

**ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA MIMO
PUNTO A PUNTO**



**PEDRO ALEJANDRO CAICEDO VALLEJO
GUSTAVO ADOLFO MEDINA PAZ**

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán
2010

**ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA MIMO
PUNTO A PUNTO**



**PEDRO ALEJANDRO CAICEDO VALLEJO
GUSTAVO ADOLFO MEDINA PAZ**

**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 de Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán
2010



Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS MIMO.....	1
1.2	MOTIVACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	2
1.3	OBJETIVOS	2
1.3.1	OBJETIVO GENERAL.....	2
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3.3	ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO	3
2.	GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS MIMO	4
2.1	SISTEMAS MIMO.....	4
2.2	ESQUEMAS DE FUNCIONAMIENTO	7
2.2.1	DIVERSIDAD ESPACIAL	7
2.2.2	MULTIPLEXACIÓN ESPACIAL.....	7
2.2.3	SELECCIÓN DEL ESQUEMA UTILIZADO.....	10
2.3	MODELADO DEL CANAL MIMO.....	10
2.3.1	MODELO DE CANAL AWGN	11
2.3.2	MODELO DE CANAL RAYLEIGH.....	13
2.4	RECEPCIÓN EN SISTEMAS MIMO.....	14
2.4.1	“ZERO FORCING” ZF.....	15
2.4.2	“MINIMUM MEAN SQUARE ERROR” MMSE	15
2.4.3	“MAXIMUM LIKELIHOOD RECEIVER” ML	16
2.4.4	ALGORITMO ESFÉRICO	17
2.5	MODULACIÓN DIGITAL.....	21
2.5.1	MODULACIÓN QAM (MODULACIÓN DE AMPLITUD EN CUADRATURA).....	21
2.5.2	MODULACIÓN QPSK (“QUADRATURE PHASE SHIFT KEYING”)	22
2.5.3	SIMILITUDES ENTRE QAM Y QPSK.....	24
3.	METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO	26
3.1	PROCESO DE DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN	26
3.2	FASE 1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA	27
3.3	FASE 2 ANÁLISIS DEL SISTEMA.....	27
3.4	FASE 3 FORMULACIÓN DEL MODELO.....	28
3.4.1	DIAGRAMA DE FLUJO DE UN SISTEMA MIMO.....	31
3.4.2	DIAGRAMAS DE FLUJO DE LA MULTIPLEXACIÓN V-BLAST.....	32
3.4.3	DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE DETECCIÓN ZF	33
3.4.4	DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE DETECCIÓN MMSE	34
3.4.5	DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE DETECCIÓN ML.....	35
3.4.6	DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE DETECCIÓN ESFÉRICO.....	36
3.5	FASE 4 SELECCIÓN DEL LENGUAJE	37
3.5.1	MATLAB 7.9.....	37
3.5.2	SCILAB 5.1.....	38
3.5.3	SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA.....	38
3.6	FASE 5 CODIFICACIÓN DEL MODELO:	39
3.6.1	CÓDIGO DE BLOQUES DE MIMO	39
3.6.2	CÓDIGO PRINCIPAL.....	42
3.6.3	CÓDIGO ZF Y MMSE	43
3.6.4	CÓDIGO ML	43
3.6.5	CÓDIGO ALGORITMO ESFÉRICO	46
3.7	FASE 6 VALIDACIÓN DEL MODELO:.....	47
3.8	FASE 7 EXPERIMENTACIÓN:	47
3.9	FASE 8 IMPLANTACIÓN:	47



3.10	FASE 9 MONITOREO Y CONTROL:	47
4.	VALIDACIÓN DE RESULTADOS	48
4.1	VERIFICACIÓN DE RESULTADOS.....	48
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
5.1	RESULTADOS OBTENIDOS	55
5.1.1	ESCENARIO 1	55
5.1.2	ESCENARIO 2	57
5.1.3	ESCENARIO 3	58
5.1.4	ESCENARIO 4	61
5.1.5	ESCENARIO 5	63
5.1.6	ESCENARIO 6	65
5.1.7	ESCENARIO 7	66
5.1.8	ESCENARIO 8	68
5.1.9	ESCENARIO 9	73
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	75
6.1	CONCLUSIONES	75
6.2	TRABAJOS FUTUROS	77
	REFERENCIAS	78



Lista De Tablas

Tabla 4.1.Valores ZF y MMSE figura 4.1 y 4.3.....	50
Tabla 4.2.Valores ZF y MMSE figura 4.2 y 4.3.....	50
Tabla 4.3.Valores de BER, Algoritmo de Detección ZF con 2x2 y 4x4 figura 4.4 y 4.5.	52
Tabla 4.4.Valores de BER, Algoritmo de Detección ML con 2x2 y 4x4 figura 4.4 y 4.5.....	52
Tabla 4.5.Valores de ML y Esférico 2x2 16QAM figura 4.6 y 4.7.....	54
Tabla 5.1. Valores de Eb/No, BER entre 1 y 10^{-5} en el escenario 1.	56
Tabla 5.2. Valores de Eb/No, BER entre 1 y 10^{-5} en el escenario 2.	58
Tabla 5.3. BER vs Eb/No en el Escenario 3.	60
Tabla 5.4. BER vs Eb/No en el escenario 4.....	62
Tabla 5.5. BER vs Eb/No en el Escenario 5.	64
Tabla 5.6. BER vs Eb/No MIMO 2x2 y 4x4 en el Escenario 8.	70
Tabla 5.7. BER vs Eb/No en el escenario 9.....	74



Lista De Figuras

Figura 2.1. Topología de un sistema SISO.	5
Figura 2.2. Topología de un sistema MIMO.	6
Figura 2.3. Matriz H.	6
Figura 2.4. Diversidad espacial.....	7
Figura 2.5. Procesamiento V-Blast en un sistema MIMO	8
Figura 2.6. Arquitectura D-BLAST	9
Figura 2.7. Modelo de canal.	14
Figura 2.8. Árbol de búsqueda para un sistema 2X2 QAM en ML.....	17
Figura 2.9. Esférico.	17
Figura 2.10. Árbol de búsqueda para un sistema 4x4 QPSK en Esférico.	20
Figura 2.11. Constelación de 16-QAM.....	21
Figura 2.12. Constelación QPSK.....	23
Figura 3.1. Desarrollo del modelo de simulación	26
Figura 3.2. Diagrama de bloques de MIMO.....	29
Figura 3.3. Esquemas de comunicación	31
Figura 3.4. Esquemas V-Blast.....	32
Figura 3.5. Diagrama de ZF	33
Figura 3.6. Diagrama de MMSE.....	34
Figura 3.7. Diagrama de ML.....	35
Figura 3.8. Diagrama de Esférico.....	36
Figura 4.1. MIMO QPSK 4x4 ZF y MMSE AWGN.....	48
Figura 4.2. MIMO QPSK 4x4 ZF y MMSE Rayleigh	49
Figura 4.3. MIMO QPSK 4x4 ZF y MMSE Rayleigh	49
Figura 4.4. MIMO QAM 4x4 y 2x2 ML y ZF.	51
Figura 4.5. MIMO QAM 4x4 2x2 ZF y ML.	51
Figura 4.6. MIMO 16QAM 2x2 Esférico y ML.....	53
Figura 4.7. MIMO 16QAM 2x2 Esférico y ML.....	53
Figura 5.1 Escenario 1: BER Vs Eb/No ZF y MMSE.	55
Figura 5.2. Escenario 2: BER Vs Eb/No ZF y MMSE.	57
Figura 5.3. Escenario 3: BER Vs Eb/No ZF	58
Figura 5.4. Escenario 4: BER Vs Eb/No MMSE.....	61
Figura 5.5. Escenario 5: BER Vs Eb/No ML	63
Figura 5.6. Escenario 6: BER Vs Eb/No para los cuatro algoritmos.	65
Figura 5.7. Tiempos de procesamiento Escenario 6.	66
Figura 5.8. Escenario 7: BER Vs Eb/No para los cuatro algoritmos.	67
Figura 5.9. Escenario 8: BER Vs Eb/No para los cuatro algoritmos.	68
Figura 5.10 Tiempos de procesamiento Escenario 8.	71
Figura 5.11. Escenario 8: BER Vs Eb/No para los cuatro algoritmos.	71
Figura 5.12 tiempos de procesamiento Escenario 8.	72
Figura 5.13. Escenario 9: BER Vs Eb/No ZF y MMSE.	73



