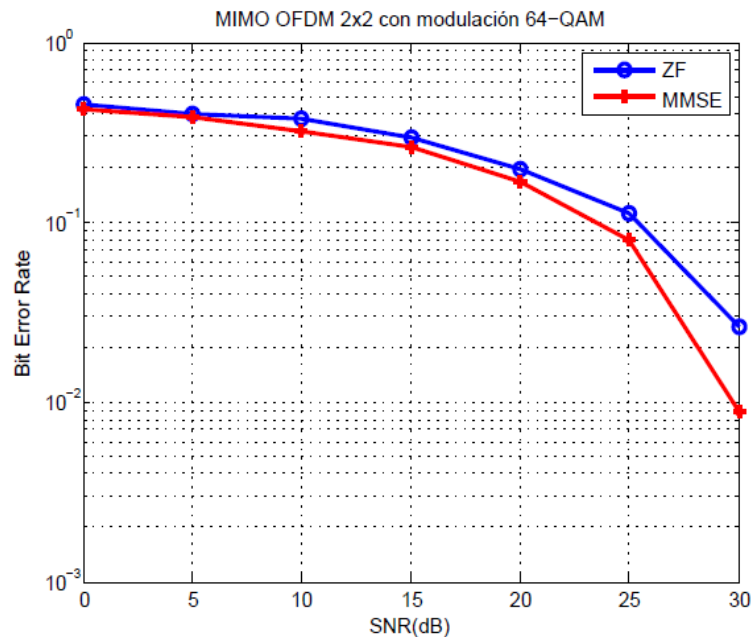


Figura 4.2 Tasa de Error de Bit del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 64-QAM y Arreglo de Antenas 2x2



Las curvas de desempeño del sistema cuando emplea los algoritmos de detección ZF y MMSE reflejan un comportamiento similar hasta una SNR de 5 dB. Para alcanzar una BER de 10^{-1} el sistema con el algoritmo MMSE requiere una SNR de 23.2 dB mientras que cuando utiliza ZF necesita aproximadamente una SNR mayor en 2 dB para alcanzar ese mismo valor de BER. Además se observa que el sistema MIMO-OFDM con algoritmo MMSE presenta un mejor desempeño ya que alcanza una BER de 10^{-2} entre el rango de 0 dB y 30 dB de SNR, mientras que el sistema con algoritmo ZF no logra este valor. La diferencia máxima de SNR entre los algoritmos de detección ZF y MMSE es de 2.5 dB, y se presenta cuando ambos alcanzan una BER de $3 \cdot 10^{-2}$.

La figura 4.3 presenta la comparación del desempeño en términos de la BER de los sistemas de los escenarios 1 y 2 cuando emplean el algoritmo de detección MMSE.

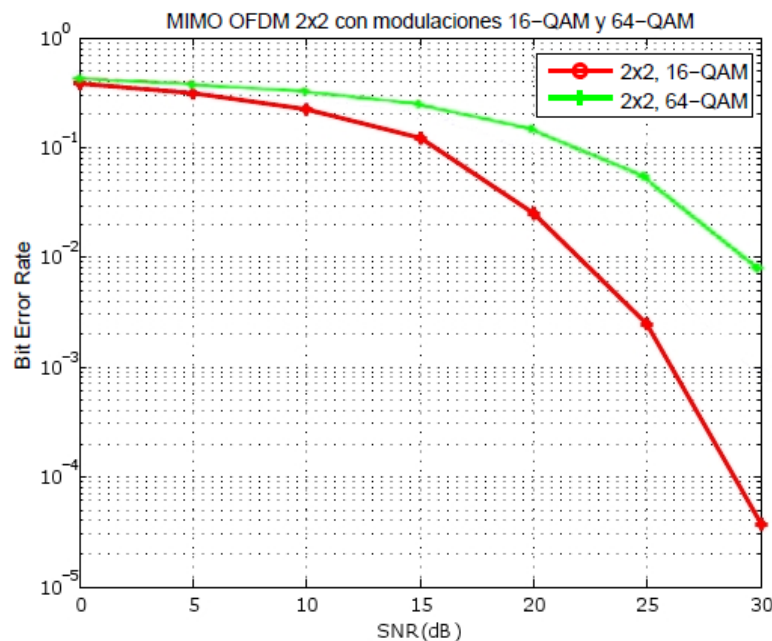


Figura 4.3 Comparación de la BER entre los escenarios 1 y 2 con Algoritmo de Detección MMSE

Las curvas de color rojo y verde muestran el desempeño de los sistemas MIMO-OFDM 2x2 con 16-QAM y MIMO-OFDM 2x2 con 64-QAM respectivamente. Se observa que el sistema MIMO-OFDM 2x2 con 64-QAM tiene un peor desempeño frente al sistema MIMO-OFDM 2x2 con 16-QAM, ya que la BER es mayor en el mismo rango de valores de SNR, lo cual se debe a la modulación utilizada en este escenario. 64-QAM tiene un mayor número de símbolos que 16-QAM, los cuales



presentan una menor distancia entre ellos, por lo tanto se requiere valores mayores de SNR para la detección de los símbolos respecto a los valores requeridos por el sistema MIMO-OFDM 2x2 con 16-QAM.

4.2.3 Escenario 3

En la figura 4.4 se muestra el desempeño en términos de la BER del sistema MIMO-OFDM con arreglo de antenas 4x4 y modulación 16-QAM.

Se observa que las curvas de desempeño del sistema con algoritmos de detección ZF y MMSE se diferencian en sus valores desde una SNR de 0 dB y a medida que la SNR aumenta las curvas difieren en mayor medida.

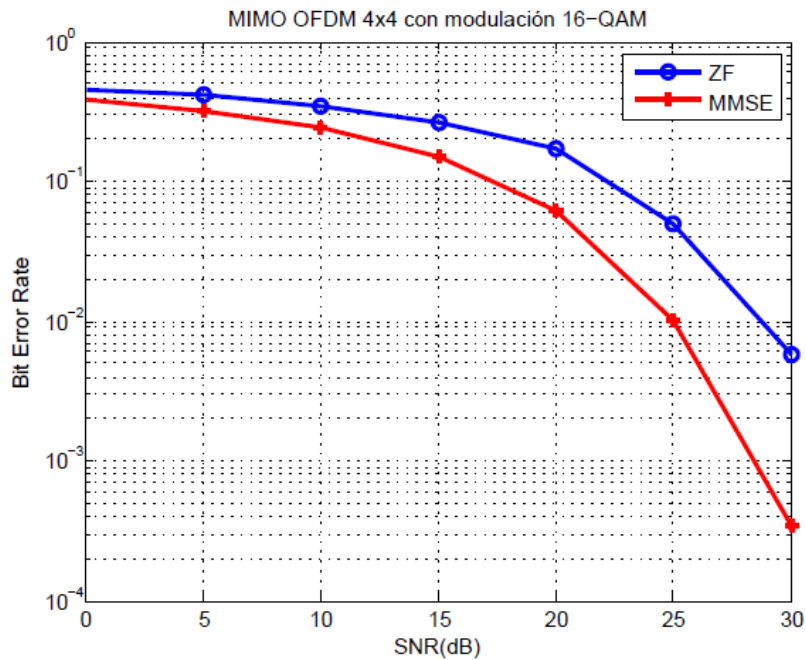


Figura 4.4 Tasa de Error de Bit del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 16-QAM y Arreglo de Antenas 4x4

Al comparar las figuras 4.1 y 4.4 se evidencia que al aumentar el número de antenas, el desempeño del sistema se afecta ya que en el escenario 3 se alcanzan valores mayores de BER con cada algoritmo de detección para un determinado valor de SNR. Lo anterior se evidencia en la tabla 4.3.



BER para los Escenarios 1 y 3							
SNR (dB)		5	10	15	20	25	30
Escenario							
1	ZF	$3.5 * 10^{-1}$	$2.8 * 10^{-1}$	$2 * 10^{-1}$	$8.5 * 10^{-2}$	$9.1 * 10^{-3}$	$7.9 * 10^{-4}$
	MMSE	$3 * 10^{-1}$	$2 * 10^{-1}$	$1.2 * 10^{-1}$	$2.5 * 10^{-2}$	$2.5 * 10^{-3}$	$3.7 * 10^{-5}$
3	ZF	$4.2 * 10^{-1}$	$3.5 * 10^{-1}$	$2.7 * 10^{-1}$	$1.9 * 10^{-1}$	$5 * 10^{-2}$	$5.6 * 10^{-3}$
	MMSE	$3.1 * 10^{-1}$	$2.4 * 10^{-1}$	$1.6 * 10^{-1}$	$6.1 * 10^{-2}$	$1 * 10^{-2}$	$3.5 * 10^{-4}$

Tabla 4.3 Valores de BER para los Escenarios 1 y 3

Para una SNR de 25 dB, cuando se emplea MMSE en el sistema del escenario 3, se alcanza una BER de $1 * 10^{-2}$, mientras que cuando se utiliza el mismo algoritmo de detección en el escenario 1, se logra una BER menor en $9.5 * 10^{-3}$. De igual manera, cuando se utiliza el algoritmo de detección ZF en los escenarios 1 y 3, se alcanzan valores de BER de $9.1 * 10^{-3}$ y $5 * 10^{-2}$ respectivamente.

En la tabla 4.4 se presentan los valores de SNR requeridos por el sistema MIMO-OFDM del escenario 3 para alcanzar los valores de BER de 10^{-1} , 10^{-2} y 10^{-3} . Se observa que existe una diferencia máxima de SNR de 5 dB entre los dos algoritmos de detección, de tal forma que el sistema cuando emplea MMSE tiene mejor desempeño en términos de la BER que cuando emplea ZF.

BER	SNR(dB)	
	ZF	MMSE
10^{-1}	22.5	17.5
10^{-2}	28.1	25
10^{-3}	-	28.2

Tabla 4.4 Valores de SNR Requeridos para Determinados Valores de BER

En la figura 4.5 se presenta la comparación de las curvas de la BER obtenidas en los escenarios 1 y 3, los cuales implementan los sistemas MIMO-OFDM 2x2 con 16-QAM y MIMO-OFDM 4x4 con 16-QAM respectivamente.

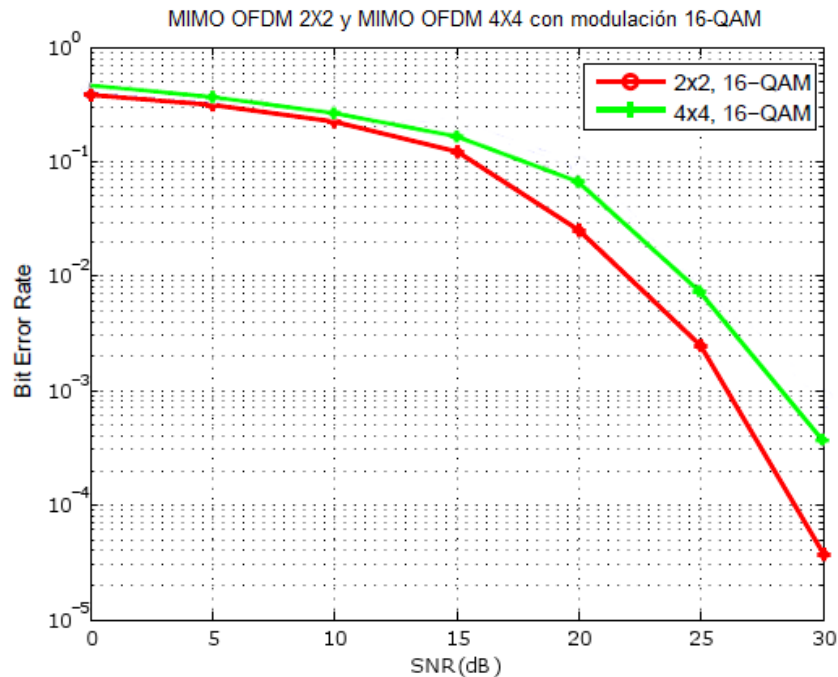


Figura 4.5 Comparación de la BER entre los sistemas MIMO-OFDM 2x2 y MIMO-OFDM 4x4 cuando emplean la Modulación 16-QAM

Las curvas de color rojo y verde confirman que un sistema MIMO-OFDM 4x4 con modulación 16-QAM requiere valores mayores de SNR en comparación con los valores de SNR requeridos en un sistema MIMO-OFDM 2x2 que emplea la misma modulación. Esto ocurre porque al aumentar el número de antenas en transmisión y recepción de dos a cuatro, se incrementan las señales interferentes que llegan a cada antena de recepción, ocasionando un aumento en la BER.

4.2.4 Escenario 4

En la figura 4.6 se presenta el desempeño del sistema MIMO-OFDM con arreglo de antenas 4x4 y modulación 64-QAM cuando emplea los algoritmos de detección ZF y MMSE.

En este escenario se alcanzan valores de BER que están entre 10^{-1} y 10^{-2} para el rango de SNR escogido. Se confirma que el desempeño del sistema MIMO-OFDM es mejor cuando emplea el algoritmo MMSE que cuando utiliza ZF.

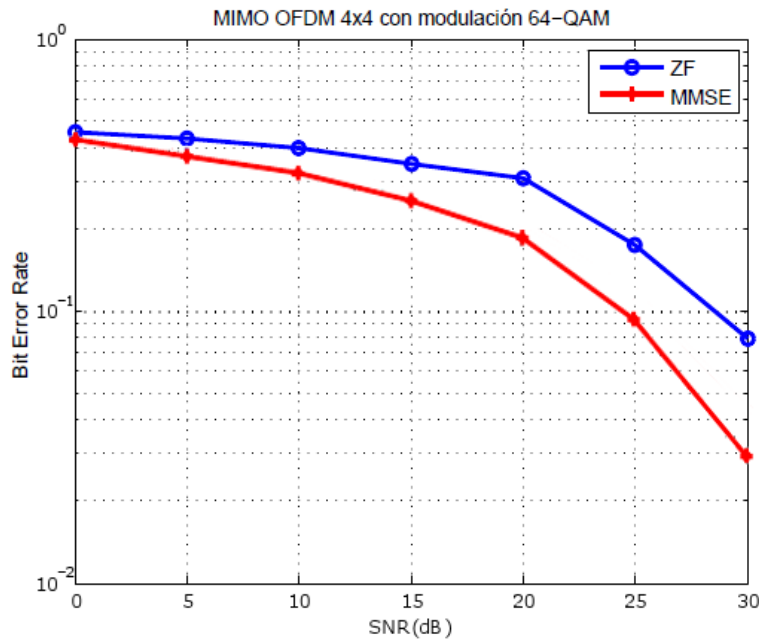


Figura 4.6 Tasa de Error de Bit del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 64-QAM y Arreglo de Antenas 4x4

La figura 4.7 presenta la comparación del desempeño del sistema MIMO-OFDM en términos de la BER entre los escenarios 3 y 4, los cuales utilizan las modulaciones 16-QAM y 64-QAM respectivamente.