Lista de acrónimos

- AWGN:** Ruido blanco aditivo Gaussiano.
- BER:** Número de bits o bloques incorrectamente recibidos, con respecto al total de bits o bloques enviados durante un intervalo especificado de tiempo.
- Canal Rayleigh:** Canal multitrayecto.
- D-BLAST:** Codificación Diagonal.
- E_b/N_0 :** Relación energía por bit / densidad espectral de potencia de ruido.
- FIET:** Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones - Universidad del Cauca.
- ISI:** Interferencia intersimbólica.
- MIMO:** Múltiples entradas, múltiples salidas.
- MISO:** Múltiples entradas, única salidas.
- ML:** Algoritmo de máxima verosimilitud
- MMSE:** Algoritmo de detección de mínimo error cuadrático medio.
- MMSE-DFE:** Algoritmo de detección de mínimo error cuadrático medio con ecualizador de realimentación de decisión.
- OSI:** El modelo de referencia de Interconexión de Sistemas.
- PED:** Distancia euclidiana parcial.
- PSD:** Densidad Espectral de Potencias.
- PSK:** Modulación por desplazamiento de fase.
- QAM:** Modulación de amplitud en cuadratura.
- Semilongitud:** distancia entre dos nodos consecutivos.
- SIC:** “*Successive interference cancellation*”.
- SISO:** Única entrada, única salida.
- V-BLAST:** Codificación vertical.
- ZF:** Algoritmo de mínimo error cuadrático.
- ZF-DFE:** Algoritmo de mínimo error cuadrático con ecualizador de realimentación de decisión.



1.Introducción

1.1 Introducción a los sistemas MIMO

Las redes inalámbricas actuales y las venideras deben ser diseñadas para ofrecer altas prestaciones, siendo un reto técnico para los fabricantes ofrecer altas velocidades, mejorando la calidad del servicio prestado. Para lograrlo es necesario implementar técnicas innovadoras que incrementen la eficiencia espectral y la fiabilidad del enlace de comunicaciones, tal es el caso de los sistemas MIMO, los cuales se destacan por contar con múltiples antenas, tanto en el transmisor como en el receptor y que garantizan altas velocidades de transmisión sobre grandes distancias, sin aumentar la potencia de transmisión o el ancho de banda.

Los sistemas MIMO tienen como premisa utilizar la propagación multitrayecto a su favor, normalmente un problema para las comunicaciones inalámbricas tradicionales. Hace algunos años, los sistemas SIMO (*“Single Input Multiple Output”*, Única Entrada-Múltiples Salidas) empezaron a explotar la propagación multitrayecto con la implementación de diversidad espacial en la parte de recepción, cuyo principio de funcionamiento fue suministrar al receptor varias copias de la señal original que viajan por un camino independiente con desvanecimientos distintos.

MIMO implementa dos esquemas de funcionamiento: Diversidad espacial y multiplexación espacial. El primero consiste en enviar la información de forma simultánea por varias antenas, con el fin de aprovechar la redundancia creada en el receptor, disminuyendo las pérdidas de señal y aumentando el desempeño. El esquema de Multiplexación espacial (*“Spatial Multiplexing”*), consiste en multiplexar la señal original, en varias señales iguales de menor tamaño para posteriormente ser transmitidas por las antenas existentes en el transmisor. Para que la multiplexación espacial funcione adecuadamente, es necesario contar en el receptor con un algoritmo de detección eficiente, capaz de distinguir las señales recibidas, para posteriormente extraer la señal original. Esta técnica permite



umentar la tasa de transmisión, dado que se crean múltiples canales con anchos de banda mínimos.

En este documento se realiza un estudio de las características y el funcionamiento de los sistemas MIMO (*“Multiple Input Multiple Output”*, Múltiples Entradas-Múltiples Salidas), con el propósito de analizar su desempeño para un enlace punto a punto entre dos dispositivos, considerando el esquema de multiplexación espacial. Dicho análisis se realiza en diversos entornos, variando las configuraciones del enlace, el tipo de modulación, el modelo de canal, el algoritmo de detección y el número de antenas (tanto en el transmisor como en el receptor).

Para evaluar el desempeño se analiza la tasa de error de bit (*“Bit Error Rate”*, BER), producida durante la transmisión de datos en distintos tipos de enlace.

1.2 Motivación del trabajo de grado

Muchos desarrolladores centran sus esfuerzos en estudios enfocados en la búsqueda de nuevos mecanismos, que permitan satisfacer las exigencias de las comunicaciones inalámbricas actuales. Estas necesitan mayor capacidad y velocidad para garantizar a los usuarios una comunicación fiable. Se ha prestado mayor atención al estudio de los sistemas MIMO, ya que pueden satisfacer las necesidades actuales de los usuarios de redes inalámbricas de tercera generación [1].

Resulta necesario disponer de simulaciones que muestren el desempeño de los sistemas MIMO, que permitan modificar las configuraciones del enlace y permitan realizar variaciones al código desarrollado con el objetivo de que los usuarios de dicho sistema efectúen un estudio más profundo, en busca de otras observaciones y/o mejoras del mismo. En la actualidad no existen simulaciones, ni herramientas con las características mencionadas y las existentes están diseñadas con parámetros fijos, lo que obstaculiza la realización de cambios. Los aspectos mencionados anteriormente, son la razón del desarrollo del presente trabajo de grado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar el desempeño de nivel físico de un sistema MIMO 2x2 y 4x4 punto a punto considerando el esquema de multiplexación espacial.



1.3.2 Objetivos específicos

- Definir las características y parámetros de nivel físico de un sistema MIMO punto a punto, considerando el esquema de multiplexación espacial a tener en cuenta en el análisis.
- Proponer el diseño de simulaciones de nivel físico para un sistema MIMO 2x2 y 4x4 punto a punto, considerando el esquema de multiplexación espacial de acuerdo a las características y parámetros obtenidos.
- Verificar los resultados obtenidos de las simulaciones mediante la comprobación del comportamiento en diferentes escenarios de pruebas y teniendo en cuenta los parámetros de desempeño como la BER y la relación señal y ruido SNR.

1.3.3 Estructura del trabajo de grado

En el capítulo 2 se describen los aspectos generales de los sistemas MIMO, se estudia su topología y se mencionan sus componentes como los algoritmos de detección, multiplexación espacial, diversidad espacial, modelos de canal y modulaciones digitales.

En el capítulo 3 se presenta la metodología de desarrollo utilizada así como también se tocan aspectos como la validación de resultados, objetivos y análisis de la simulación, para, en el capítulo siguiente demostrar la veracidad de los resultados obtenidos. Se ilustran los diagramas de flujo de los procesos desarrollados, con el fin de facilitar al lector una herramienta que permita un mejor entendimiento del trabajo elaborado. Finalmente se describe la herramienta de simulación empleada para los análisis de las simulaciones.

En el capítulo 4 se desarrolla la validación y la verificación de los resultados obtenidos, esto con el propósito de comparar dichos resultados, con los elaborados en otras universidades o centros de investigación en telecomunicaciones.

En el capítulo 5 se exponen diversos escenarios de simulaciones MIMO, variando sus componentes, para posteriormente realizar el análisis de cada uno de ellos en cuanto al desempeño del nivel físico.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de este trabajo de grado y líneas futuras para seguir trabajando en temas relacionados con los sistemas MIMO.



2. Generalidades de los sistemas MIMO

En este capítulo se explica el funcionamiento de los sistemas MIMO, tratando aspectos como su topología, funcionamiento y algoritmos de detección. Además, se mencionan los tipos de modelos de canal utilizados, también se habla de la implementación de la modulación digital, multiplexación y diversidad espacial.

2.1 Sistemas MIMO

En la actualidad, los sistemas de comunicaciones inalámbricas predominantes son aquellos que cuentan con una antena tanto en el transmisor como en el receptor. Durante años han sido utilizados satisfaciendo las necesidades de los usuarios y sus inconvenientes han sido manejados de tal forma, que las comunicaciones no se alteren. Estos sistemas se conocen como sistemas SISO, en los cuales hay presencia de desvanecimiento ocasionado por multitrayectorias¹, tal y como se ilustra en la figura 2.1. La multitrayectoria ocasiona sumas constructivas y destructivas de la señal recibida generando fluctuaciones en la amplitud de la señal original [1] [2].

Tanto la evolución de los dispositivos electrónicos como las exigencias de los usuarios que los utilizan, han saturado los sistemas SISO a tal punto que los proveedores se ven obligados a buscar nuevas alternativas de sistemas que brinden mayor robustez en sus redes [3].