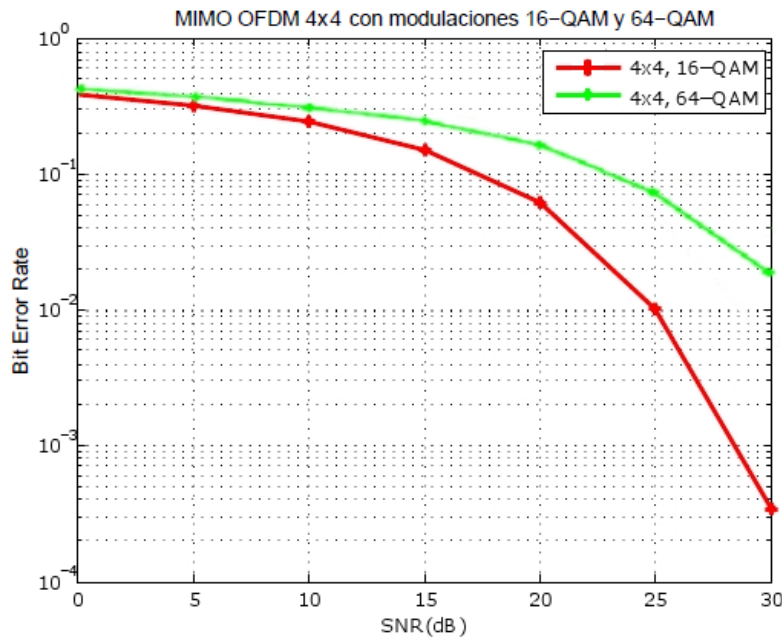


Figura 4.7 Comparación de la BER entre los sistemas MIMO-OFDM 4x4 con 16-QAM y MIMO-OFDM 4x4 CON 64-QAM



Al comparar las curvas de desempeño de color rojo y verde, se confirma que el desempeño en el escenario 4, el cual implementa un sistema MIMO-OFDM 4x4 con modulación 64-QAM es peor debido a que el orden de la modulación empleada es mayor.

En la tabla 4.5 se muestran los valores de BER para una SNR de 30 dB, cuando se emplean los algoritmos de detección ZF y MMSE en los cuatro escenarios.

BER para una SNR de 30 dB		
Escenario	ZF	MMSE
1	$8.1 * 10^{-4}$	$3.6 * 10^{-5}$
2	$2.7 * 10^{-2}$	$8.8 * 10^{-3}$
3	$5.4 * 10^{-3}$	$3.5 * 10^{-4}$
4	$8 * 10^{-2}$	$1.9 * 10^{-2}$

Tabla 4.5 Valores de BER para una SNR de 30 dB

En comparación con los resultados de los escenarios 1, 2 y 3, en este escenario se obtiene una BER mayor con ZF y MMSE, por lo tanto el escenario 4 es el que presenta el peor desempeño en términos de la BER. Por otra parte se demuestra que el sistema del escenario 1 cuando emplea el algoritmo de detección MMSE tiene el mejor desempeño ya que el sistema MIMO-OFDM 2x2 con modulación 16-QAM alcanza una BER de $3.6 * 10^{-5}$, el cual es menor con respecto a los valores de BER obtenidos en los demás escenarios.

4.3 ANÁLISIS DEL THROUGHPUT DEL SISTEMA MIMO-OFDM

En esta sección se analiza el *throughput* del sistema MIMO-OFDM para los cuatro escenarios. Para tener mayor claridad se define el *throughput* como la tasa efectiva, es decir la cantidad de información que se transmite sin errores.

La expresión matemática utilizada para calcular el *throughput* en la simulación está dada en la ecuación 4.5.

$$Th = R_{max} * (1 - BLER) \quad (4.5)$$

Donde R_{max} representa el valor teórico de la tasa máxima de transmisión de datos, dada en la ecuación 4.6, la cual depende del número de portadoras N_c , del número de antenas en transmisión N_t y del periodo de bit T_b .

$$R_{max} = N_c * N_t * (1/T_b) \quad (4.6)$$



Y *BLER* representa la Tasa de Error de Bloques (*BLER*, *Block Error Rate*), es decir, indica el número de bloques de información errados que llegan al receptor. Teniendo en cuenta que la *BER* se define como la probabilidad de obtener un bit erróneo, la probabilidad de obtener un bit correcto es $(1 - BER)$. Por lo tanto si un bloque contiene n bits, la probabilidad de obtener todos los bits de un bloque correctos es $(1 - BER)^n$ y la probabilidad de obtener un bloque erróneo está dado por la ecuación 4.7 [27].

$$BLER = 1 - (1 - BER)^n \quad (4.7)$$

Al despejar de la ecuación 4.3 se obtiene un periodo de bit $T_b = 15.12 \mu s$ para los escenarios 1 y 3, los cuales emplean la modulación 16-QAM y para los escenarios 2 y 4 que utilizan la modulación 64-QAM se obtiene un $T_b = 10.08 \mu s$. Estos valores se utilizan para el análisis de esta sección.

4.3.1 Escenario 1

En la figura 4.8 se presenta la curva de *throughput* del sistema MIMO-OFDM cuando emplea un arreglo de antenas 2x2 y algoritmos de detección ZF y MMSE.

Se observa que en los valores de SNR comprendidos entre 0 dB y 20 dB, el *throughput* incrementa con ZF y MMSE, a partir de ese valor el *throughput* obtenido con cada algoritmo no presenta una variación considerable, porque en valores altos de SNR la *BLER* es mínima, de esta manera el *throughput* se aproxima al valor teórico de la tasa máxima de transmisión de datos.

Para una SNR de 0 dB la *BLER* dada en la ecuación 4.7 alcanza un valor de 0.97, y el valor teórico de la tasa máxima de transmisión de datos es 119.04 Mbps, al reemplazar estos valores en la ecuación 4.5 se obtiene un *throughput* de 3.35 Mbps, el cual está distante del valor teórico de la tasa máxima de transmisión de datos porque para valores bajos de SNR la *BLER* es alta y por consiguiente el *throughput* es bajo.

Entre los valores de SNR de 0 dB a 35 dB, el desempeño en términos del *throughput* con el algoritmo de detección ZF es peor que el desempeño del *throughput* obtenido con MMSE, es decir, se alcanza un valor menor de *throughput* con ZF que con MMSE. Esto se debe a que el algoritmo ZF presenta un peor desempeño en términos de la *BER*, lo cual implica que se transmite una



menor cantidad de información efectiva. Por lo tanto se escoge el algoritmo de detección MMSE para realizar el análisis del *throughput* en los escenarios 2, 3 y 4.

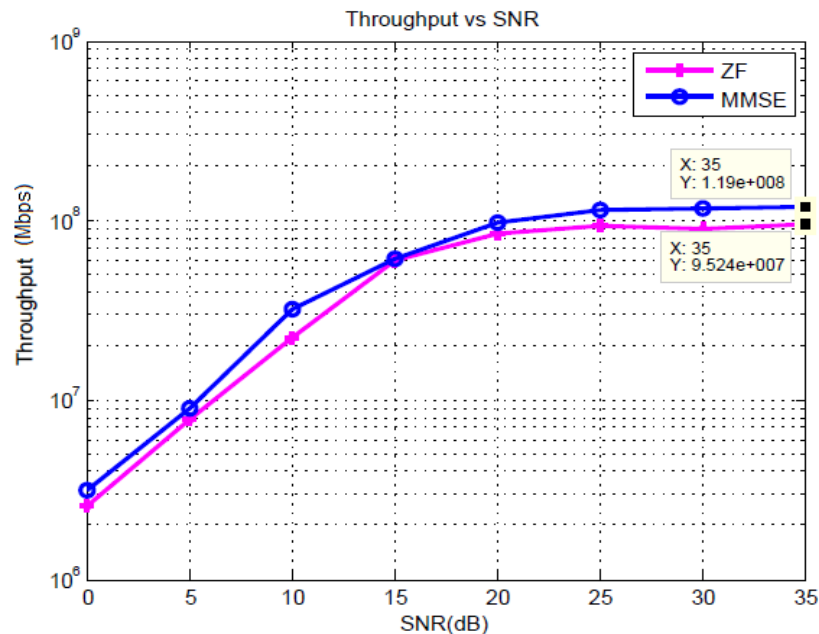


Figura 4.8 *Throughput* del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 16-QAM, Arreglo de Antenas 2x2 y Algoritmos de Detección ZF y MMSE

Los valores del *throughput* obtenidos en la simulación para valores de SNR se muestran en la tabla 4.6.

SNR (dB)	<i>Throughput</i> con ZF (Mbps)	<i>Throughput</i> con MMSE (Mbps)
0	2.5	3.2
5	7.6	9.1
10	22	33
15	60	60
20	83.2	99
25	94.8	115
30	94.9	118.1
35	95.24	119

Tabla 4.6 Valores del *Throughput* obtenidos en la Simulación para Valores de SNR en el Escenario 1



En la tabla 4.6 se confirma que el desempeño en términos del *throughput* es mejor con el algoritmo MMSE, porque se obtienen valores más altos en comparación a los que se obtienen con ZF. Entre los algoritmos se tiene una diferencia máxima de *throughput* de 23.76 Mbps y el valor obtenido de *throughput* con MMSE para una SNR de 35 dB se aproxima a 119.04 Mbps, el cual representa el valor teórico de la tasa máxima de transmisión de datos.

4.3.2 Escenario 2

La figura 4.9 muestra la curva del *throughput* cuando el sistema MIMO-OFDM emplea dos antenas en el transmisor y en el receptor, con modulación 64-QAM y algoritmo de detección MMSE. Se observa que el *throughput* presenta un valor de 175.5 Mbps en valores altos de SNR, el cual es aproximadamente 1.5 veces mayor al obtenido en el escenario 1 cuando se utiliza MMSE. Esto se debe a un factor de relación que existe entre las modulaciones 16-QAM y 64-QAM, definido en la ecuación 4.8 [28].

$$Factor\ de\ Relacion = \frac{\# de\ bits\ por\ simbolo\ (64QAM)}{\# de\ bits\ por\ simbolo\ (16QAM)} = 1.5 \quad (4.8)$$

Para una SNR de 0 dB, la BLER tiene un valor teórico de 0.98 y el valor teórico de la tasa máxima de transmisión de datos es 178.57 Mbps, por lo tanto el *throughput* es de 3.57 Mbps, el cual está distante del valor teórico de la tasa máxima de transmisión de datos.

Se observa que a medida que aumenta la SNR, el *throughput* incrementa de una manera considerable hasta 20 dB. Para 20 dB y 35 dB de SNR, el *throughput* obtenido es de 120 Mbps y 175 Mbps respectivamente. Este último se aproxima a 178.57 Mbps, el cual representa el valor teórico de la tasa máxima de transmisión de datos que se alcanza en una SNR de 35 dB.

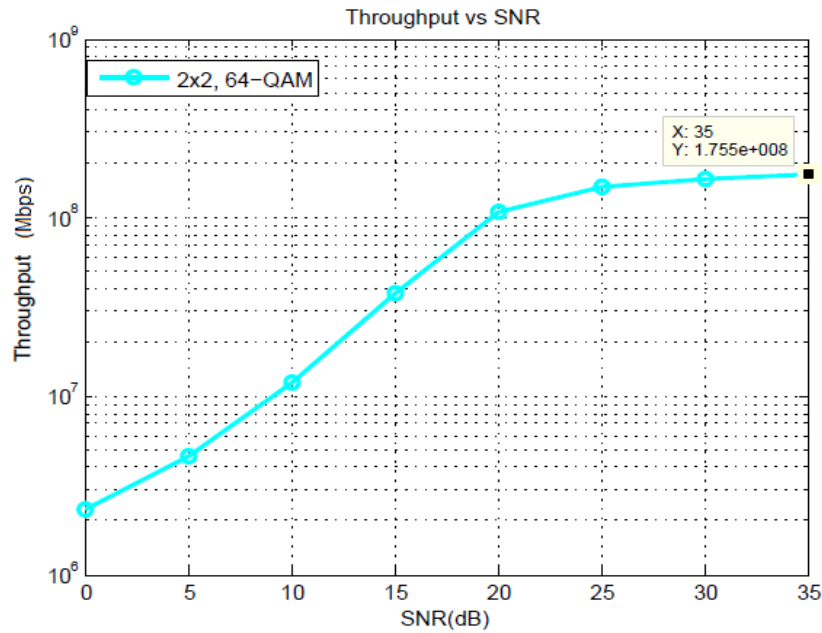


Figura 4.9 *Throughput* del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 64-QAM y Arreglo de Antenas 2x2

En la figura 4.10 se muestra la comparación del *throughput* obtenido en los escenarios 1 y 2 con las curvas de color azul oscuro y azul claro respectivamente.

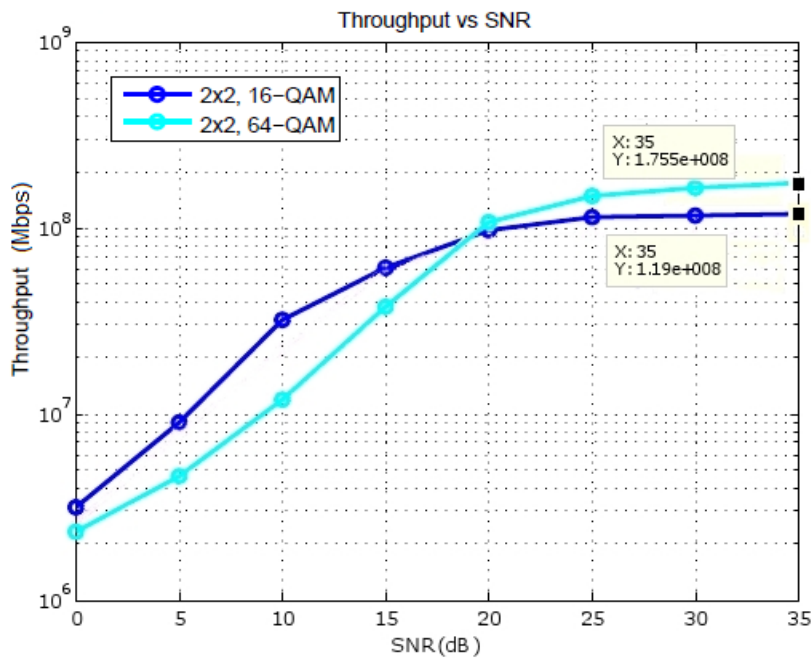


Figura 4.10 Comparación entre el *Throughput* de los escenarios 1 y 2



Al comparar el *throughput* obtenido en el sistema MIMO-OFDM 2x2 con modulación 16-QAM y MMSE del escenario 1, con el *throughput* alcanzado en el escenario 2 para una SNR de 30 dB, se observa que la modulación 64-QAM incrementa en 1.5 veces el *throughput* obtenido con 16-QAM.

Entre valores de SNR de 0 dB a 20 dB, el sistema MIMO-OFDM 2x2 con modulación 16-QAM presenta mejor desempeño en términos de *throughput* que el sistema MIMO-OFDM 2x2 con 64-QAM, porque para valores bajos de SNR, una modulación de orden menor logra valores más bajos de BER y BLER que los que se obtienen con una modulación de orden mayor, ya que en esta última los símbolos de la constelación están más cercanos entre sí y por lo tanto se presenta una mayor probabilidad de interferencia entre símbolos.

Entre valores de SNR de 20 dB a 35 dB el sistema MIMO-OFDM 2x2 con modulación 64-QAM alcanza valores más altos de *throughput* que el sistema MIMO-OFDM 2x2 cuando emplea la modulación 16-QAM, ya que para valores altos de SNR el ruido no afecta de una manera considerable los símbolos transmitidos, por consiguiente, la modulación 64-QAM permite transmitir mayor información al tener una mayor cantidad de símbolos en la constelación que la modulación 16-QAM.

4.3.3 Escenario 3

La figura 4.11 presenta la curva del *throughput* del escenario 3, donde el sistema MIMO-OFDM utiliza un arreglo de antenas 4x4 modulación 16-QAM y algoritmo de detección MMSE. Al igual que en los escenarios 1 y 2 el *throughput* se incrementa a medida que aumenta la SNR. El valor teórico de la tasa máxima de transmisión de datos para este escenario es 238.09 Mbps.

Se observa que para valores de SNR comprendidos entre 0 dB y 25 dB, la curva del *throughput* crece de una manera considerable, y entre valores de SNR de 25 dB a 35 dB, el *throughput* se mantiene aproximadamente constante. Esto se debe a que la BLER llega a su valor mínimo en valores altos de SNR.

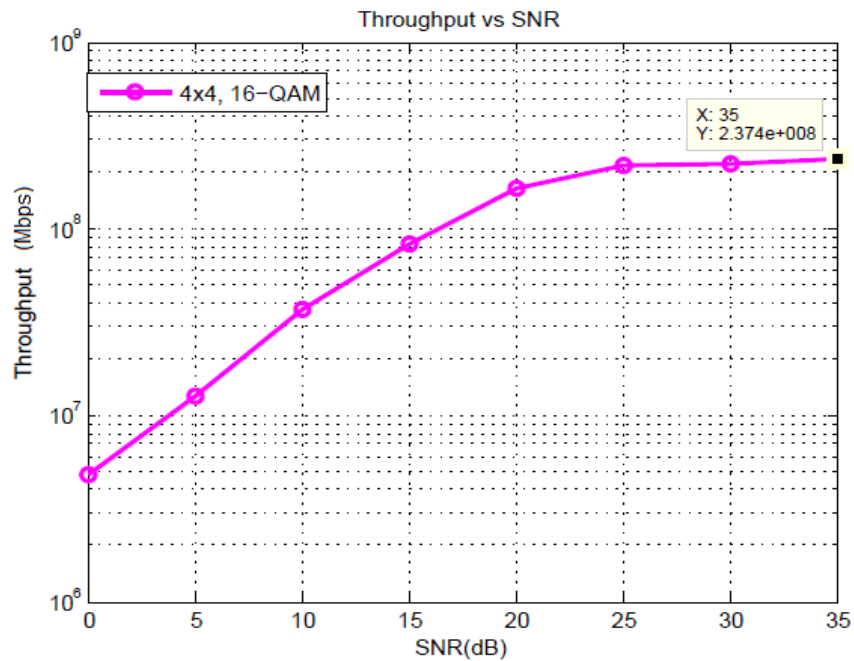


Figura 4.11 *Throughput* del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 16-QAM y Arreglo de Antenas 4x4

Los valores de *throughput* obtenidos para diferentes valores de SNR se muestran en la tabla 4.7, en la cual se obtiene un *throughput* de 13.78 Mbps y de 237.4 Mbps para una SNR de 5 dB y 35 dB respectivamente.

SNR (dB)	<i>Throughput</i> (Mbps)
5	13.78
10	37
15	95.71
20	154.1
25	229.7
30	233.9
35	237.4

Tabla 4.7 Valores del *Throughput* obtenidos en la Simulación para Valores de SNR en el Escenario 3

En la figura 4.12 se muestra las curvas del *throughput* obtenidas en los escenarios 1 y 3.

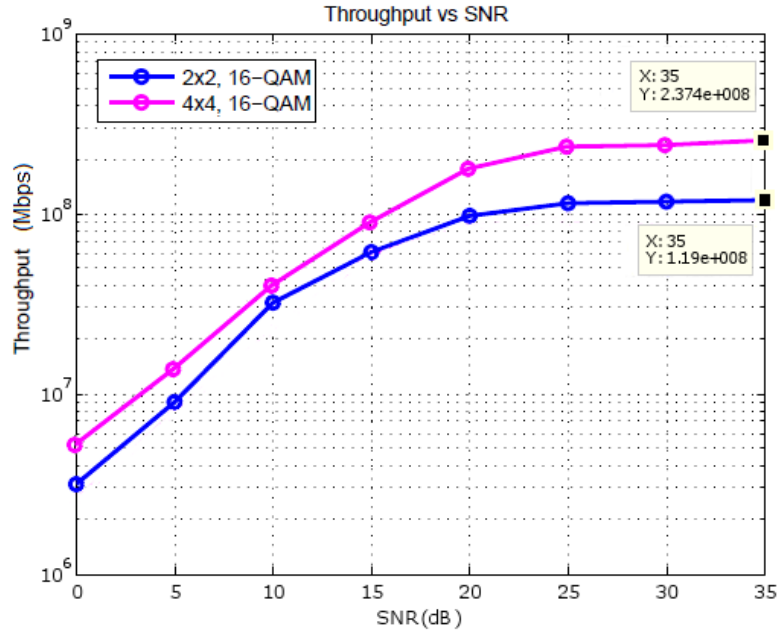


Figura 4.12 Comparación entre el *Throughput* de los escenarios 1 y 3

El valor de *throughput* del sistema MIMO-OFDM 4x4 con modulación 16-QAM para una SNR de 35 dB representa el doble del *throughput* conseguido en el sistema MIMO-OFDM 2x2 con 16-QAM del escenario 1 para el mismo valor de SNR y se aproxima al valor teórico de la tasa máxima de transmisión de datos. Esto se debe al aumento en el número de antenas en transmisión y recepción que duplica la cantidad de Información transmitida. Por lo tanto, el *throughput* incrementa conforme aumenta la cantidad de antenas en transmisión y recepción del sistema MIMO-OFDM.

4.3.4 Escenario 4

El *throughput* del sistema MIMO-OFDM con arreglo de antenas 4x4, modulación 64-QAM y algoritmo de detección MMSE se presenta en la figura 4.13.

Se aprecia que la curva de *throughput* aumenta de forma considerable en el rango de SNR comprendido entre 0 dB y 35 dB. En el valor de SNR de 35 dB el *throughput* obtenido es 355.4 Mbps que se aproxima a 357.14 Mbps, el cual representa el valor teórico de la tasa máxima de transmisión de datos. De la misma forma, se evidencia que el *throughput* conseguido en este escenario es aproximadamente el doble de 175.5 Mbps, el cual representa el *throughput* obtenido en el escenario 2. Esto confirma que el *throughput* también es



proporcional al número de antenas de transmisión y de recepción empleadas en el sistema MIMO-OFDM.

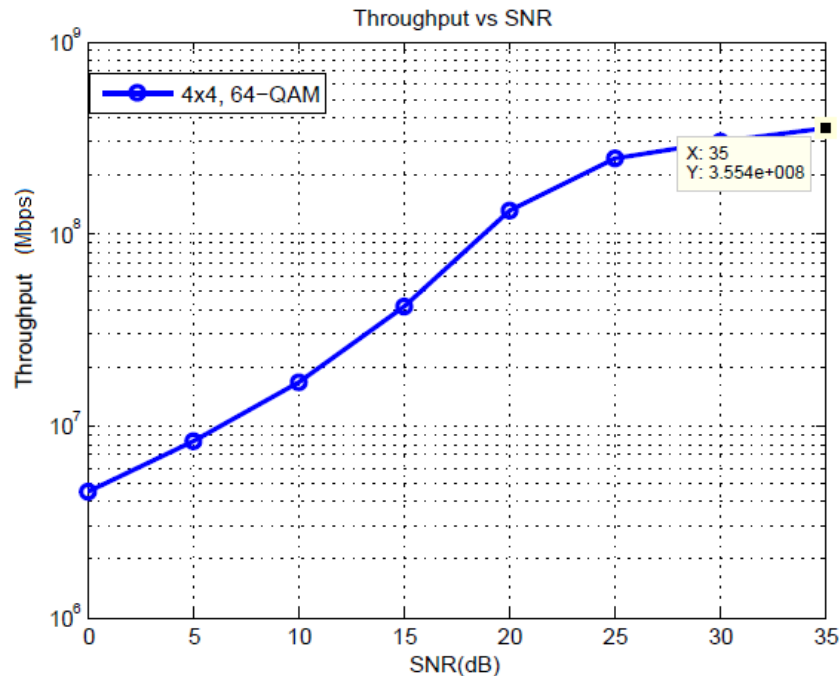


Figura 4.13 *Throughput* del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 64-QAM y Arreglo de Antenas 4x4

En la figura 4.14 se muestran las curvas del throughput obtenidas en los escenarios 3 y 4.

Al igual que en el escenario 2, se evidencia que el *throughput* alcanzado en este escenario es 1.5 veces mayor que el obtenido en el escenario 3 para valores altos de SNR, ya que se emplea la modulación 64-QAM con el mismo número de antenas en transmisión y en recepción.

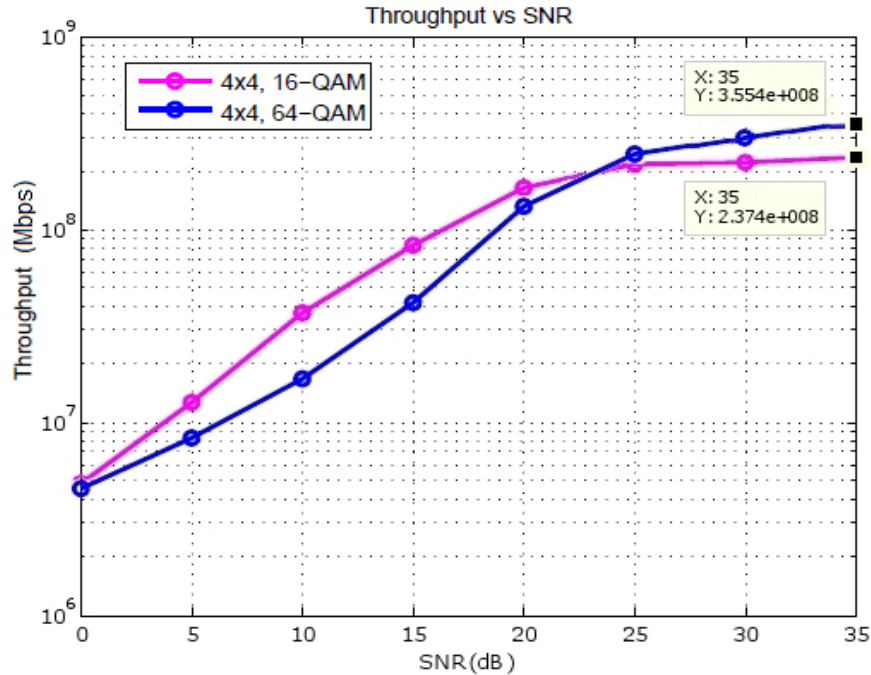


Figura 4.14 Comparación entre el *Throughput* de los escenarios 3 y 4

Al igual que la figura 4.10, las curvas de la figura 4.14 también demuestran que para valores bajos de SNR el sistema MIMO-OFDM que emplea 16-QAM presenta mejor desempeño en términos de *throughput* que cuando utiliza la modulación 64-QAM. De la misma forma se evidencia que para valores altos de SNR el sistema MIMO-OFDM con modulación 64-QAM consigue un *throughput* más alto que el sistema MIMO-OFDM que emplea 16-QAM.

En la tabla 4.8 se presentan los valores teóricos de la tasa máxima de transmisión de datos y los valores de *throughput* obtenidos en la simulación para una SNR de 35 dB. En cada escenario se observa que el *throughput* conseguido es muy similar al valor teórico de la tasa máxima de transmisión de datos, ya que para valores altos de SNR el *throughput* se aproxima a este valor.

Escenarios	Tasa máxima de transmisión de datos (Mbps)	<i>Throughput</i> práctico (Mbps)
1	119.04	119
2	178.57	175.5
3	238.09	237.4
4	357.14	355.4

Tabla 4.8 Valores Teóricos de la Tasa Máxima de Transmisión de Datos y Valores Prácticos con Algoritmo de Detección MMSE para una SNR de 35 dB



Teniendo en cuenta los resultados que se obtienen en la simulación y que se muestran en las figuras 4.10 y 4.14, el *throughput* alcanza valores más altos en los sistemas MIMO-OFDM 4x4 con modulación 16-QAM y MIMO-OFDM 4x4 con modulación 64-QAM, siendo los más adecuados para transmitir con altas tasas de bit cuando se tienen valores bajos y altos de SNR respectivamente. Por otro lado, el escenario 1 donde se implementa un sistema MIMO-OFDM con arreglo de antenas 2x2, modulación 16-QAM y algoritmo de detección ZF es el que presenta el peor desempeño en términos del *throughput*, consiguiendo un valor de 95.24 Mbps en una SNR de 35 dB.

En la figura 4.15 se muestran las curvas de la BLER obtenidas en los escenarios 1, 2, 3 y 4, se observa que todas presentan el mismo comportamiento que las curvas de la BER, es decir, a medida que aumenta la SNR la BLER disminuye.

En el sistema MIMO-OFDM 4x4 con modulación 64-QAM se obtienen los valores más altos de BLER en comparación a los valores obtenidos en los sistemas de los escenarios 1, 2 y 3 representados por las curvas de color magenta, azul claro y verde respectivamente.

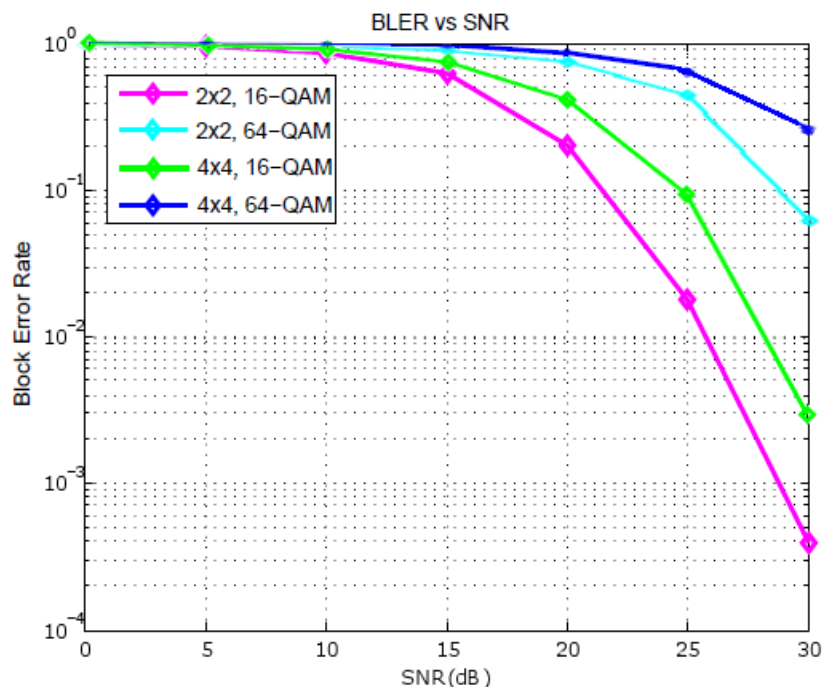


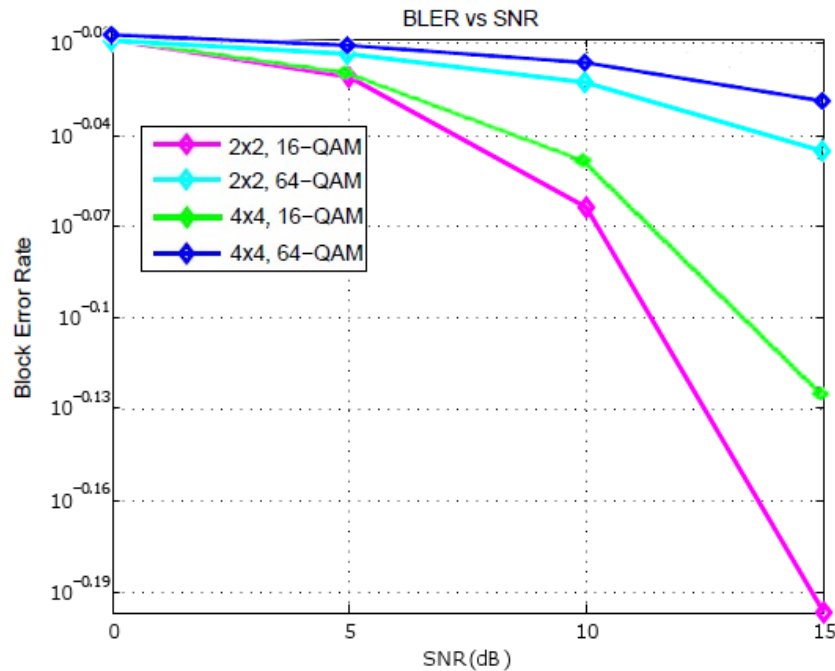
Figura 4.15 Tasa de Error de Bloque para los Escenarios 1, 2, 3 y 4

Teniendo en cuenta la ecuación 4.6, la tasa máxima de transmisión de datos se incrementa conforme aumenta el orden de la modulación y el número de antenas



en transmisión y recepción, por consiguiente, el sistema MIMO-OFDM 4x4 que emplea la modulación 64-QAM presenta el valor teórico más alto de la tasa máxima de transmisión de datos en comparación a los valores que tienen los sistemas de los escenarios 1, 2 y 3. Tomando la ecuación 4.5, el factor $(1 - \text{BLER})$ tiende a un valor bajo en el escenario 4 porque la BLER es alta, sin embargo como el valor de R_{max} es el más alto, el escenario 4 es el que presenta el mejor desempeño en términos del *throughput* para una SNR de 35 dB.