Una de las alternativas para mejorar el desempeño de las redes inalámbricas es la implementación de la diversidad espacial. Esta consiste en utilizar múltiples antenas en el receptor con el fin de aprovechar el multitrayecto, usando varias de las señales que llegan y fortaleciendo la señal original. Lo que en un sistema SISO tradicional es un inconveniente, en un sistema MIMO, se convierte en una cualidad [3] [4].

Los sistemas MIMO se empezaron a concebir a inicios de la década de los setenta, cuando ingenieros que trabajaban para la compañía “*Bell-THE BLAST Team*”, tratando de mejorar el rendimiento de otro tipo de tecnología, encontraron que los sistemas MIMO eran una opción para mejorar el desempeño de las

1 Señal original que llega al receptor por múltiples caminos

comunicaciones inalámbricas. También descubrieron que para ese entonces, los equipos existentes diseñados para el procesamiento de señales eran muy limitados e implementar esta tecnología resultaba extremadamente costoso. Esto ocasionó que la investigación de los sistemas MIMO se estancara por varios años y hasta inicios de esta década, los sistemas MIMO volvieron a atraer la atención de investigadores teniendo en cuenta que en la actualidad los equipos diseñados para el procesamiento de señales han reducido su precio considerablemente y sus funcionalidades son mayores a los existentes treinta años atrás [4].

Además, el desarrollo de los códigos espacio temporales, diseñados para este tipo de sistemas, aprovechan la ganancia producida por la diversidad, mejorando la calidad de la señal en el receptor. Estos códigos han logrado que varios desarrolladores empleen los sistemas MIMO como la tecnología predominante en las redes inalámbricas del futuro [4].

En la figura 2.1 se observa un sistema SISO tradicional que utiliza una antena en el transmisor y otra en el receptor, mostrando las múltiples trayectorias que toma la señal enviada a pesar de utilizar un único canal, generando inconvenientes en la detección correcta de la señal transmitida [5].

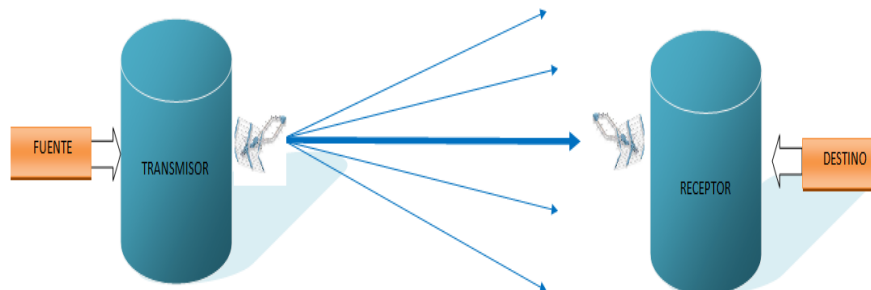


Figura 2.1. Topología de un sistema SISO.

En los sistemas MIMO varias antenas en el transmisor generan múltiples trayectorias, que a diferencia de los sistemas SISO, son aprovechadas por las diversas antenas ubicadas en el receptor el cual cuenta con mecanismos de detección avanzados que permiten capturar la señal de forma adecuada [6].

Los sistemas MIMO permiten mejorar la calidad y/o la velocidad de transmisión de información con respecto a los sistemas SISO. La figura 2.2 presenta el esquema de un sistema MIMO general.

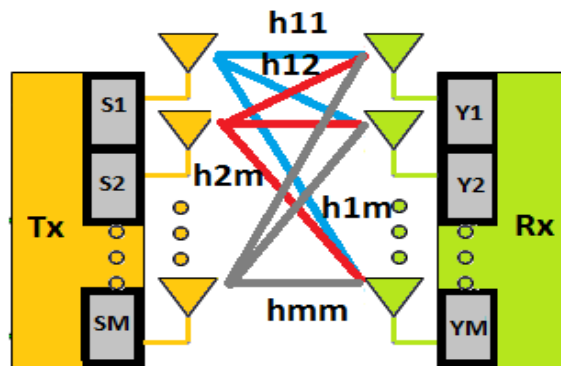


Figura 2.2. Topología de un sistema MIMO.

La propagación se representa mediante una matriz, que se conoce como matriz de transmisión, o matriz H , donde el vector transmitido es S y el vector recibido es Y , n es el ruido de cada antena en el receptor, dando como resultado la ecuación 2.1.

$$y = HS + n \tag{2.1}$$

En la matriz de transmisión H , cada elemento h_{ij} representa la función de transferencia compleja entre la antena transmisora j y la antena receptora i , esta se conforma de la siguiente manera, donde N es el número de antenas de transmisión y M son las antenas en recepción:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{NM} \end{bmatrix}$$

Figura 2.3. Matriz H.

2.2 Esquemas de funcionamiento

Actualmente existen dos esquemas de funcionamiento de los sistemas MIMO, diseñados exclusivamente para sistemas que utilizan más de dos antenas, tanto en transmisión como en recepción. Estos son: la diversidad espacial y la multiplexación espacial. A continuación se explica el funcionamiento de dichos esquemas.

2.2.1 Diversidad espacial

En este esquema, por las antenas se envía la misma información, por lo tanto la señal original llega a todas las antenas receptoras mediante señales directas o reflejadas, donde se recogen y se combinan para recuperar la información. Enfrenta el desvanecimiento transmitiendo por cada antena la misma información simultáneamente como se ilustra en la figura 2.4. [11] [12].

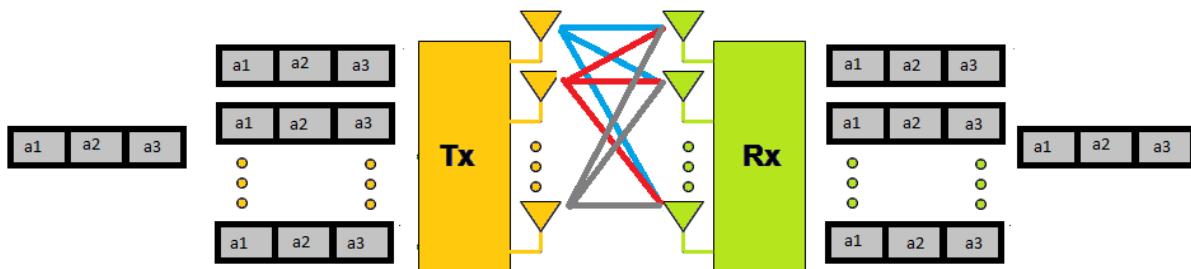


Figura 2.4. Diversidad espacial.

La implementación de este esquema mejora la calidad de la señal recibida (BER), ya que permite el envío de la misma señal por varias antenas, generando redundancias, las cuales contrarrestan los efectos ocasionados por desvanecimientos en la señal con una buena técnica de detección.

2.2.2 Multiplexación espacial

La cadena de símbolos a transmitir se divide entre el número de antenas usadas en el transmisor, generando subcadenas de información. Las subcadenas se envían simultáneamente desde las antenas transmisoras dentro de la misma banda de frecuencias. La señal al propagarse genera múltiples caminos, con lo cual cada antena receptora observa una superposición de las señales transmitidas [12] [13].

Las antenas transmisoras introducen una “firma” espacial a los datos, con el fin de que cada antena receptora pueda reconocer y recuperar la información que le pertenece, reconstruyendo las subcadenas que son multiplexadas para entregar los datos originales al destino. La principal ventaja de la multiplexación espacial, es el aumento considerable de la capacidad de transmisión, que lo ubica por encima de otros esquemas. Existen varios esquemas de multiplexación espacial de los cuales se mencionan los dos más importantes:

- Codificación Vertical V-BLAST
- Codificación Diagonal D-BLAST.

2.2.2.1 Codificación vertical V-BLAST

Consiste en dividir el flujo de datos entrante entre todas las antenas transmisoras disponibles, de esta forma se tiene un número de flujos igual al número de antenas transmisoras, codificados en símbolos dependiendo el tipo de constelación utilizada. Todos los símbolos son transmitidos de forma simultánea en forma de ráfagas, donde las antenas se separan una semilongitud de onda como mínimo [14] [15].