En la figura 4.16 se muestra una ampliación de la figura 4.15 para el rango de SNR entre 0 dB 15 dB. Se observa que para valores bajos de SNR, las curvas de BLER presentan el mismo comportamiento que para valores altos de SNR, es decir, a medida que se aumenta el orden de modulación y el número de antenas en transmisión y recepción, el desempeño en términos de la BLER es peor.



4.4 ANÁLISIS DEL ANCHO DE BANDA DEL SISTEMA MIMO-OFDM

El ancho de banda teórico BW de la señal OFDM depende del número de portadoras N_c y de la separación entre ellas Δf como se muestra en la ecuación 4.9.

$$BW = N_c * \Delta f \quad (4.9)$$



Debido a que el ancho de banda de la señal no depende de los algoritmos de detección ZF y MMSE, no se consideran para realizar este análisis.

El estudio de esta sección se realiza de cuatro formas Primero se fija el mismo periodo de bit $T_b = 15.12 \mu s$ para los cuatro escenarios, es decir que se transmite la misma cantidad de información con el fin de encontrar el ancho de banda requerido cuando se varía el orden de modulación. Después se varía la duración de los bits T_b , es decir que se varía la cantidad de información enviada, con el objetivo de analizar el ancho de banda cuando se emplea la misma modulación. Luego se varía el número de portadoras y por último se varía el número de puntos en la IFFT/FFT.

4.4.1 Espectro de la Señal OFDM con igual Periodo de Bit y Diferente Modulación

En la figuras 4.16 y 4.17 se presentan los espectros de la señal OFDM con 900 portadoras para los cuatro escenarios de simulación, se observa que cada espectro tiene una forma de meseta debido a la contribución de todos los lóbulos principales de las portadoras. Cuando termina la zona de los lóbulos principales, es decir cuando termina el ancho de banda de la señal, se observa que el espectro decae lentamente en frecuencia debido a la contribución de los lóbulos secundarios de las portadoras.

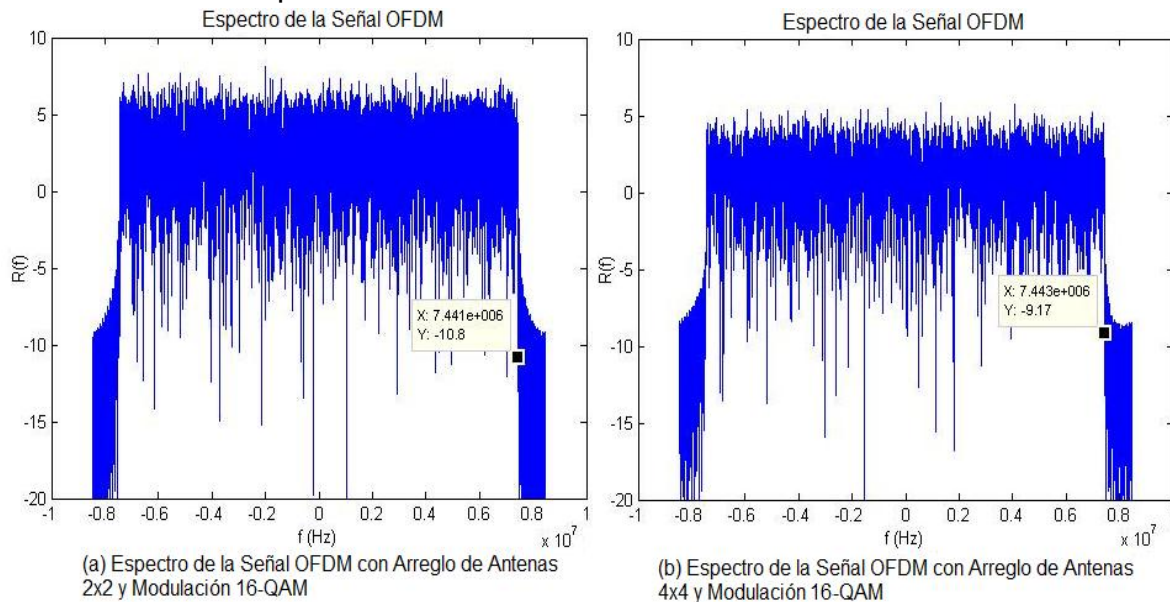


Figura 4.16 Espectros de la Señal OFDM para los Escenarios 1 y 3

La figura 4.16 (a) muestra el espectro de la señal para el sistema MIMO-OFDM 2x2, y la figura 4.16 (b) presenta el espectro de la señal para el sistema MIMO-



OFDM 4x4, ambos emplean la modulación 16-QAM. El ancho de banda teórico de las señales de los sistemas MIMO-OFDM 2x2 y MIMO-OFDM 4x4 es 14.88 MHz.

Se observa que el ancho de banda práctico de la señal OFDM en los dos sistemas es 14.87 MHz, el cual es próximo al valor teórico, es decir, el ancho de banda se mantiene constante cuando se emplea la misma modulación independientemente del número de antenas en transmisión y recepción, ya que la separación entre portadoras Δf y el número de portadoras N_c son iguales en los dos sistemas. Esto demuestra que la tecnología MIMO no requiere una extensión de ancho de banda adicional cuando incrementa la velocidad de transmisión de los datos.

Las figuras 4.17 (a) y 4.17 (b) muestran el espectro de la señal de los sistemas MIMO-OFDM 2x2 y MIMO-OFDM 4x4 respectivamente, cuando emplean la modulación 64-QAM. El ancho de banda teórico de la señal para los dos sistemas es 9.92 MHz.

Se observa que el ancho de banda obtenido en la simulación para el sistema MIMO-OFDM 2x2 es 9.93 MHz y el obtenido para el sistema MIMO-OFDM 4x4 es 9.91 MHz. Estos valores se aproximan al valor teórico y son menores al valor del ancho de banda obtenido con la modulación 16-QAM.

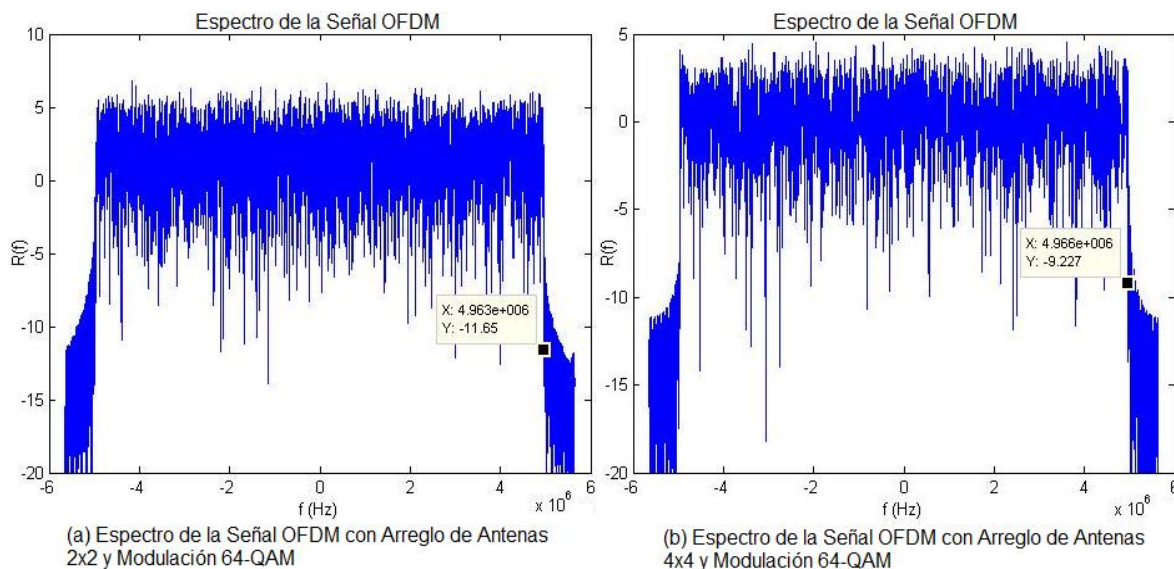


Figura 4.17 Espectros de la Señal OFDM para los Escenarios 2 y 4

Matemáticamente, como T_b se mantiene constante, el periodo del símbolo modulado T dado en la ecuación 4.3 varía en función de la modulación utilizada, es decir, cuando se emplea la modulación 64-QAM, T aumenta porque cada símbolo está conformado por 6 bits en contraste a los 4 bits que conforman el



símbolo 16-QAM, por lo tanto Δf disminuye y en consecuencia el ancho de banda también lo hace.

Es decir que el ancho de banda requerido en los sistemas MIMO-OFDM 2X2 y 4X4 que emplean la modulación 64-QAM es menor que el requerido en los sistemas MIMO-OFDM 2X2 y 4X4 cuando utilizan 16-QAM.

Esto demuestra que con la modulación 64-QAM es posible transmitir la misma cantidad de información sobre un ancho de banda menor, en comparación al ancho de banda requerido en la modulación 16-QAM. Además, las figuras 4.17 (a) y 4.17 (b) confirman que el ancho de banda se mantiene constante cuando se emplea la misma modulación y se varía el número de antenas en transmisión y recepción.

En la tabla 4.9 se muestran los valores teóricos de ancho de banda y los valores prácticos.

Escenarios	Ancho de Banda teórico (MHz)	Ancho de Banda práctico (MHz)
1	14.88	14.88
2	9.92	9.93
3	14.88	14.88
4	9.92	9.91

Tabla 4.9 Valores del Ancho de Banda teóricos y simulados con $T_b=15.12 \mu s$

Se observa que los sistemas MIMO-OFDM 2x2 y 4x4 que emplean la misma modulación requieren igual ancho de banda, como se observa en los escenarios 1 y 3 ó 2 y 4. Además, para transmitir la misma cantidad de información, el ancho de banda requerido por los sistemas MIMO-OFDM 2x2 y 4x4 que utilizan la modulación 64-QAM (escenarios 2 y 4) es aproximadamente menor en 5 MHz, en comparación con el ancho de banda que se necesita en los sistemas MIMO-OFDM 2x2 y 4x4 con 16-QAM (escenarios 1 y 3).

4.4.2 Espectro de la Señal OFDM con Diferente Periodo de Bit e igual Modulación



En esta sección se realiza el análisis del ancho de banda cuando se varía la duración del bit T_b y se emplean 900 portadoras. Como el efecto es similar en todos los escenarios, se escoge el escenario 1 para el análisis, el cual implementa un sistema MIMO-OFDM 2x2 con modulación 16-QAM. En la figura 4.18 se presentan los espectros de la señal para el escenario 1.

Las figuras 4.18 (a) y 4.18 (b) muestran los espectros de la señal con $T_b = 7.56 \mu s$ y $T_b = 30.25 \mu s$ respectivamente. Se observa que para el primer caso, el ancho de banda es 29.76 MHz, el cual representa aproximadamente el doble de 14.87 MHz. Este último es el ancho de banda obtenido para el sistema MIMO-OFDM 2x2 que emplea la modulación 16-QAM y que se aprecia en la figura 4.16 (a).

Para el segundo caso se obtiene un ancho de banda de 7.44 MHz, es decir, la mitad de 14.87 MHz.

Lo anterior se debe a la relación inversa que existe entre el periodo de bit y el ancho de banda. Si la duración del bit se disminuye, también se disminuye el periodo del símbolo T , en consecuencia la separación entre portadoras Δf se incrementa y por lo tanto se aumenta el ancho de banda de la señal. De la misma forma si se incrementa el periodo de bit, se aumenta el periodo del símbolo y se disminuye tanto la separación entre portadoras como el ancho de banda.

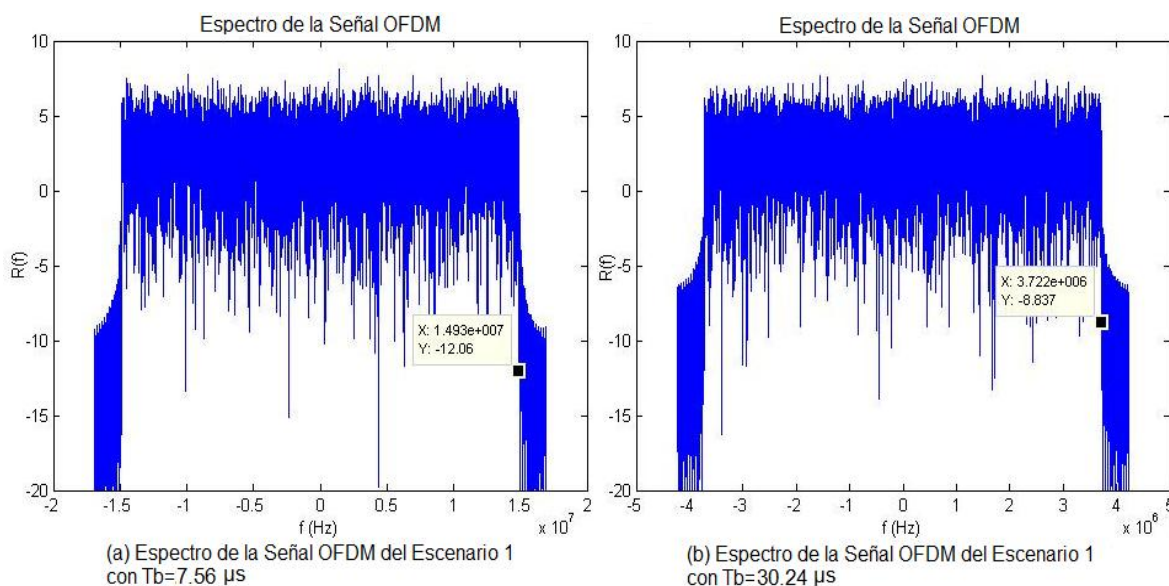


Figura 4.18 Espectros de la Señal OFDM con $T_b=7.56 \mu s$ y $T_b=30.24 \mu s$

Tomando la ecuación 4.6, si se incrementa el periodo de bit T_b disminuye la tasa máxima de transmisión de datos R_{max} , por lo tanto el segundo análisis de esta



sección demuestra que el ancho de banda es proporcional a la máxima tasa de transmisión de datos.

Los valores de la tabla 4.9 y las figuras 4.16 y 4.17 confirman que el ancho de banda de la señal en el sistema MIMO-OFDM no depende del número de antenas en transmisión y en recepción, por lo tanto MIMO no requiere recursos adicionales del espectro. De igual manera, la figura 4.18 demuestra que el periodo de bit es inversamente proporcional al ancho de banda de la señal.

4.4.3 Espectro de la Señal OFDM cuando se varía el Número de Portadoras y se mantiene constante el Número de Puntos en la IFFT/FFT

En la figura 4.19 se muestran los espectros de la señal OFDM del sistema MIMO-OFDM 2x2 con modulación 16-QAM para dos casos: en el primero se emplea un número de portadoras (N_c) menor que el número de puntos de la IFFT/FFT (N_f) y en el segundo se tiene la misma cantidad de portadoras y de puntos.