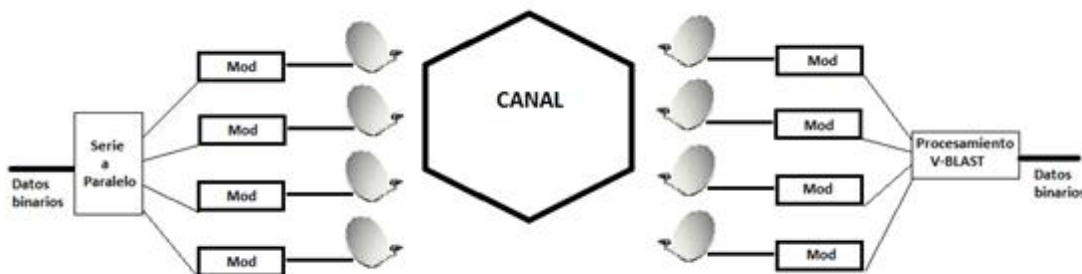


Figura 2.5. Procesamiento V-Blast en un sistema MIMO

2.2.2.2 Codificación diagonal D-BLAST

Se basa en aprovechar la diversidad espacial y para ello se distribuyen los flujos de datos de forma circular, para que la transmisión del flujo o capa de datos se realice de forma tal que participen todas las antenas. En D-BLAST se utiliza la estructura de codificación en capas, en donde cada fila del cuadro representado en la figura 2.6 describe los datos que se transmiten por antena y cada columna indica cada ráfaga que se transmite en un determinado tiempo τ [15].

Cuando la transmisión inicia, se realiza por medio de una capa a través de la antena 1, como se presenta en la figura 2.6. Solamente hasta el instante de tiempo 7τ , las seis antenas transmiten de forma simultánea. Por lo tanto, se presenta un uso inadecuado del canal, representado en el triángulo que se ilustra en la parte inferior de la capa A, debido a que tan solo una antena transmite, estando todas las demás sin ser utilizadas. Lo mismo ocurre cuando se finaliza la transmisión.

La decodificación de la información enviada, se realiza esquemáticamente, siguiendo un patrón que inicia desde el principio de la codificación. Cada paquete de la capa A cuenta con un código introducido en la codificación y se utiliza en la decodificación para ordenar todos los paquetes que conforman esta capa [16].

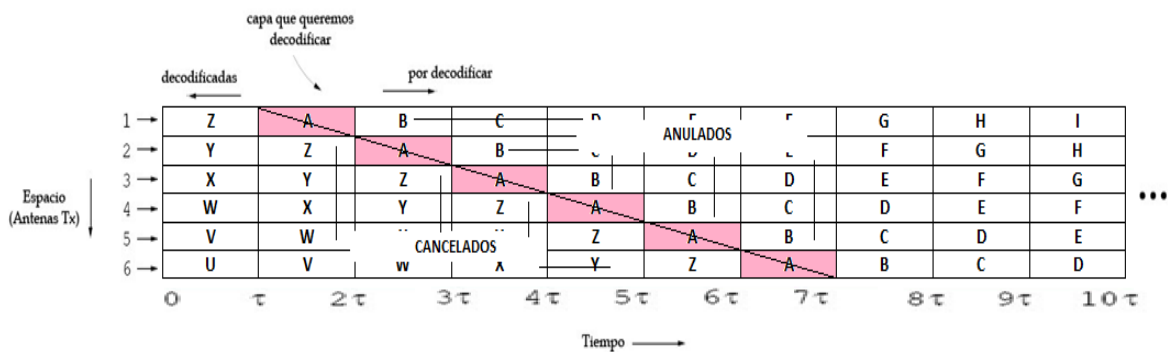


Figura 2.6. Arquitectura D-BLAST

2.2.2.3 Inconvenientes de la arquitectura D-BLAST

El inconveniente que se presenta al decodificar una capa, es la de depender de la correcta decodificación de las capas anteriores, debido a lo siguiente: en la fase de cancelación, se eliminan totalmente los símbolos de las capas ya decodificadas y si existió un error al decodificar una de las capas, este se propagará por las siguientes. Este inconveniente es conocido como propagación de error y se presenta en D-BLAST [16].

Una forma eficiente de reducir la propagación de errores, es proteger cada capa con códigos de corrección de error bastante robustos, aunque esta solución no está exenta de incidentes impredecibles. Para atenuar los daños ocasionados en la transmisión, cuando existen inconvenientes que conllevan a la propagación de errores en la versión D-BLAST, es recomendable reinicializar la transmisión y detenerla durante varias capas, para después empezar la transmisión de una nueva capa, sin que sea necesaria la transmisión de las anteriores.



Pese a lo anterior, la inicialización de la transmisión conlleva a nuevos problemas, dado que detener la transmisión ocasiona la aparición de retardo y disminución en la velocidad de transmisión. Además, cuando se varían las condiciones del canal con frecuencia y los errores presentes son pocos, la constante inicialización del sistema genera incremento en el costo del servicio prestado.

Otro inconveniente de la multiplexación D-BLAST es el aumento del retardo, debido a la utilización de una arquitectura diagonal. La multiplexación D-Blast no envía información por más de una antena de forma simultánea, ocasionando un retardo en la transmisión, además, es necesario almacenar los datos temporalmente exigiendo un gasto adicional de recursos. Cuando se utilizan ráfagas de larga duración, el efecto de retardo es mucho mayor y si las ráfagas empleadas son pequeñas, se reduce el retardo pero se evidencia más el desperdicio de capacidad del canal, en el momento de la inicialización de la transmisión.

2.2.3 Selección del esquema utilizado

Teniendo en cuenta que la diversidad espacial se destaca por mejorar el desempeño de una comunicación inalámbrica y la multiplexación espacial aumenta la capacidad del canal inalámbrico, para este trabajo de grado se escogió implementar el esquema de multiplexación espacial en el transmisor evaluando el desempeño de los sistemas MIMO, porque estos aumentan la capacidad en comparación con otros tipos de sistemas inalámbricos. Entre las dos alternativas que ofrece la multiplexación espacial se escogió V-BLAST por las siguientes razones:

- Capacidad de transmitir al tiempo por distintos canales la información deseada.
- Presenta menores tasas de retardo, las pérdidas son minimizadas y la dificultad de implementación computacional se reduce.

2.3 Modelado del canal MIMO

En una simulación de comunicaciones inalámbricas, el modelo de canal utilizado es muy importante. Para este trabajo se escogieron los modelos de canal AWGN y Rayleigh, los cuales brindan las condiciones ideales requeridas para modelar el funcionamiento de los sistemas MIMO. Las ventajas y características de estos modelos se explican a continuación.



2.3.1 Modelo de canal AWGN

AWGN Canal de Ruido Blanco Gaussiano (“*Additive White Gaussian Noise*”) es un tipo de modelo de canal universal utilizado para realizar el análisis de distintos esquemas de modulación. Se basa en agregar ruido blanco Gaussiano a la señal transmitida por el canal, esto implica que la magnitud en respuesta de la frecuencia del canal será plana, logrando un ancho de banda ilimitado o infinito, con fase lineal para todas las frecuencias.

Estas condiciones ideales permiten que la transmisión de una señal modulada se logre sin ningún tipo de pérdida en la amplitud, sin distorsión en la fase y sin desvanecimiento [17]. La única distorsión presente en la transmisión es la producida por el canal AWGN, la señal en el transmisor se describe por la ecuación 2.2:

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (2.2)$$

Donde $n(t)$ es ruido blanco Gaussiano.

El ruido Gaussiano es denominado blanco, por ser un proceso aleatorio estacionario, con densidad espectral de potencia plana para todas las frecuencias. Se asume que su densidad espectral de potencia es la mitad de la densidad espectral de potencia de ruido N_0 :

$$N(f) = \frac{N_0}{2}, \quad -\infty < f < \infty \quad (2.3)$$

Esto indica que el proceso aleatorio posee potencia infinita, partiendo del teorema de Wiener-Khinchine [18], la función de auto-correlación del canal AWGN es:

$$R(\tau) = E\{n(t)n(t - \tau)\} = \int_{-\infty}^{\infty} N(f) e^{j2\pi f\tau} df \quad (2.4)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{N_0}{2} e^{j2\pi f\tau} df = \frac{N_0}{2} \delta(\tau) \quad (2.5)$$

Donde $\delta(\tau)$ es la función delta de Dirac, indicando que las muestras de ruido al ser no correlacionadas y tener distribución Gaussiana son independientes.