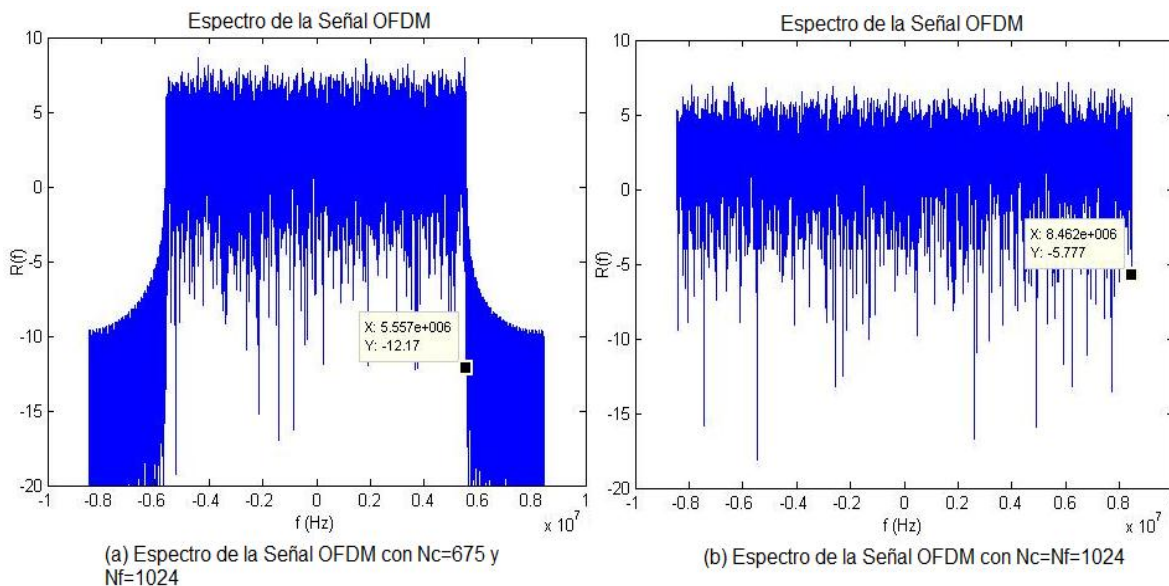


Figura 4.19 Espectros de la Señal OFDM con $N_c < N_f$ y con $N_c = N_f$

La figura 4.19 (a) presenta el espectro de la señal OFDM con $N_c=675$ y $N_f=1024$. El ancho de banda teórico es 11.2 MHz.

Se observa que el espectro conserva la forma de meseta, el cual decae en sus extremos debido a la contribución de los lóbulos secundarios mencionados anteriormente. Esto se debe a que el número de portadoras utilizadas es menor al



número de puntos de la IFFT/FFT. En este caso el ancho de banda conseguido es de 11.1 MHz, el cual es próximo al valor teórico.

La figura 4.19 (b) muestra el espectro de la señal OFDM para el segundo caso, donde el número de portadoras es igual al número de puntos. Se aprecia que el espectro de la señal no tiene forma de meseta, porque al lóbulo principal de cada portadora se le asigna un punto de la IFFT/FFT, por lo tanto no quedan puntos que representen los lóbulos secundarios.

En el segundo caso se tiene un ancho de banda de 16.92 MHz, el cual es mayor al ancho de banda obtenido en el primer caso, ya que el número de portadoras empleado es 1024. Esto demuestra que el ancho de banda de la señal OFDM aumenta conforme incrementa el número de portadoras.

4.4.4 Espectro de la Señal OFDM cuando se varía el Número de Puntos en la IFFT/FFT y se mantiene constante el Número de Portadoras

En la figura 4.20 se muestran los espectros de la señal OFDM del sistema MIMO-OFDM 2x2 con modulación 16-QAM cuando se tienen 900 portadoras y se varía el número de puntos en la IFFT/FFT.

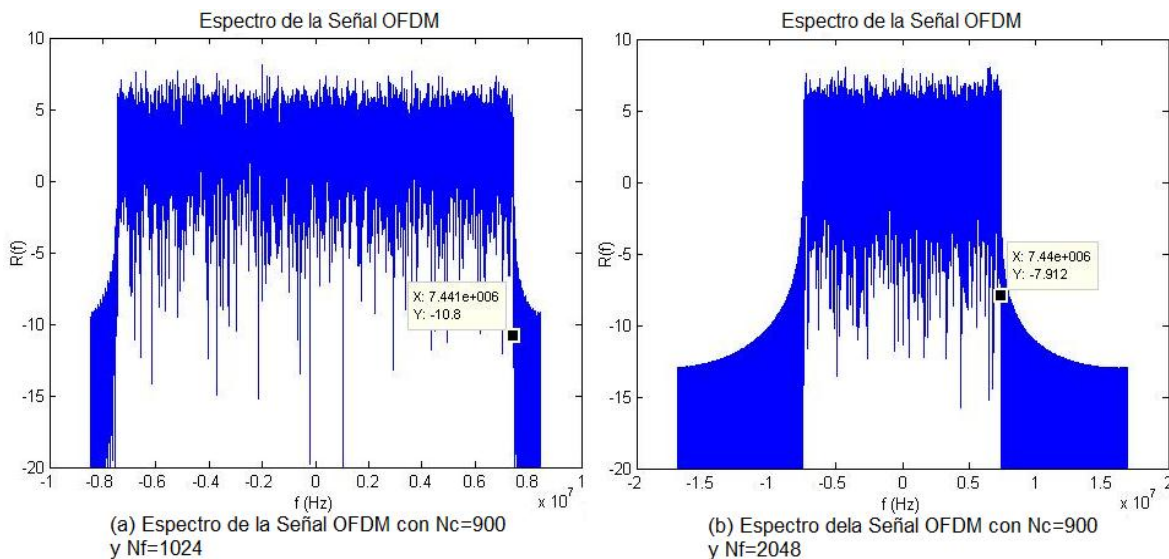


Figura 4.20 Espectros de la Señal OFDM con $N_f=1024$ y $N_f=2048$

En las figuras 4.20 (a) y 4.20 (b) se presentan los espectros de la señal cuando se emplean 1024 puntos y 2048 puntos en la IFFT/FFT respectivamente. El ancho de banda teórico para los dos casos es 14.88 MHz.



Se observa que el espectro mostrado en las figuras 4.20 (a) y 4.20 (b) conserva la forma de meseta, ya que en ambos casos el número de portadoras es menor que el número de puntos en la IFFT/FFT, sin embargo, cuando se emplean 2048 puntos, se aprecia mayor contribución de los lóbulos secundarios que cuando se utilizan 1024 puntos. Esto se debe a que sobran 1148 puntos en la IFFT/FFT para representar los lóbulos secundarios de las 900 portadoras. Es decir, con 2048 puntos, se tiene una cantidad mayor de puntos para representar los lóbulos secundarios que cuando se utilizan 1024 puntos en la IFFT/FFT.

El ancho de banda que se obtiene en la simulación para los dos casos es 14.88 MHz, el cual es similar al valor teórico. Esto demuestra que el ancho de banda de la señal OFDM no depende del número de puntos empleado en la IFFT/FFT siempre que el número de portadoras N_c sea menor que el tamaño de la IFFT/FFT N_f .

4.5 ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DEL SISTEMA MIMO-OFDM

La eficiencia espectral mide la cantidad de información que se transmite por segundo en un Hertz.

El valor teórico de la eficiencia espectral depende de la tasa de bit total R_{Total} y del ancho de banda BW , la relación de estos parámetros está dada en la ecuación 4.9 [29].

$$\eta = \frac{R_{Total}}{BW} = \frac{N_c * R_b}{N_c * \Delta f} = \frac{R_b}{\Delta f} \quad (4.9)$$

Donde R_b representa la tasa de bit, N_c el número de portadoras y Δf la separación entre ellas. Reemplazando la expresión de Δf dada en la ecuación 2.13, se obtiene la ecuación 4.10.

$$\eta = \frac{R_b}{(1/T)} \quad (4.10)$$

Ahora bien, utilizando la ecuación 4.3 que define el periodo del símbolo modulado T , se llega a la ecuación 4.11.

$$\eta = \frac{R_b}{1/(\log_2 M * T_b)} \quad (4.11)$$



Teniendo en cuenta que $R_b = 1/T_b$, la eficiencia espectral queda en términos del factor $\log_2 M$ como se muestra en la ecuación 4.12, la cual representa el número de bits por símbolo de la modulación empleada.

$$\eta = \log_2 M \quad (4.12)$$

Para la simulación se define una expresión de la eficiencia espectral que depende del *throughput* (Th) y del ancho de banda de la señal (BW), por lo tanto se mide en bits por segundo por Hertz (bps/Hz). Su fórmula está dada en la ecuación 4.13.

$$\eta = \frac{Th}{BW} \quad (4.13)$$

Para el análisis de la eficiencia, se define el mismo valor de periodo de bit $T_b = 15.12 \mu s$ en los cuatro escenarios. Por lo tanto los escenarios que tienen igual número de antenas en transmisión y recepción, tienen un mismo valor de *throughput*.

4.5.1 Escenario1

La figura 4.21 muestra la curva de la eficiencia espectral del sistema MIMO-OFDM con modulación 16-QAM y arreglo de antenas 2x2, cuando emplea los algoritmos de detección ZF y MMSE. Se observa que las curvas tienen el mismo comportamiento que las curvas del *throughput*, ya que estos parámetros son directamente proporcionales. Este comportamiento es el mismo en las curvas de los escenarios 2, 3 y 4.

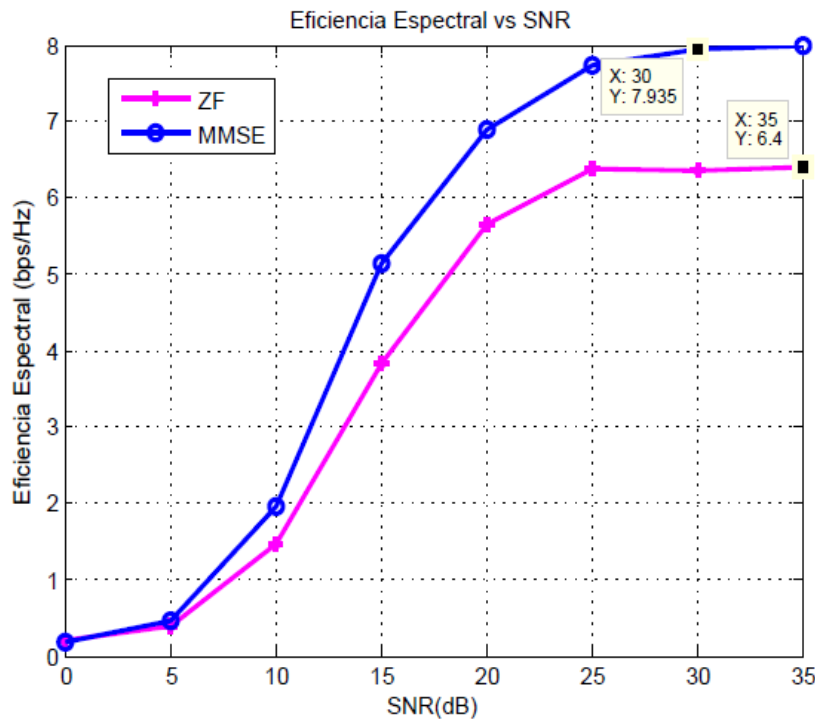


Figura 4.21 Eficiencia Espectral del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 16-QAM, Arreglo de Antenas 2x2 y Algoritmos de Detección ZF y MMSE

El valor teórico de la eficiencia espectral para el sistema MIMO-OFDM 2x2 con modulación 16-QAM es 8 bps/Hz, el cual se calcula con valores teóricos de 119.04 Mbps y 14.88 MHz para el *throughput* y el ancho de banda respectivamente.

A medida que aumenta la SNR, la eficiencia espectral incrementa, alcanzando un valor de 7.935 bps/Hz con MMSE y 6.4 Mbps/Hz con ZF para una SNR de 35 dB. Esto demuestra que el sistema MIMO-OFDM cuando emplea el algoritmo MMSE tiene mejor desempeño en términos de eficiencia espectral que cuando utiliza ZF.

Por lo tanto, al igual que en el análisis del *throughput*, se escoge el algoritmo de detección MMSE para realizar el análisis de la eficiencia espectral en los escenarios 2, 3 y 4.

Se observa que la eficiencia espectral obtenida cuando se emplea el algoritmo MMSE tiene un valor de 7.935 bps/Hz, el cual es aproximadamente igual al valor teórico.

La tabla 4.10 muestra los valores de la eficiencia espectral obtenidos en el rango de valores de SNR comprendidos entre 0 dB y 35 dB. Se observa que para una SNR de 30 dB existe una diferencia máxima de 1.8 bps/Hz entre los algoritmos de



detección, además se confirma que el desempeño de la eficiencia espectral es mejor con MMSE, porque se obtienen valores más altos en comparación a los que se obtienen con ZF.

SNR (dB)	Eficiencia Espectral con ZF (bps/Hz)	Eficiencia Espectral con MMSE (bps/Hz)
0	0.1	0.2
5	0.5	0.6
10	1.7	2.1
15	4	4
20	5.7	6.5
25	6	7.6
30	6	7.935
35	6.4	7.937

Tabla 4.10 Valores de la Eficiencia Espectral para Valores de SNR en el Escenario 1

Teniendo en cuenta que teóricamente los sistemas de comunicación que utilizan la modulación 16-QAM alcanzan una eficiencia espectral de 4 bps/Hz, en este escenario se demuestra que al emplear la tecnología MIMO con arreglo de antenas 2x2, la eficiencia espectral se duplica porque al emplear múltiples antenas en transmisión y en recepción se transmite una mayor cantidad de información simultáneamente en comparación con un sistema de Única Entrada y Única Salida (SISO, *Single Input Single Output*).

4.5.2 Escenario 2

La figura 4.22 representa la curva de eficiencia espectral del sistema MIMO-OFDM 2x2 con algoritmo de detección MMSE, donde se varía el orden de modulación respecto al escenario 1, en este caso es 64-QAM. El valor teórico de eficiencia espectral para el sistema MIMO-OFDM 2x2 con modulación 64-QAM es 12 bps/Hz, el cual se calcula con un *throughput* de 119.04 Mbps y un ancho de banda de 9.92 MHz.

Se observa que a medida que se incrementa la SNR, la eficiencia espectral aumenta de forma considerable hasta una SNR de 25 dB, entre este valor y 35 dB la curva se mantiene aproximadamente constante, porque sigue el comportamiento de la curva del *throughput*, la cual alcanza el valor de la tasa máxima de bit y permanece constante en valores altos de SNR.

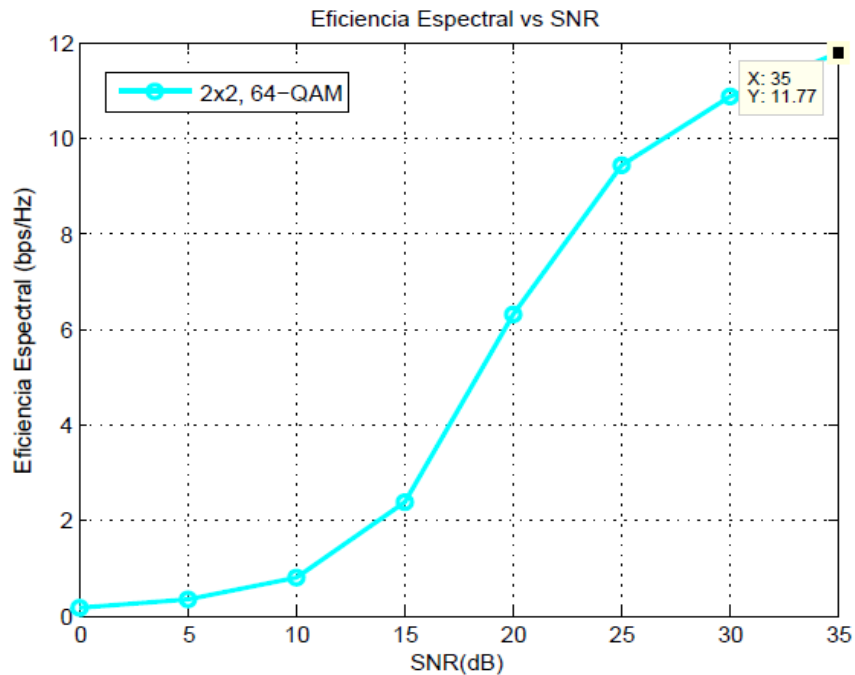


Figura 4.22 Eficiencia Espectral del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 64-QAM, Arreglo de Antenas 2x2y Algoritmo de Detección MMSE.