En cualquier instante de tiempo, la amplitud de $n(t)$ obedece a la función de densidad de probabilidad Gaussiana con media cero dada por la ecuación 2.6:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2.6)$$

Donde x se usa para representar el valor del proceso aleatorio $n(t)$ y σ^2 es la varianza del proceso aleatorio. Para los canales AWGN, $\sigma^2 = \infty$ ya que σ^2 es la potencia de ruido, la cual es infinita para este tipo de canal. Sin embargo, cuando $r(t)$ se correlaciona con una función ortogonal $\phi(t)$, el ruido en la salida tiene una varianza finita [18][19]. Esto indica lo siguiente:

$$r = \int_0^T r(t)\phi(t)dt = s(t) + n(t) \quad \{0 \leq t \leq T\} \quad (2.7)$$

Donde

$$s = \int_0^T s(t)\phi(t)dt \quad (2.8)$$

Y

$$n = \int_0^T n(t)\phi(t)dt \quad (2.9)$$

La varianza de n será:

$$\begin{aligned} E\{n^2\} &= E\left\{\left[\int_0^T n(t)\phi(t)dt\right]^2\right\} \\ &= E\left\{\int_0^T \int_0^T n(t)\phi(t)n(\tau)\phi(\tau)dtd\tau\right\} \\ &= \int_0^T \int_0^T E\{n(t)n(\tau)\}\phi(t)\phi(\tau)dtd\tau \\ &= \int_0^T \int_0^T \frac{N_0}{2}\sigma(t-\tau)\phi(t)\phi(\tau)dtd\tau \\ &= \frac{N_0}{2} \int_0^T \phi^2(t)dt = \frac{N_0}{2} \quad (2.10) \end{aligned}$$

Crear un canal AWGN es imposible, dado que ningún canal puede llegar a tener un ancho de banda infinito, pero en ocasiones, el ancho de banda de la señal transmitida es menor al ancho de banda del canal, caso en el cual se presentan características aproximadas a las ofrecidas por un canal AWGN [19].



En este documento, se realizan análisis considerando canales AWGN y Rayleigh, las razones por las cuales se trabaja con AWGN son:

- Varios tipos de canales se aproximan a las condiciones ofrecidas por un canal AWGN, por lo tanto los resultados se pueden emplear de forma directa.
- El ruido blanco Gaussiano se encuentra presente en todas las comunicaciones sin excepción, sin importar la existencia o no de fuentes de distorsión como son un ancho de banda limitado, desvanecimiento, multitrayecto y demás interferencias. La calidad en un canal AWGN puede servir como un estándar en la evaluación de la degradación [19] [20].

2.3.2 Modelo de canal Rayleigh

En las comunicaciones inalámbricas, se encuentran escenarios en donde la propagación de la señal original se realiza por diversos caminos, los cuales tienen el nombre de multitrayectorias. Estas se forman por las reflexiones y/o difracciones de las señales transmitidas sobre superficies ubicadas en el espacio existente entre el transmisor y el receptor, superficies como montañas, edificios, árboles entre otros obstáculos, que por lo general hacen parte de la trayectoria de las señales [21] [22].

En el receptor se produce la suma vectorial de las señales recibidas, el resultado de dicha suma es interferencia, la cual puede tener una reacción constructiva o destructiva sobre la señal original. La interferencia ocasiona variaciones en la potencia de la señal original, generando desvanecimiento. Un canal con presencia de multitrayectorias puede ser modelado haciendo uso de la distribución Rayleigh, que se expresa mediante la función de densidad de probabilidad representada en la ecuación 2.11:

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2.11)$$

En la ecuación 2.11, x representa la amplitud de la señal recibida, la cual tiene comportamiento aleatorio; σ equivale a la desviación estándar de la distribución gaussiana asociada a la distribución Rayleigh, equivalente al valor más probable de x .

La figura 2.7 representa un modelo de canal Rayleigh:

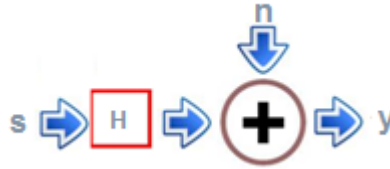


Figura 2.7. Modelo de canal.

La ecuación 2.12 refleja el modelo matemático de la figura 2.7 para un canal Rayleigh:

$$Y = H * s + n \quad (2.12)$$

Donde en el dominio de la frecuencia, H ejerce un efecto multiplicativo o se comporta como función de transferencia, aportando ganancia a la señal s transmitida, H es la matriz del canal, n es el ruido presente en el canal, $*$ es la convolución realizada entre la función de transferencia y la señal s transmitida y Y es la señal recibida.

2.4 Recepción en sistemas MIMO

La parte más crítica de los sistemas MIMO se encuentra en el receptor, si se tiene en cuenta que recuperar la señal recibida en una sola antena presenta diversos inconvenientes, en este caso los inconvenientes aumentan, ahora, ya no es una antena sino son arreglos de dos o más antenas. Para implementar dichos sistemas, en los últimos años se han realizado investigaciones sobre mecanismos capaces de detectar las señales enviadas desde el transmisor. Dichos mecanismos son conocidos como algoritmos de detección, los cuales tienen distintos niveles de complejidad, dependiendo de su nivel de eficiencia. Los sistemas más eficientes no han podido ser implementados de forma masiva debido a la complejidad que esto conlleva [8].

Los algoritmos de detección se dividen en dos tipos: los óptimos y los subóptimos. Los primeros son algoritmos de elevada complejidad, la cual se incrementa drásticamente a medida que aumenta el tamaño de la constelación, asociada con el esquema de modulación empleada; los algoritmos óptimos más reconocidos son el Esférico y el algoritmo "*Schnorr Euchner*". Los segundos, se caracterizan por tener una baja complejidad y a la vez un pobre desempeño; entre los más reconocidos figuran el ZF, ZF DFE, MMSE y MMSE DFE. Por lo tanto, la diferencia entre los algoritmos óptimos y subóptimos es considerable, tanto en



rendimiento, como en dificultad de implementación [7]. El algoritmo de detección que ofrece los mejores resultados en un sistema MIMO, es el de máxima verosimilitud, pero no es implementable debido a su alta complejidad [9] [10].

2.4.1 “Zero Forcing” ZF

El receptor ZF separa perfectamente las señales convirtiendo el canal en subcanales paralelos, logrando la eliminación de la interferencia cocanal, sin embargo no tiene en cuenta el efecto del ruido, generando un problema de amplificación de ruido [23].

Para resolver la ecuación 2.1 en búsqueda de los datos del vector transmitido \mathbf{s} , se debe encontrar una matriz \mathbf{W} que cumpla con la condición

$$\mathbf{W}\mathbf{H} = \mathbf{I} \quad (2.13)$$

Donde \mathbf{W} se expresa en la ecuación 2.14,

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}^H\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^H \quad (2.14)$$

Esta matriz es también conocida como la pseudo-inversa de una matriz. La solución de la ecuación 2.1:

$$\mathbf{S} = \mathbf{W}\mathbf{Y} - \mathbf{n} \quad (2.15)$$

Donde \mathbf{S} es el vector con la señal recibida, \mathbf{W} es la pseudo-inversa, \mathbf{Y} es la señal recibida y \mathbf{n} representa el ruido presente en el canal. El vector \mathbf{S} en recepción es comparado con el vector transmitido para hallar la BER resultante.

2.4.2 “Minimum Mean Square Error” MMSE

MMSE es una alternativa para solucionar la cantidad de interferencia cocanal y la amplificación de ruido que maneja el receptor ZF, limitando el efecto del ruido a costa de permitir una ligera interferencia entre las señales, MMSE minimiza el total de errores generados por el ruido y la interferencia mutua entre señales cocanal [23].

El receptor MMSE es menos sensible al ruido, bajo el costo de reducir la calidad en la separación de la señal. La interferencia cocanal no está perfectamente separada. En caso de una SNR alta, el receptor MMSE se convierte en un receptor ZF [23].



El enfoque de MMSE se basa en encontrar un coeficiente de la pseudo-inversa \mathbf{W} que minimice el criterio para resolver la ecuación 2.1, buscando los datos del vector transmitido igual que en ZF. La pseudo-inversa para MMSE está dada por:

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + N_0 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^H \quad (2.16)$$

Donde N_0 es la densidad de potencia de ruido e \mathbf{I} es la matriz identidad. Al comparar la ecuación del decodificador “Zero Forcing” con la de MMSE se deduce que cuando el ruido es igual a cero, las ecuaciones de la matriz pseudo-inversa son iguales. La solución es igual a la ecuación 2.14 de Zero Forcing.

2.4.3 “Maximum Likelihood Receiver” ML

El detector ML elige el valor de la distancia euclidiana parcial (PED) más corta entre el vector recibido \mathbf{Y} con el mensaje \mathbf{S} de la ecuación 2.1 [24].

La ecuación general de ML es utilizada para resolver la ecuación 2.1, donde se buscan los datos del vector transmitido S_{ML} con la menor distancia parcial euclidiana PED. Esta ecuación es la siguiente:

$$S_{ML} = \underset{\arg\min}{\text{argmin}} \|\mathbf{Y} - \mathbf{H}\mathbf{S}\|^2 \quad (2.17)$$

Donde S_{ML} es el vector de la señal transmitida con la menor PED, \mathbf{H} es la matriz del canal y \mathbf{Y} es la señal recibida. ML presenta un desempeño óptimo en términos de su tasa de error, pero tiene una alta complejidad computacional debido a las estimaciones que debe realizar para detectar el símbolo transmitido. Dicha complejidad aumenta de manera exponencial con el número de antenas transmisoras y el orden de modulación. El receptor ML busca a través del vector de la constelación, el que tiene más probabilidad de haber sido transmitido. El número de operaciones a evaluar es 2^{NtMc} , donde Nt es el número de antenas transmisoras y Mc es el orden de modulación.

En las soluciones ML o cuasi-ML (Algoritmo Esférico) se realiza una búsqueda en árbol, que puede ser optimizada alcanzando complejidades polinómicas en cierto margen de relación señal-ruido. El modelado en árbol se obtiene de los elementos del espacio como caminos dentro de un grafo, la función objetivo se define en términos de las distancias euclidianas y el problema de detección es reformulado a encontrar un camino con la menor PED entre un nodo inicial del grafo y un nodo final [25].

Con el fin de especificar la complejidad del algoritmo ML se analiza un sistema 2x2 con modulación QAM, considerando el árbol del problema, representado en la figura 2.8, el nodo raíz estará en el nivel 2 y cada nodo tendrá 2^2 hijos. Con el algoritmo ML, si N_t es el número de antenas y M_c el número de símbolos usados por el esquema de modulación, las comparaciones por símbolo, diseñadas para determinar todas las posibles soluciones del símbolo enviado serían $2^{N_t M_c} = 2^{2 \times 2} = 16$ comparaciones por cada vector de símbolos transmitidos.

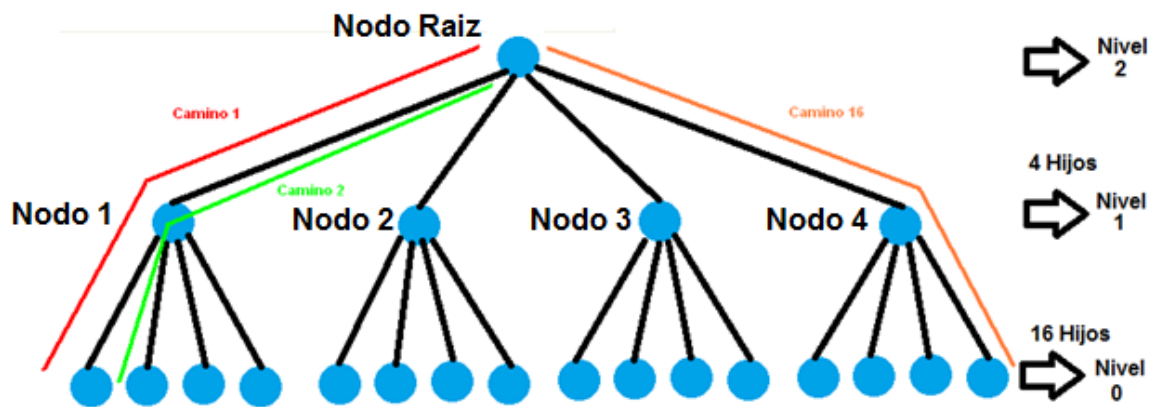


Figura 2.8. Árbol de búsqueda para un sistema 2X2 QAM en ML.

En la figura 2.8 donde cada nodo representa los símbolos de la modulación, ML recorre dieciséis caminos buscando la PED más corta para una configuración de un arreglo 2x2 con modulación QAM, generando sobrecarga computacional y aumento en el grado de complejidad.

2.4.4 Algoritmo Esférico

El Algoritmo Esférico trabaja estableciendo una esfera de radio d , centrada en el símbolo o punto recibido s con el fin de reducir la complejidad del sistema. En la figura 2.9 se expone la interpretación geométrica [24].

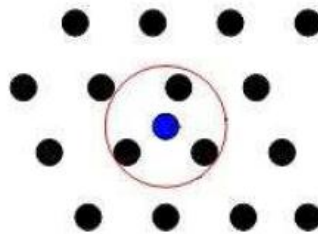


Figura 2.9. Esférico.



En la figura 2.9, en negro se encuentran todos los puntos recibidos y en azul se muestra la señal recibida. Los puntos dentro de la esfera corresponden a las posibles soluciones del sistema, al radio de la esfera se le disminuye su valor, con el fin de eliminar los puntos más alejados (menos probables a ser una solución). Finalmente, cuando no hay ningún punto dentro de la esfera, se da como solución el último punto en ser eliminado [24].

El algoritmo Esférico tiene algunos inconvenientes, entre ellos [24]:

- Radio de la esfera: un radio grande en la esfera puede tomar numerosos puntos aumentando la complejidad, un radio pequeño puede no contener algún punto que puede llegar a ser una solución [24].
- El paso de decrecimiento: se denomina así a la reducción del radio de la esfera. Este parámetro no tiene tanta importancia como el anterior, pero es el que decide la velocidad de convergencia del algoritmo. Un paso muy pequeño puede tardar en encontrar un único candidato, un paso mayor puede saltarse candidatos [24].

Con el objetivo de realizar un análisis del algoritmo Esférico se considera un sistema MIMO con M antenas en transmisión y N antenas en recepción. La señal recibida está dada por:

$$Y = HS + n \quad (2.18)$$

En la ecuación 2.18, Y pertenece a los complejos y es un vector de dimensión $1 \times N$, H es una matriz compleja de dimensión $N \times M$, S pertenece a los complejos y es el vector transmitido de dimensión $1 \times M$ cuya entrada tiene partes reales e imaginarias, n pertenece a los complejos y es el vector de ruido con dimensión $1 \times N$, los elementos del vector s son valores establecidos en un conjunto Ω [24].

Para 16QAM el conjunto de amplitudes está dado por:

$$\Omega = \{-3, -1, 1, 3\}$$

Y símbolos:

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



La búsqueda del vector transmitido se vuelve compleja para mayores órdenes de modulación debido al aumento de los puntos de la constelación, esto torna más difícil hallar del vector recibido. Por lo tanto, en lugar de buscar por todo el espacio definido por las combinaciones, el algoritmo Esférico resuelve este problema mediante la búsqueda sólo sobre combinaciones que se encuentran dentro de una esfera de radio d como se observa en la ecuación 2.19 [24] [26].

El punto Hs está dentro de la esfera de radio d .

$$d^2 \geq \|y - Hs\|^2 \quad (2.19)$$

Para resolver el problema de buscar por todo el espacio definido por las combinaciones, se utiliza la factorización QR de tal forma que resulta la ecuación 2.20.

$$H = [Q_1 \quad Q_2] \begin{bmatrix} R_{m \times m} \\ 0_{(n-m) \times m} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Donde Q_1 son las M primeras columnas de H y Q_2 , las $M-N$ restantes. R es una matriz triangular superior de orden $M \times N$. De esta manera, se puede reescribir la ecuación 2.19 de la forma:

$$\begin{aligned} d^2 &\geq \|y - [Q_1 \quad Q_2] \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} s\|^2 = \left\| \begin{bmatrix} Q_1^H \\ Q_2^H \end{bmatrix} y - \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} s \right\|^2 \\ &= \|Q_1^H y - R s\|^2 + \|Q_2^H y\|^2 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Reagrupando la ecuación 2.21 se tiene la expresión 2.22:

$$d^2 - \|Q_2^H y\|^2 \geq \|Q_1^H y - R s\|^2 \quad (2.22)$$

Definiendo $Y = Q_1^H X$ y $d'^2 = d^2 - \|Q_2^H X\|^2$ se puede expandir la ecuación 2.22 aprovechando la triangularidad de R , obteniendo la ecuación 2.23:

$$d'^2 \geq \sum_{i=1}^m (y_i - \sum_{j=1}^m r_{i,j} s_j)^2 \quad (2.23)$$

Donde $r_{i,j}$ corresponde a la entrada (i,j) de la matriz R . La ecuación 2.23 se puede escribir de la forma representada por la ecuación 2.24:

$$d'^2 \geq (y_m - r_{m,m} s_m)^2 + (y_{m-1} - r_{m-1,m} s_m - r_{m-2,m-1} s_{m-1})^2 + \dots \quad (2.24)$$

Como se aprecia, el primer término depende solo de S_m . Para que se cumpla la ecuación 2.24 se debe cumplir que:

$$d'^2 \geq (y_m - r_{m,m}S_m)^2 \quad (2.25)$$

S_m se situaría dentro del intervalo definido por la ecuación 2.26:

$$\left[\frac{-d'+y_m}{r_{m,m}} \right] \leq S_m \leq \left[\frac{d'+y_m}{r_{m,m}} \right] \quad (2.26)$$