En este escenario se obtiene un valor de eficiencia espectral de 11.77 bps/Hz para una SNR de 35 dB, el cual se aproxima al valor teórico.

Se demuestra que al emplear la tecnología de múltiples antenas MIMO, la eficiencia espectral se duplica cuando se emplean dos antenas en transmisión y recepción, ya que teóricamente la eficiencia espectral de la modulación 64-QAM es 6 bps/Hz, es decir la mitad de la eficiencia que se obtiene en este escenario.

En la figura 4.23 se muestran las curvas de la eficiencia espectral obtenidas en los escenarios 1 y 2.

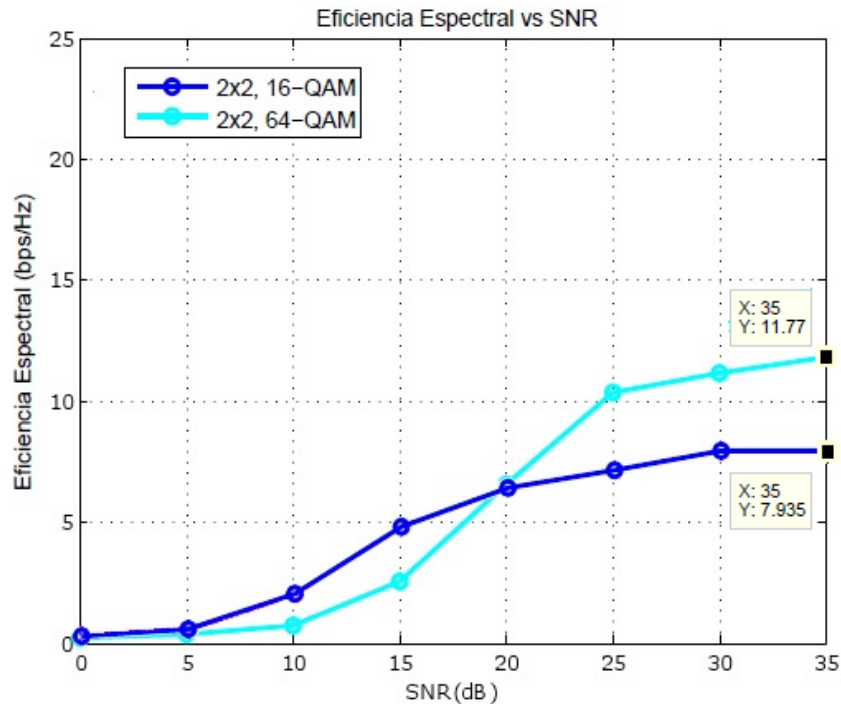


Figura 4.23 Comparación entre la Eficiencia Espectral de los Escenarios 1 y 2

Al comparar la eficiencia espectral obtenida en el sistema MIMO-OFDM 2x2 cuando emplea la modulación 64-QAM con la del sistema MIMO-OFDM 2x2 con 16-QAM cuando se utiliza MMSE, se observa que la eficiencia es mayor para valores altos de SNR ya que al implementar un orden de modulación más alto, el ancho de banda requerido para transmitir es menor. Por otra parte para valores bajos de SNR comprendidos entre 0 dB y 20 dB, el sistema MIMO-OFDM 2x2 que emplea la modulación 16-QAM logra mejor desempeño en términos de eficiencia espectral que el sistema MIMO-OFDM 2x2 con 64-QAM. Por lo tanto las curvas de eficiencia espectral siguen el mismo comportamiento que las curvas de *throughput* para valores bajos y altos de SNR.

De igual manera se demuestra que la eficiencia espectral de este escenario respecto a la del escenario 1 donde se implementa un sistema MIMO-OFDM 2x2 con 16-QAM, aumenta conforme al factor de relación de 1.5 que existe entre las dos modulaciones.

4.5.3 Escenario 3

En la figura 4.24 se muestra la curva de la eficiencia espectral del sistema MIMO-OFDM que emplea un arreglo de antenas 4x4, modulación 16-QAM y algoritmo de detección MMSE. El valor teórico de eficiencia espectral en este escenario es 16



bps/Hz, el cual se calcula con los valores de teóricos del *throughput* de 238.09 Mbps y del ancho de banda de 14.88 MHz.

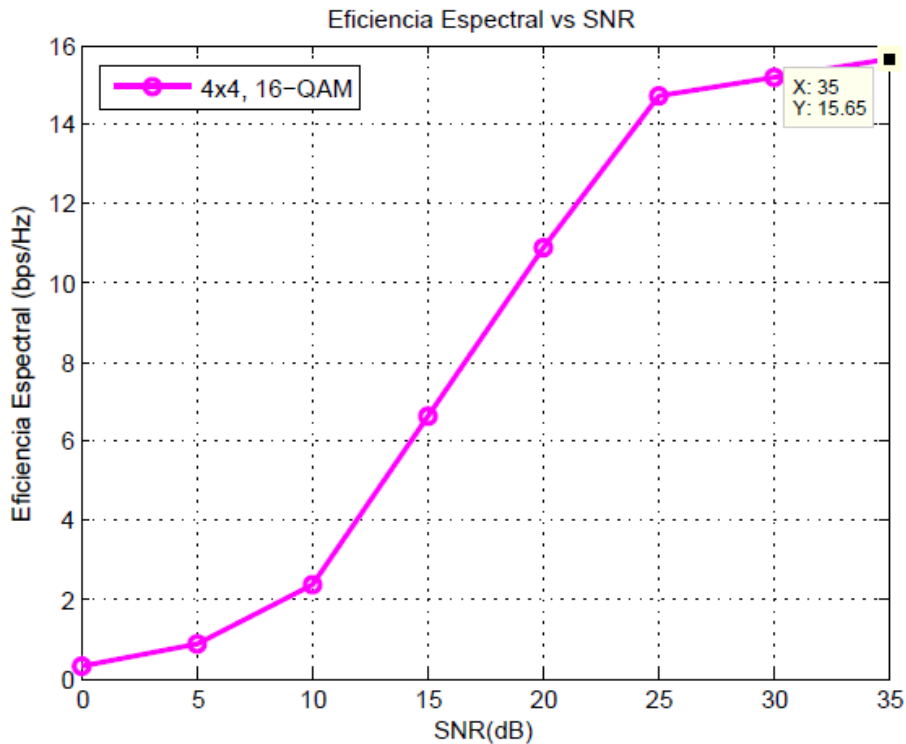
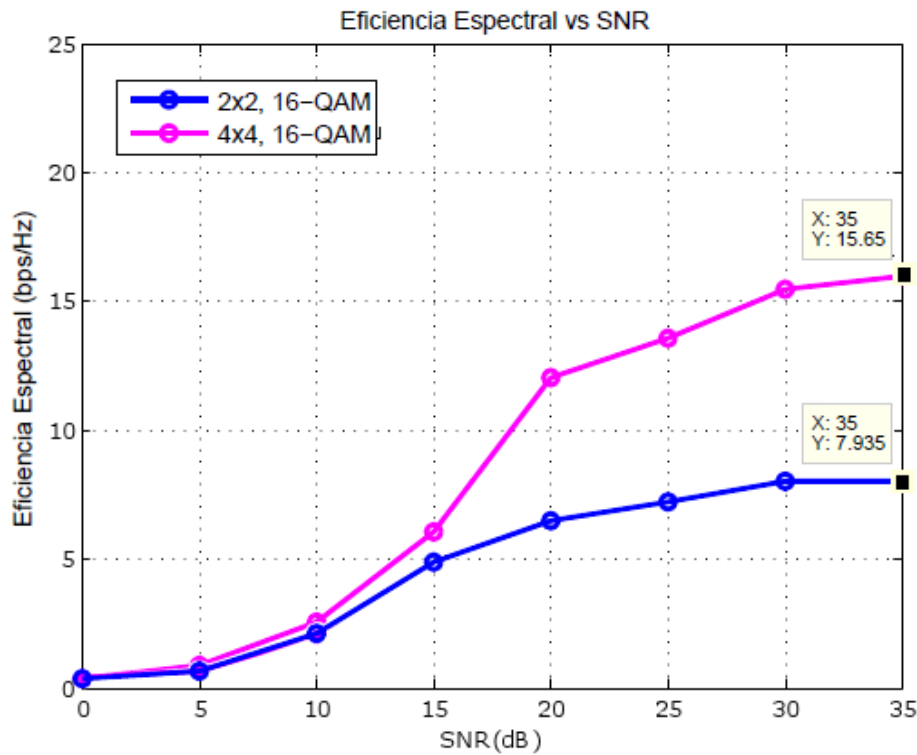


Figura 4.24 Eficiencia Espectral del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 16-QAM, Arreglo de Antenas 4x4 y Algoritmo de Detección MMSE

Se observa que entre el rango de valores de SNR de 0 dB a 35 dB, la eficiencia espectral aumenta hasta un valor de 15.65 bps/Hz, el cual es aproximadamente igual al valor teórico.

Se demuestra que el valor teórico de la eficiencia espectral de la modulación 16-QAM: 4 bps/Hz, se cuadruplica en este escenario porque se emplea un arreglo de antenas 4x4 en el sistema MIMO-OFDM. También se demuestra que al variar la configuración de antenas de 2x2 a 4x4, dejando constante el orden de la modulación, la eficiencia espectral se duplica para valores de SNR comprendidos entre 20 dB y 35 dB. Esto se observa al comparar las curvas obtenidas en los escenarios 1 y 3, las cuales se presentan en la figura 4.25 donde la eficiencia incrementó de 7.935 bps/Hz a 15.65 bps/Hz.



c

Figura 4.25 Comparación entre la Eficiencia Espectral de los escenarios 1 y 3

Se observa que para valores de SNR entre 0 dB y 15 dB, los sistemas de los escenarios 1 y 3 alcanzan aproximadamente los mismos valores de eficiencia espectral, lo cual confirma que al aumentar el número de antenas en un sistema MIMO-OFDM, el incremento en la eficiencia espectral se refleja para valores altos de SNR.

Al comparar las curvas de la figura 4.23 con las de la figura 4.25 se observa que este escenario logra un valor más alto de eficiencia espectral para una SNR de 35 dB con respecto a los valores que se obtienen en los escenarios donde se implementan los sistemas MIMO-OFDM 2x2 con 16-QAM y MIMO-OFDM 2x2 con 64-QAM, lo cual confirma que al aumentar el número de antenas en transmisión y en recepción, se incrementa la cantidad de bits transmitidos por segundo en un Hertz.

4.5.4 Escenario 4

La figura 4.26 presenta la curva de la eficiencia espectral del sistema MIMO-OFDM con arreglo de antenas 4x4, Modulación 64-QAM y algoritmo de detección MMSE. El valor teórico de la eficiencia espectral es 24 bps/Hz, éste se calcula con un *throughput* de 238.09 Mbps y un ancho de banda de 9.92 MHz.



Se aprecia que la eficiencia espectral se incrementa a medida que aumenta la SNR, alcanzando un valor de 23.77 bps/Hz para una SNR de 35 dB, el cual es aproximado al valor teórico.

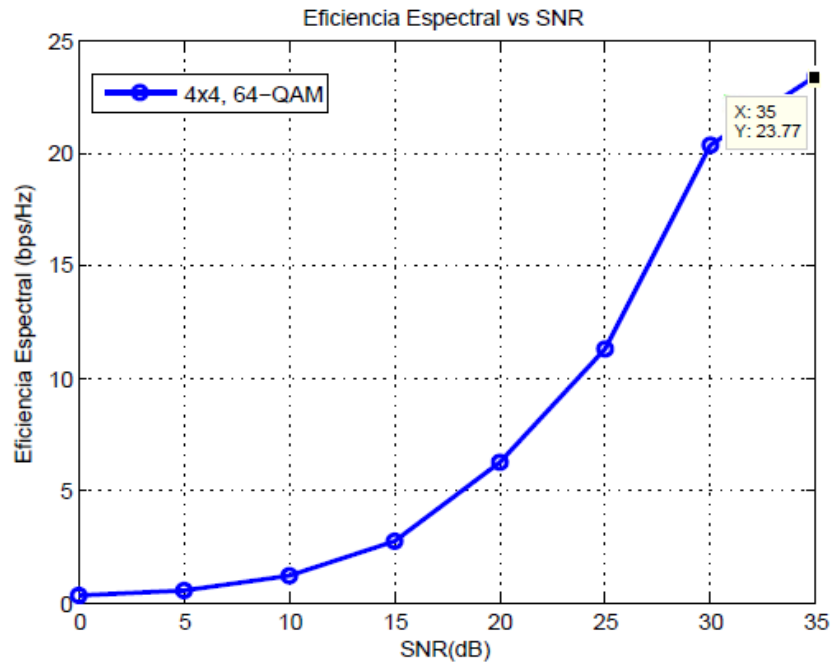


Figura 4.26 Eficiencia Espectral del Sistema MIMO-OFDM con Modulación 64-QAM, Arreglo de Antenas 4x4 y Algoritmo de Detección MMSE

Al comparar el valor de la eficiencia obtenido en este escenario para una SNR de 35 dB, con el del escenario 2 donde se implementa un sistema MIMO-OFDM 2x2 con 64-QAM, se confirma que el valor de eficiencia espectral se duplica al pasar de un arreglo de antenas 2x2 a 4x4.

Las curvas de la eficiencia espectral obtenidas en los escenarios 3 y 4 se muestran en la figura 4.27 donde se evidencia que la eficiencia espectral aumenta en 1.5 veces para valores altos de SNR cuando se varía la modulación de 16-QAM a 64-QAM y se mantiene constante el número de antenas en transmisión y recepción.

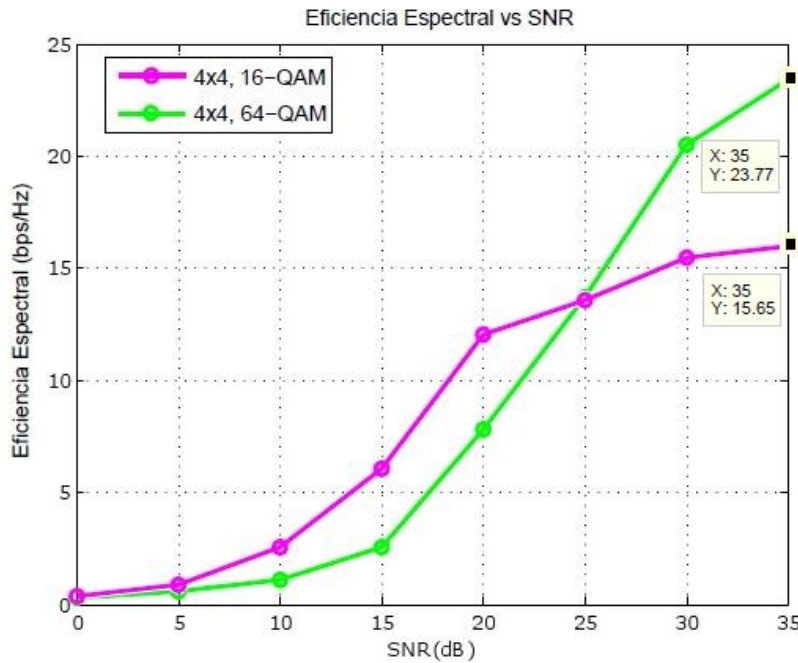


Figura 4.27 Comparación entre la Eficiencia Espectral de los Escenarios 3 y 4

De igual forma, se demuestra que el sistema MIMO-OFDM 4x4 cuando emplea una modulación de orden bajo como 16-QAM, presenta mejor desempeño en términos de la eficiencia espectral que cuando emplea una modulación de orden mayor como 64-QAM para valores de SNR comprendidos entre 0 dB y 25 dB. Por lo tanto es adecuado utilizar la modulación 16-QAM en un sistema MIMO-OFDM para valores bajos de SNR cuando se desea alcanzar valores altos de eficiencia espectral.