Esto redondea la ecuación hacia el entero superior e inferior más cercano. Una vez se fija S_m y se define a d' como

$$d'^2_{m-1} = d'^2 - (y_m - r_{m,m}S_m)^2 \quad (2.27)$$

Y y'_{m-1}

$$y'_{m-1} = y_{m-1} - r_{m-1,m}S_m \quad (2.28)$$

Se obtiene la ecuación 2.29:

$$\left[\frac{-d'_{m-1}+y'_{m-1}}{r_{m-1,m-1}} \right] \leq S_m \leq \left[\frac{d'_{m-1}+y'_{m-1}}{r_{m-1,m-1}} \right] \quad (2.29)$$

El problema en ML se muestra como un árbol de búsqueda. Para un problema MIMO 4x4 con modulación BPSK, donde la complejidad del sistema aumenta a $2^{N_t \cdot M_c}$ (N_t es el número de antenas en transmisión), N_t equivale a 4 y el número de comparaciones por símbolo es $2^{4 \cdot 1} = 16$, posibles soluciones en ML. Con el fin de reducir la complejidad se implementa el algoritmo Esférico.

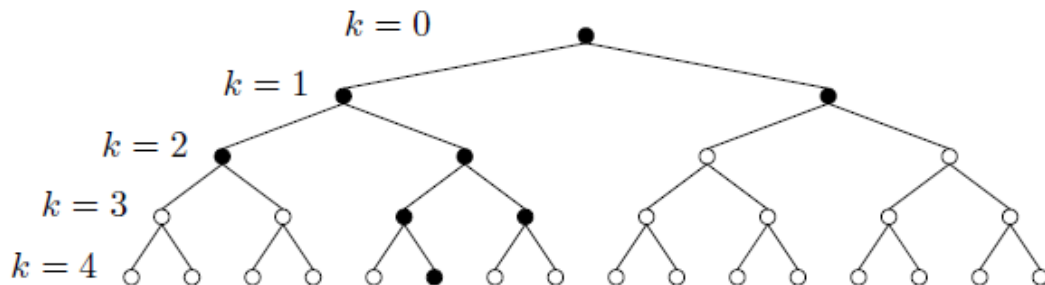


Figura 2.10. Árbol de búsqueda para un sistema 4x4 QPSK en Esférico.



El algoritmo Esférico busca la menor PED en el nivel 1, después lo selecciona y busca la mejor PED en el nivel 2 de los hijos de la rama del árbol, podando y limitando la exploración del árbol, este proceso se repite hasta llegar al último nivel, los nodos visitados por el decodificador Esférico se muestran en negro en la figura 2.10, con lo cual se reduce la búsqueda y la complejidad del sistema, a diferencia de ML, el cual realizaba la búsqueda en todos los nodos del árbol como se observa en la figura 2.9.

2.5 Modulación digital

Los sistemas MIMO al igual que los sistemas inalámbricos tradicionales, cuentan con sistemas de modulación digital cuya finalidad es mejorar la calidad de transmisión, aprovechar adecuadamente el ancho de banda del canal y aumentar las velocidades de transferencia. En este trabajo de grado se tuvieron en cuenta las modulaciones QPSK, QAM y 16QAM, altamente utilizadas en la industria de las telecomunicaciones. A continuación se describe sus características y el funcionamiento [27].

2.5.1 Modulación QAM (Modulación de amplitud en cuadratura)

Se basa en enviar el mensaje o información representándolo en la fase y en la amplitud de la señal que se transmite. Esencialmente, se transmiten dos mensajes independientes entre sí, por el mismo camino, para lograrlo, se modula una misma portadora la cual se desfasa 90° entre los 2 mensajes. Lo anterior se realiza para formar dos canales ortogonales en el mismo ancho de banda disponible, haciendo que la eficiencia mejore de forma considerable [28].

16-QAM emplea un alfabeto de 16 símbolos, utiliza palabras de cuatro bits ($J=4$). A continuación se visualiza la constelación de 16QAM:

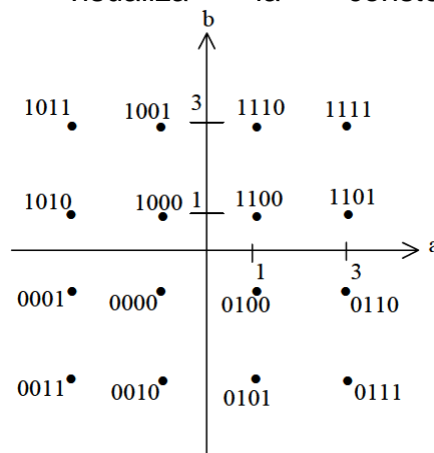


Figura 2.11. Constelación de 16-QAM



En la figura 2.11 se observa que los dos primeros bits son aquellos que especifican el cuadrante en el que se encuentra el símbolo y los otros dos, especifican su posición en el cuadrante. Si se llegara a rotar la constelación 90° , los dos últimos bits no cambiarían [24]. Los símbolos correspondientes a esta modulación son los siguientes:

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

La fórmula para la probabilidad de error del símbolo relativa a la modulación QAM M-aria está dada por:

$$P_e \cong 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \text{ferc} \left(\sqrt{\frac{E_o}{N_o}}\right) \quad (2.30)$$

Donde **Pe** es la probabilidad de error del símbolo, **M** es el número de símbolos, **Eo** la energía de símbolo, **No** el ruido presente en la comunicación y **Ferc** es la función de error de Gauss.

Existen inconvenientes que en ocasiones limitan el funcionamiento de esta modulación, a continuación se menciona uno de ellos:

- 16-QAM eleva considerablemente la eficiencia del ancho de banda del canal, pero a mayor eficiencia obtenida, mayor es la susceptibilidad al ruido de las señales transmitidas a través del canal de comunicación.

2.5.2 Modulación QPSK (“*Quadrature Phase Shift Keying*”)

Su funcionamiento se basa en transmitir la información representándolo en fase, la fase de la portadora se divide en cuatro valores espaciados igualmente. Dichos valores son los siguientes: 0 , $\pi/2$, π y $3\pi/2$. Cada uno corresponde a cada símbolo y matemáticamente, una señal QPSK se define según la siguiente expresión:

$$S_{QPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \left[2\pi f_c t + (i-1) \frac{\pi}{2} \right] \quad 0 \leq t \leq T \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2.31)$$

Donde **E** es la energía de símbolo, **t** es el tiempo del símbolo, que es igual a dos veces el período de bit y **Fc** es la frecuencia utilizada.

Una señal QPSK puede graficarse en un diagrama de constelación bidimensional con cuatro puntos, a partir de esta constelación se establece un diagrama de estado para la señal, como se muestra en la figura 2.12:

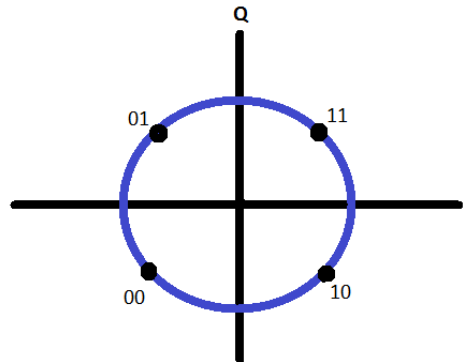


Figura 2.12. Constelación QPSK

Un símbolo suministra 2 bits, se divide el flujo de cada bit formando los símbolos como I y Q , donde el diagrama de la constelación muestra 4 símbolos equiespaciados. La asignación de bits a cada símbolo se realiza mediante el código Gray, esto consiste en que, entre dos símbolos adyacentes los símbolos solo se diferencian en 1 bit, se escoge así para minimizar la tasa de bits erróneos [29].

La fórmula para la probabilidad promedio del error de símbolo relativa a la modulación QPSK es [24]:

$$P_e \cong \text{ferc} \left(\sqrt{\frac{E}{2N_0}} \right) \quad (2.32)$$

Donde, P_e es la probabilidad de error del símbolo, E es la energía de símbolo, N_0 el ruido presente y $Ferc$ la Función de error de Gauss.

Al igual que en 16-QAM existen inconvenientes. A continuación se mencionan los inconvenientes más relevantes:

- Problema en el desfasador: en QPSK se modulan portadoras ortogonalmente y para ello se emplea un oscilador, que ajusta la frecuencia del sistema y un dispositivo desfasador realiza un corrimiento en fase de 90° , para producir la portadora en cuadratura. El problema se ocasiona cuando el desfasador no realiza el desfasamiento deseado, inmediatamente se presenta un cambio en las frecuencias que llegan al receptor ocasionando pérdidas, interferencias y en el peor de los casos, la pérdida total de los datos transmitidos.