La tabla 4.11 muestra que los valores teóricos y los prácticos de la eficiencia espectral son similares, presentando una diferencia máxima de 0.35 bps/Hz en el escenario 4, además esta tabla confirma que en los sistemas MIMO-OFDM 4x4 (escenarios 3 y 4) se duplica la eficiencia espectral obtenida en los sistemas MIMO-OFDM 2x2 (escenarios 1 y 2).

Escenarios	Valor teórico de Eficiencia Espectral (bps/Hz)	Valor práctico de Eficiencia Espectral (bps/Hz)
1	8	7.935
2	12	11.77
3	16	15.65
4	24	23.77

Tabla 4.11 Valores Teóricos y Simulados de la Eficiencia Espectral con Algoritmo de Detección MMSE para una SNR de 35 dB



Al comparar las figuras 4.23 y 4.27, se observa que el escenario 4, donde se implementa un sistema MIMO-OFDM con cuatro antenas en transmisión y recepción, modulación 64-QAM y algoritmo de detección MMSE, presenta mejor desempeño en términos de eficiencia espectral respecto a los escenarios 1, 2 y 3 para valores altos de SNR, ya que transmite una mayor cantidad de información en un menor ancho de banda, por lo tanto tiene un mejor uso del espectro.

Por otra parte, en el escenario 1, cuando se emplea un sistema MIMO-OFDM 2x2 con modulación 16-QAM y algoritmo de detección ZF, se obtuvo 6.4 bps/Hz, el cual representa el valor más bajo de eficiencia espectral con respecto a los valores obtenidos en los escenarios 2, 3 y 4 para una SNR de 35 dB.

4.6 COMPARACION DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA MIMO-OFDM CON EL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA OFDM.

Un sistema MIMO-OFDM es capaz de transmitir información con una alta tasa de bit, sin necesidad de aumentar el ancho de banda de la señal, de igual forma incrementa la eficiencia espectral conforme aumenta el número de antenas en transmisión y en recepción. En cambio, un sistema OFDM que no emplea la técnica de múltiples antenas MIMO, no puede incrementar la tasa de bit, en consecuencia la eficiencia espectral en este sistema es menor comparada con la que se obtiene en el sistema MIMO-OFDM.

4.6.1 Comparación de la BER

En la figura 4.28 se presentan las curvas de la BER de los sistemas MIMO-OFDM y OFDM obtenidas en la simulación. Para la comparación con el sistema OFDM se escoge el sistema MIMO-OFDM 2x2 con modulación 16-QAM porque presentó mejor desempeño en términos de la BER.

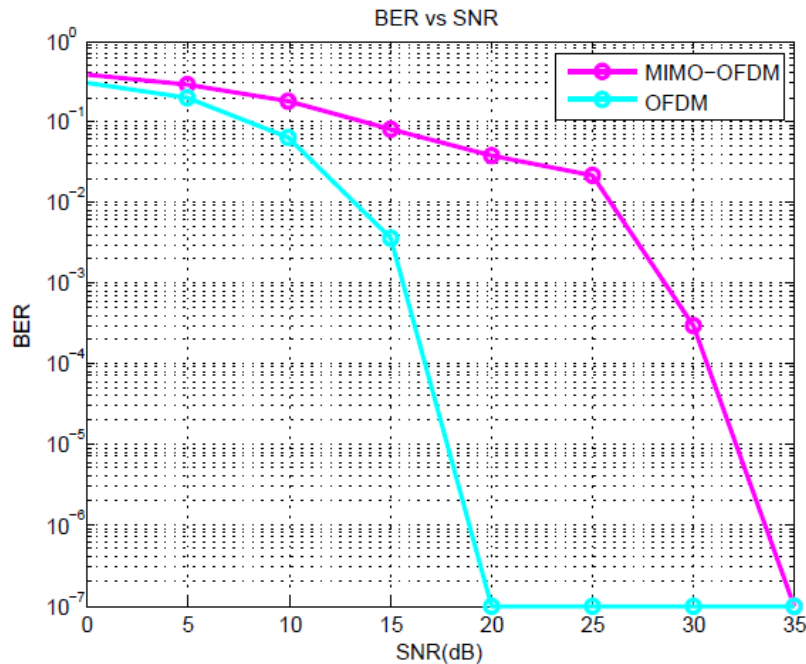


Figura 4.28 BER para los Sistemas OFDM y MIMO-OFDM

El sistema OFDM es capaz de transmitir una determinada cantidad de información con un mejor desempeño en términos de la BER que el sistema MIMO-OFDM. Esto se observa en las curvas de la figura 4.28, donde el sistema OFDM alcanza menor BER que el sistema MIMO-OFDM para valores de SNR comprendidos entre 0 dB y 20 dB. Esto se presenta porque en el sistema OFDM no existen señales interferentes provenientes de otras antenas, que ocasionen un incremento de la BER en el receptor.

En la tabla 4.12 se muestran los valores obtenidos de BER para los sistemas OFDM y MIMO-OFDM, se observa que en una SNR de 20 dB el sistema OFDM alcanza una BER de $1 \cdot 10^{-7}$, mientras que el sistema MIMO-OFDM logra una BER mayor de $1.8 \cdot 10^{-2}$ para el mismo valor de SNR. Por lo tanto se confirma que el sistema OFDM tiene mejor desempeño en términos de la BER porque alcanza valores menores que el sistema MIMO-OFDM en el rango de valores de SNR comprendidos entre 0 dB y 35 dB.



SNR (dB)	BER OFDM	BER MIMO-OFDM
0	$3 * 10^{-1}$	$3.9 * 10^{-1}$
5	$2 * 10^{-1}$	$3 * 10^{-1}$
10	$6.9 * 10^{-2}$	$2 * 10^{-1}$
15	$4 * 10^{-3}$	$1 * 10^{-1}$
20	$1 * 10^{-7}$	$1.8 * 10^{-2}$
25	$1 * 10^{-7}$	$2.1 * 10^{-3}$
30	$1 * 10^{-7}$	$9 * 10^{-5}$
35	$1 * 10^{-7}$	$1 * 10^{-7}$

Tabla 4.12 Valores de BER para OFDM y MIMO-OFDM

4.6.2 Comparación del *Throughput* y la Eficiencia Espectral

En la figura 4.29 se presentan las curvas del *throughput* obtenidas en la simulación para los sistemas OFDM, MIMO-OFDM 2x2 y MIMO-OFDM 4x4 cuando emplean la modulación 16-QAM.

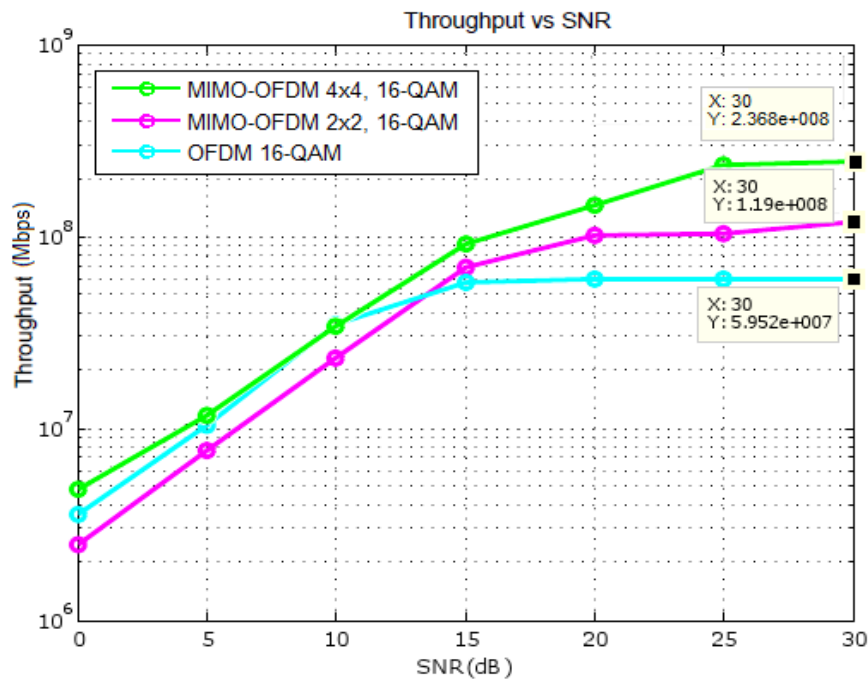


Figura 4.29 Comparación entre el *Throughput* de los Sistemas OFDM, MIMO-OFDM 2x2 y MIMO-OFDM 4x4



Tanto los sistemas MIMO-OFDM como los sistemas OFDM requieren una potencia de transmisión alta, por ello la diferencia entre las curvas es considerable para valores altos de SNR.

Se observa que el *throughput* que logra el sistema MIMO-OFDM 4x4 es 236.8 Mbps, el cual es aproximadamente cuatro veces mayor que el *throughput* que se obtiene en el sistema OFDM, para valores de SNR comprendidos entre 25 dB y 30 dB. De igual manera se aprecia que el sistema MIMO-OFDM 2x2 duplica el valor de *throughput* que se logra en el sistema OFDM. Esto demuestra que la tecnología MIMO incrementa la tasa efectiva de información, conforme aumenta el número de antenas en transmisión para valores altos de SNR.

En la figura 2.28 se observa que la BER que se obtiene en el sistema OFDM es menor que la del sistema MIMO-OFDM 2x2 para valores de SNR de 0 dB a 14 dB, por consiguiente la BLER también presenta valores bajos. Por lo tanto el sistema OFDM tiene mejor desempeño en términos de *throughput* que el sistema MIMO-OFDM 2x2 para valores bajos de SNR, como lo muestra la figura 4.29.

En la figura 4.30 se muestran las curvas de la eficiencia espectral obtenidas en la simulación para un ancho de banda de 14.88 MHz, el cual corresponde al ancho de banda que se obtiene en los sistemas MIMO-OFDM 2x2 y MIMO-OFDM 4x4 que emplean la modulación 16-QAM.

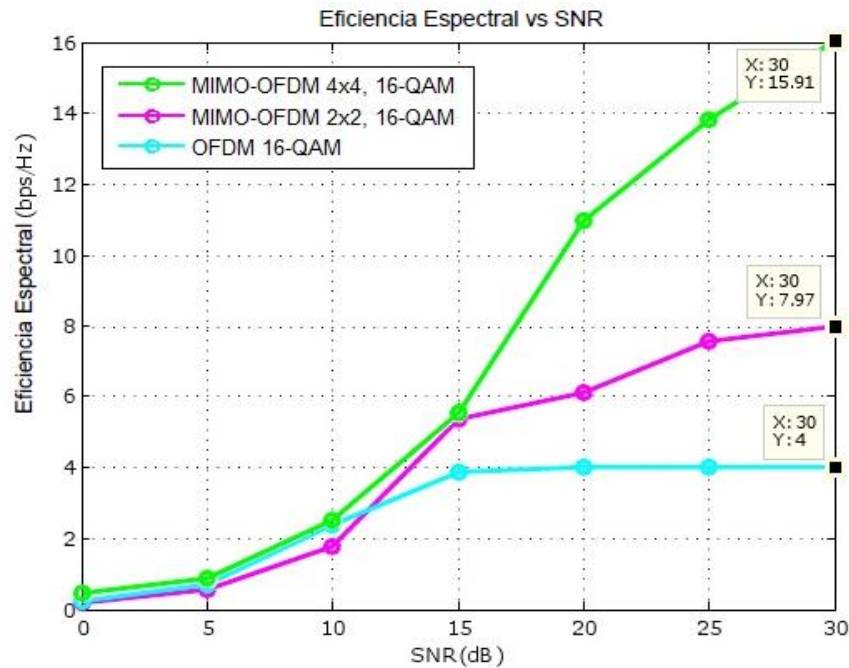


Figura 4.30 Comparación entre la Eficiencia Espectral de los Sistemas OFDM, MIMO-OFDM 2x2 y MIMO-OFDM 4x4

Se observa que el valor obtenido de la eficiencia espectral para el sistema OFDM coincide con el valor teórico 4 bps/Hz que se obtiene de la ecuación 4.12, el cual es aproximadamente cuatro veces menor que el valor de eficiencia que se obtiene con el sistema MIMO-OFDM 4x4 para una SNR de 30 dB. También se aprecia que el valor de eficiencia espectral del sistema OFDM es dos veces menor que el valor de MIMO-OFDM 2x2.

Esto demuestra que el sistema MIMO-OFDM además de incrementar el *throughput*, también aumenta la eficiencia espectral de una manera proporcional al número de antenas empleadas para valores altos de SNR.

Para valores de SNR de 0 dB a 11 dB las curvas de eficiencia espectral presentan el mismo comportamiento de las curvas de *throughput*, donde el sistema OFDM alcanza valores más altos de eficiencia espectral que el sistema MIMO-OFDM 2x2.

Por lo tanto el sistema MIMO-OFDM aumenta el *Throughput* y la eficiencia espectral, pero sacrifica calidad en la transmisión frente al sistema OFDM para valores altos de SNR.



4.7 TIEMPO DE EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN

En la tabla 4.13 se presenta el tiempo de ejecución de cada escenario de simulación cuando se transmiten 43200 bits, esto se realiza mediante las funciones TIC y TOC de Matlab®. Se observa que el escenario 4 es el que requiere mayor tiempo de ejecución, porque emplea mayor número de antenas y un alto orden de modulación en comparación con los escenarios 1, 2 y 3.

Escenarios	Tiempo de Ejecución (seg)
1. Sistema MIMO-OFDM con arreglo de antenas 2x2 y modulación 16-QAM	9.597732
2. Sistema MIMO-OFDM con arreglo de antenas 2x2 y modulación 64-QAM	8.057167
3. Sistema MIMO-OFDM con arreglo de antenas 4x4 y modulación 16-QAM	10.03905
4. Sistema MIMO-OFDM con arreglo de antenas 4x4 y modulación 64-QAM	10.305952

Tabla 4.13 Tiempo de Ejecución de los Escenarios de Simulación

En la Tabla 4.14 se muestra el tiempo de ejecución de la simulación cuando se varía el número de puntos en la IFFT/FFT, se observa que a medida que se aumentan los puntos, el tiempo de ejecución incrementa, presentando una diferencia máxima de 0.91667 segundos, cuando se emplea 512 y 2048 puntos.

Puntos IFFT/FFT	Tiempo de Ejecución (Seg)
512	9.358760
1024	9.582356
2048	10.27543

Tabla 4.14 Tiempo de Ejecución de la Simulación para Diferente Número de Puntos de la IFFT/FFT





5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo de grado, y los trabajos futuros.

5.1 CONCLUSIONES

5.1.1 Respecto a la metodología

- La metodología escogida permitió implementar un código estructurado mediante la realización de diagramas de flujo y de bloques, para el análisis del sistema MIMO-OFDM.
- El proceso de validación permitió verificar el adecuado funcionamiento de los componentes del sistema sin presencia de ruido, de la misma forma permitió demostrar que en el sistema MIMO-OFDM los errores en los datos recibidos se deben a las señales indirectas que llegan a cada antena y al ruido AWGN.
- La herramienta MATLAB permitió el desarrollo de la simulación de los cuatro escenarios de una forma estructurada, y el despliegue en gráficas de los resultados obtenidos en cada uno, facilitando el análisis del sistema MIMO-OFDM.

5.1.2 Respecto a los resultados de simulación

- Teniendo en cuenta que los operadores de telefonía móvil a nivel nacional se encuentran en el proceso de despliegue a la tecnología 4G, se recomienda el uso de los sistemas MIMO-OFDM con el esquema de multiplexación espacial, el cual puede ser altamente eficiente y permite garantizar altas velocidades de transmisión de datos, específicamente en zonas cercanas a la estación base, donde se tiene alto nivel de SNR. Los sistemas LTE próximos a desplegarse en Colombia pueden explotar estas características con los usuarios cercanos a la estación base.



- Los resultados obtenidos muestran que en un sistema de comunicación inalámbrica no se puede lograr al mismo tiempo una BER baja y una alta velocidad de transmisión, lo que lleva a buscar un equilibrio que garantice una velocidad de transmisión cumpliendo con un valor determinado de la BER.
- El código implementado en la simulación permitió obtener resultados prácticos para validar el desempeño del sistema MIMO-OFDM, los cuales servirán de apoyo para posteriores investigaciones relacionadas a la tecnología MIMO y a la técnica de transmisión OFDM.
- Cuando se requiera lograr una alta velocidad de transmisión y alta eficiencia espectral en regiones donde el nivel de SNR es bajo, se recomienda escoger un esquema de modulación de orden menor como 16-QAM, mientras que si el nivel de SNR es alto, es adecuado utilizar una modulación de orden mayor como 64-QAM. En ambos casos se puede utilizar en el sistema MIMO-OFDM un arreglo de antenas 4x4 para alcanzar mejor desempeño en velocidad de transmisión y eficiencia.
- Los sistemas MIMO-OFDM 2x2 y 4x4 que emplean la modulación 16-QAM muestran mejor desempeño en términos de la BER que los sistemas MIMO-OFDM 2x2 y 4x4 que utilizan 64-QAM, dado que la modulación influye considerablemente en el mismo, porque al aumentar el orden de modulación, disminuye la separación entre los símbolos, lo cual dificulta su estimación.



5.2 TRABAJOS FUTUROS

- Evaluación del desempeño de un sistema MIMO-OFDM que implemente algoritmos de detección óptimos, sobre un canal multitrayecto.
- Implementación y análisis de desempeño de un sistema MIMO-OFDM, aplicado a uno de los actuales sistemas inalámbricos como WLAN y 4G.



REFERENCIAS

- [1] L. Hanzo, J. Akhtman, M. Jiang, L. Wang, "MIMO-OFDM for LTE, WIFI and WIMAX: Coherent versus Non-Coherent and Cooperative Turbo-Transceivers," Tesis de Pregrado, Universidad de Southampton, Southampton, Reino Unido, 2010.
- [2] G. L. Stüber, S. W. Mclaughlin, M. A. Ingram, "Broadband MIMO-OFDM Wireless Communications," *Proceedings of the IEEE*, vol 92, pp. 271-294, 2004.
- [3] R. Mohamad, R. Mahmud, R. A. Awang, "Prototype of Quadrature Amplitude Modulation (QAM) Baseband Modem for a Digital Baseband Signal Processor," *RF and Microwave Conference IEEE International*, pp. 407-411, 2011.
- [4] J. Biró, E. Borbély, "DVB-T OFDM Modulation System," *Budapest Tech*, Budapest, Hungría, 2004.
- [5] H. Rohling, *OFDM, Concepts for Future Communication Systems*, Springer, Hamburgo, 2011.
- [6] T. Chiueh, P. Tsai, I. Lai, *Baseband Receiver Design for Wireless MIMO-OFDM Communications*, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, Singapore, 2012.
- [7] J. Rodríguez, "Desempeño de la técnica OFDM sobre canales inalámbricos," Tesis de Pregrado, Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica, 2011.
- [8] S. V. Santos, "Simulación de técnicas de shortening de canal en redes DVB-SH de frecuencia única," Tesis de Pregrado, Universidad Politecnica de Catalunya, Barcelona, España, 2010.
- [9] C. M. Hernández, V. M. Quintero, "Tema OFDM," Material de clase de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2011.
- [10] F. R. Pascual, "Sistemas MIMO," Artículo, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.



- [11] C. M. Hernández, V. M. Quintero, “Tema MIMO”, Presentación de clase, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2011.
- [12] G. Tsoulos, *MIMO System Technology for Wireless Communications*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006.
- [13] C. C. Muñoz, M. L. Vargas, “Análisis del Desempeño de un Sistema MU-MIMO Basado en Algoritmos de Precodificación Lineal ZF y MMSE,” Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2012.
- [14] Y. S. Cho, W. Y. Yang, C. Kang, et al., *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*, John Wiley & Sons, 2010.
- [15] M. A. Díaz, “Aplicación de Teoría de Matrices Aleatorias en Comunicación Inalámbrica: Sistemas MIMO,” *Seminario de Probabilidad*, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México, 2010.
- [16] A. R. Izquierdo, A. S. Guzman “Análisis Comparativo de los Esquemas de Multiplexación Espacial V-BLAST, H-BLAST y D-BLAST, en un Sistema Mimo,” Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2011.
- [17] C. Torres, I. Páez, “Análisis de un Sistema de Comunicaciones Afectado por los Desvanecimientos Plano y Lento tipo Rayleigh,” Artículo, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2008.
- [18] E. Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides, et al., *MIMO Wireless Communications*, Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- [19] A. M. Vidal, V. M. García, “Algoritmos Paralelos para la Solución de Problemas de Optimización Discretos Aplicados a la Decodificación de Señales,” Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2009.
- [20] A. R. Paniagua, “Implementación de los Algoritmos V-BLAST y D-BLAST y comparación con los Space-Time Codes para sistemas MIMO,” Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Colombia, 2006.
- [21] H. Jafarkhani, *Space-Time Coding: Theory and Practice*, Cambridge University Press, Cambridge, 2005.



- [22] J. A. Payán, “Técnicas de Estimación de Canal para Sistemas MIMO-OFDM,” Tesis de Maestría, Centro de investigación científica y de educación superior de Ensenada, Ensenada, México, 2008.
- [23] C. V. Vargas, W. E. Lopez, C. F. da Rocha, “Sistemas de Comunicación Inalámbrica MIMO–OFDM,” Universidad Federal de Santa Catarina, 2007.
- [24] E. Astaiza, H. Bermúdez y P. Muñoz, “*Metodología para la Simulación de Sistemas de Telecomunicaciones*”, 2007.
- [25] P. A. Caicedo y G. A. Medina, “Análisis de Desempeño del Nivel Físico de un Sistema MIMO Punto a Punto,” Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2011.
- [26] G. B. I. Noguerras. (2011, Noviembre 29). “*Matemáticas en Ingeniería con Matlab y Octave*”. [Citado 14 de Agosto de 2012].
- [27] M. V. Tumbajoy, P. P. Ortega, “Análisis de Desempeño a Nivel Físico de un Sistema Prototipo de Comunicación de Datos Multipropósito Vía Radio en 2.4 GHz,” Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2012.
- [28] H. Holma, A. Toskala, *WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE*, John Wiley & Sons, 2010.
- [29] V. K. Garg, “*Wireless Communications & Networking*”, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2007.



ANEXO A

A.1 Algoritmos de Detección Lineal

El método de detección lineal de señales es una técnica de baja complejidad, su funcionamiento se basa en encontrar la mejor señal que represente cada uno de los símbolos, luego estos son decodificados utilizando la señal detectada, es por esto que el efecto de los demás símbolos se considera como interferencia [1]. Los dos algoritmos de detección lineal más conocidos son el algoritmo de Forzado a Cero (ZF) que permite mitigar la interferencia entre símbolos y el algoritmo de Mínimo Error Cuadrático Medio (MMSE) el cual ayuda a separar los símbolos con un aumento mínimo del ruido.

A.1.1 Algoritmo de Detección de Forzado a Cero (ZF)

El algoritmo de detección ZF utiliza una matriz de peso para compensar la respuesta impulsiva del canal, de esta forma se elimina la interferencia entre los símbolos [2]. La detección lineal ZF no considera los efectos del ruido, es por esto que puede ser amplificado mientras se elimina la interferencia.

Las expresiones matemáticas de dos símbolos que interfieren entre sí, están dadas en las ecuaciones A.1 que representa la señal recibida en la primera antena de recepción y A.2 que muéstrala señal recibida en la segunda antena de recepción.

$$y_1 = h_{1,1}x_1 + h_{1,2}x_2 + n_1 = [h_{1,1} \ h_{1,2}] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + n_1 \quad (\text{A.1})$$

$$y_2 = h_{2,1}x_1 + h_{2,2}x_2 + n_2 = [h_{2,1} \ h_{2,2}] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + n_2 \quad (\text{A.2})$$

Donde

y_1 , y_2 son los símbolos recibidos en la primera y segunda antena de recepción respectivamente.

$h_{1,1}$ es el canal de la primera antena de transmisión a la primera antena de recepción.



$h_{1,2}$ es el canal de la segunda antena de transmisión a la primera antena de recepción.

$h_{2,1}$ es el canal de la primera antena de transmisión a la segunda antena de recepción.

$h_{2,2}$ es el canal de la segunda antena de transmisión a la segunda antena de recepción.

x_1, x_2 son los símbolos transmitidos y n_1, n_2 es el ruido sobre la primera y segunda antena de recepción respectivamente.

Por conveniencia, las ecuaciones de los símbolos recibidos y_1, y_2 pueden ser representadas en notación matricial dada en la ecuación A.3.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

La ecuación A.3 puede ser vista de forma general en la ecuación A.4.

$$y = Hx + n \quad (\text{A.4})$$

Para resolver la ecuación A.4 se necesita una matriz W_{ZF} que cumpla la relación $HW_{ZF} = I$, siendo I la matriz identidad.

El detector ZF anula la interferencia mediante la matriz de peso presentada en la ecuación A.5

$$W_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H \quad (\text{A.5})$$

El término $H^H H$ está dado en la ecuación A.6, donde H^H denota la matriz Hermitiana de H , es decir, se invierte el efecto del canal siguiendo la ecuación A.7.

$$H^H H = \begin{bmatrix} h_{1,1}^* & h_{1,2}^* \\ h_{2,1}^* & h_{2,2}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$$s_{ZF} = W_{ZF} y \quad (\text{A.7})$$

Reemplazando W_{ZF} y y se obtienen la ecuaciones A.8 y A.9.

$$s_{ZF} = x + (H^H H)^{-1} H^H n \quad (\text{A.8})$$

$$s_{ZF} = x + \hat{n}_{ZF} \quad (\text{A.9})$$



Donde $\hat{n}_{ZF} = W_{ZF}n = (H^H H)^{-1} H^H n$. Se observa que el rendimiento está directamente ligado a la potencia de \hat{n}_{ZF} , además se aprecia que la interferencia entre símbolos se elimina pero se produce un incremento de ruido.

La SNR de pos detección ZF sobre el flujo de símbolos i-esimo esta descrito en la ecuación A.10.

$$SNR_i^{ZF} = \frac{\overline{|x_i|^2}}{\sigma_n^2 (H^H H)^{-1}_{i,i}} \quad (i = 1, 2, \dots, Nt) \quad (A.10)$$

Siendo $\overline{|x_i|^2}$ la potencia asociada a los símbolos de la constelación en transmisión, σ_n^2 la potencia de ruido complejo en cada antena de recepción y $(H^H H)^{-1}_{i,i}$ indica el elemento (i,i) de la diagonal de la matriz $(H^H H)^{-1}$. Cuando se presenta una gran correlación entre los elementos de la matriz H, el valor absoluto del determinante de $H^H H$ es pequeño, por lo que los elementos de la diagonal $(H^H H)^{-1}$ toman valores grandes y la SNR de pos detección es baja [3].

Por lo tanto el algoritmo de detección ZF no es el mejor ecualizador ya que amplifica el ruido, sin embargo es muy utilizado en aplicaciones prácticas debido a su baja complejidad y rapidez al implementarse.

A.1.2 Algoritmo de Detección de Mínimo Error Cuadrático Medio (MMSE)

El detector ZF no considera los efectos del ruido y por eso lo amplifica considerablemente. Para resolver este problema, una alternativa es utilizar el detector MMSE. El objetivo de este detector es multiplicar la señal recibida $y(t) = H * x(t) + n(t)$ por una matriz de tal manera que el ruido resultante se reduzca al mínimo [2]. El detector MMSE utiliza el criterio del error cuadrático medio, implementado para evaluar la diferencia entre un estimador y el valor real de la cantidad que se quiere evaluar, su fórmula está dada en la ecuación A.11.

$$MSE(\hat{\theta}) = E[(\hat{\theta} - \theta)^2] \quad (A.11)$$

Donde $\hat{\theta}$ representa el valor estimado y θ el valor real a evaluar.

La matriz de peso del detector MMSE está dada en la ecuación A.12.

$$W_{MMSE} = \left(H^H H + \frac{\sigma_n^2}{\overline{|x_i|^2}} I \right)^{-1} H^H \quad (A.12)$$

Donde $\frac{\sigma_n^2}{\overline{|x_i|^2}} = 1/SNR$, es la información estadística de ruido.



Usando la ecuación A.5 en la señal estimada s , se obtiene la ecuación A.13.

$$s_{MMSE} = W_{MMSE}y \quad (A.13)$$

Reemplazando W_{MMSE} y y se obtienen la ecuaciones A.14, A.15 y A.16.

$$s_{MMSE} = (H^H H + \sigma_n^2 I)^{-1} H^H y \quad (A.14)$$

$$s_{MMSE} = x + (H^H H + \sigma_n^2 I)^{-1} H^H n \quad (A.15)$$

$$s_{MMSE} = x + \hat{n}_{MMSE} \quad (A.16)$$

Se observa que si la SNR es muy grande o tiende a infinito, la matriz de peso converge a la matriz del detector ZF.

Por otro lado, la SNR de pos detección MMSE sobre el flujo de símbolos i -ésimo está dada en la ecuación A.17 [4].

$$SNR_i^{MMSE} = \frac{\overline{|x_i|}^2}{\sigma_n^2 \left(H^H H + \frac{\sigma_n^2}{\overline{|x_i|}^2} I \right)_{i,i}^{-1}} - 1 \quad (i = 1, 2, \dots, Nt) \quad (A.17)$$

Al comparar las ecuaciones A.10 y A.17 se evidencia que la amplificación de la potencia de ruido es menos crítica en el algoritmo de detección MMSE que en el detector ZF.

Por lo tanto el detector MMSE presenta mejoras en el desempeño respecto al detector ZF, como principal diferencia, en el proceso de detección la incluye la información del ruido interferente en la transmisión.



REFERENCIAS ANEXO A

- [1] Y. S. Cho, W. Y. Yang, C. Kang, et al., “*MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*”, John Wiley & Sons, 2010.
- [2] H. Jafarkhani, “*Space-Time Coding: Theory and Practice*”, Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
- [3] N. Cardona, J. J. Olmos, M. García, et al., “*3GPP LTE: Hacia la 4G móvil*”, Marcombo S.A., Barcelona, 2011.
- [4] Y. Jiang, J. Li, “Performance Analysis of ZF and MMSE Equalizers for MIMO Systems: An In-Depth Study of the High SNR Regime,” *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol 57, pp. 2008-2026, 2011.