- El objeto principal de esta modulación es aumentar la eficiencia del ancho de banda del canal, pero la consecuencia es una mayor vulnerabilidad al ruido en los datos que se transmiten.

2.5.3 Similitudes entre QAM y QPSK

Teniendo en cuenta que en este trabajo de grado se simulan escenarios MIMO en donde se trabaja con modulaciones digitales QPSK y QAM, cabe aclarar que el desempeño que ofrecen estas dos modulaciones es el mismo y debido a eso, en ocasiones sólo se utiliza uno de los dos tipos de modulación en los análisis desarrollados en el capítulo cinco. A continuación se explica matemáticamente la relación entre las modulaciones QAM y QPSK.

Cuando se utiliza la técnica QPSK, todos los símbolos son conformados con el mismo valor de amplitud, variando la fase de la señal. En el caso de QAM la variación se da en amplitud y fase para cada símbolo.

La energía transmitida en la modulación QAM M-aria es variable en cuanto su valor instantáneo depende del símbolo particular que se transmite, por tanto resulta más lógico expresar la probabilidad de error en términos del valor promedio de la energía transmitida y no en los de E_0 . Suponiendo que los L niveles de amplitud de la componente en fase o en cuadratura son igualmente probables, se tiene la ecuación 2.38:

$$E_{pro} = 2 \left[\frac{2E_0}{L} \sum_{i=1}^{L/2} (2i - 1)^2 \right] \quad (2.33)$$

Donde el factor multiplicador 2, fuera de los corchetes toma en cuenta las contribuciones iguales hechas de los componentes en fase y en cuadratura, los límites de la sumatoria y el factor multiplicador 2, dentro de los corchetes explican la naturaleza simétrica de los niveles de amplitud pertinentes alrededor de cero. Al efectuar la sumatoria de la ecuación 2.33 se obtiene la ecuación 2.34 [30]:

$$E_{Pro} = \frac{2(M-1)E_0}{3} \quad (2.34)$$

En consecuencia, se puede reescribir la ecuación 2.32 en términos de E_{Pro} :

$$P_e \cong 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \text{ferc} \left(\sqrt{\frac{3E_{pro}}{2(M-1)N_0}} \right) \quad (2.35)$$

Donde, **P_e** es la probabilidad de error del símbolo, **E_{pro}** la energía de símbolo, **N_0** el ruido presente, **M** el orden de la modulación y **$Ferc$** la función de error de Gauss.



Cuando $M=4$ es de interés especial, la constelación de señales para este valor de M es igual a QPSK. En realidad haciendo $M=4$ en la ecuación 2.35 y $E_{Pro}=E$, donde E es la energía por símbolo, se encuentra que la formula resultante para la probabilidad del error se vuelve idéntica a la ecuación 2.32 de QPSK [30].



3. Metodología para el desarrollo

Este capítulo presenta el desarrollo de la metodología de trabajo para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, planteando los inconvenientes y posibles soluciones, teniendo como base los objetivos de la simulación, la escogencia de la herramienta de simulación, plan de pruebas, proceso de desarrollo de la simulación y análisis de la simulación.

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 punto a punto, se resume en el diagrama de flujo que se muestra en la figura 3.1[31].

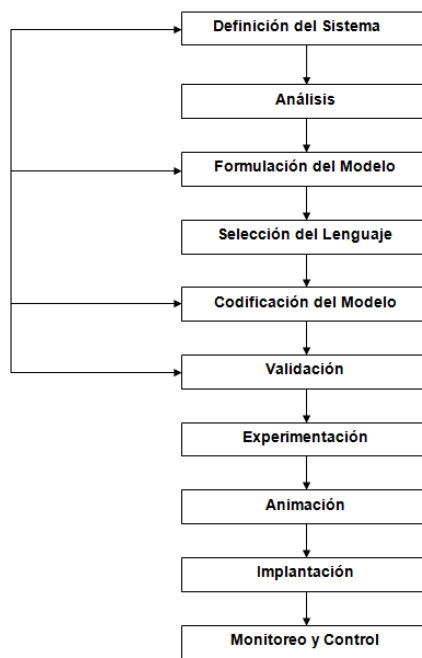


Figura 3.1. Desarrollo del modelo de simulación



3.2 Fase 1 Definición del sistema

Cada vez que se realiza un estudio, se inicia con una descripción detallada del problema o del sistema a desarrollar, en este caso la simulación de un sistema MIMO. Al realizar la descripción del estudio es importante percatarse de que dicha descripción esté completa, con el fin de que exista una correcta identificación de aspectos fundamentales como los objetivos, las variables de decisión, las restricciones, la medida de efectividad y las variables no controlables y su comportamiento estadístico.

En este trabajo de grado dicha descripción se realiza definiendo todos los parámetros involucrados en el análisis a desarrollar. Estos parámetros corresponden al análisis del desempeño del nivel físico de un sistema MIMO 2x2 y 4x4 punto a punto con multiplexación espacial, empleando modulaciones 16QAM y QPSK; con canales AWGN con desvanecimiento plano y Rayleigh; algoritmos de detección ML, ZF, MMSE y Esférico con conocimiento perfecto del canal.

3.3 Fase 2 Análisis del sistema

En este paso se describen las interacciones lógicas entre las variables de decisión, con el fin de optimizar la medida de efectividad en función de las variables no controlables, se tienen en cuenta siempre las restricciones del sistema. Hay que definir ciertos términos cada vez que se analiza un sistema, estos términos son:

- Cuando se analizar el desempeño del sistema se hace referencia a un conjunto de variables que están definiendo en cualquier instante al sistema, como son E_b/N_0 , BER y cantidad de bits transmitidos; mientras que un evento es el que está representando un acontecimiento instantáneo que modifica el desempeño del sistema.
- Una actividad constituye el conjunto de acciones que se necesitan para ejecutar una operación, es importante para analizar la complejidad de procesamiento de cada algoritmo de detección.
- Una entidad puede ser cualquier objeto dentro del sistema, puede ser estática o dinámica dependiendo de su función, en este último caso se denota como



- una transacción y su principal característica es su movimiento a través de las entidades estáticas del sistema. Las entidades contienen propiedades únicas denominadas atributos, las cuales en este caso se encargan de definir diferencias entre los algoritmos de detección.

En cuanto a la simulación desarrollada, el análisis del sistema es el siguiente:

- Estado del sistema: para la simulación se trabaja con dos tipos de variables denominadas principales y secundarias. Las principales son aquellas que influyen directamente en los resultados obtenidos de la simulación, entre las que están, el número de bits enviados, la BER y el tiempo de simulación. Las variables secundarias en este caso son las que influyen en los resultados obtenidos con las variables principales, entre ellas están el tipo de algoritmo de detección, la modulación utilizada, el número de antenas implementadas y el modelo de canal por el cual se realiza la transmisión.
- Actividad: la actividad principal que se efectúa en la simulación es el proceso de detección de las señales enviadas utilizando los algoritmos de detección. Esta actividad varía en su tiempo de ejecución dependiendo de factores como: el algoritmo de detección, número de antenas y bits enviados, modulación y modelo de canal.
- Entidades: modulación, número de antenas, bits enviados y modelo de canal. Las entidades estáticas corresponden a los algoritmos de detección que dependen directamente del tipo de entidades dinámicas que se estén implementando.

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. Se debe procurar que la definición empleada sea sencilla pero a la vez lo más completa posible. Cuando se generan las interacciones se tiene en cuenta que estas se llevan a cabo a través del tiempo y es recomendable el uso de listas o cadenas de eventos que darán la pauta en el manejo de las variables. Una lista se define como un arreglo en el que se ordenan las transacciones de acuerdo con la secuenciación de eventos en el tiempo. Existen dos tipos de listas: las de eventos futuros, en las cuales la secuencia depende del tiempo de ocurrencia del evento y las de eventos actuales, cuya secuenciación depende de la ocurrencia de otro evento.

En este trabajo de grado se tiene en cuenta este ítem en todos los aspectos que involucran el desarrollo de la simulación, desde el número de antenas utilizadas, pasando por los algoritmos de detección, hasta la interfaz elaborada. Teniendo en cuenta que las variables que involucraron el desarrollo de la simulación son numerosas, se realizaron por separado diagramas de flujo definiendo cada entidad que determina el funcionamiento de un sistema MIMO, según se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3.2.

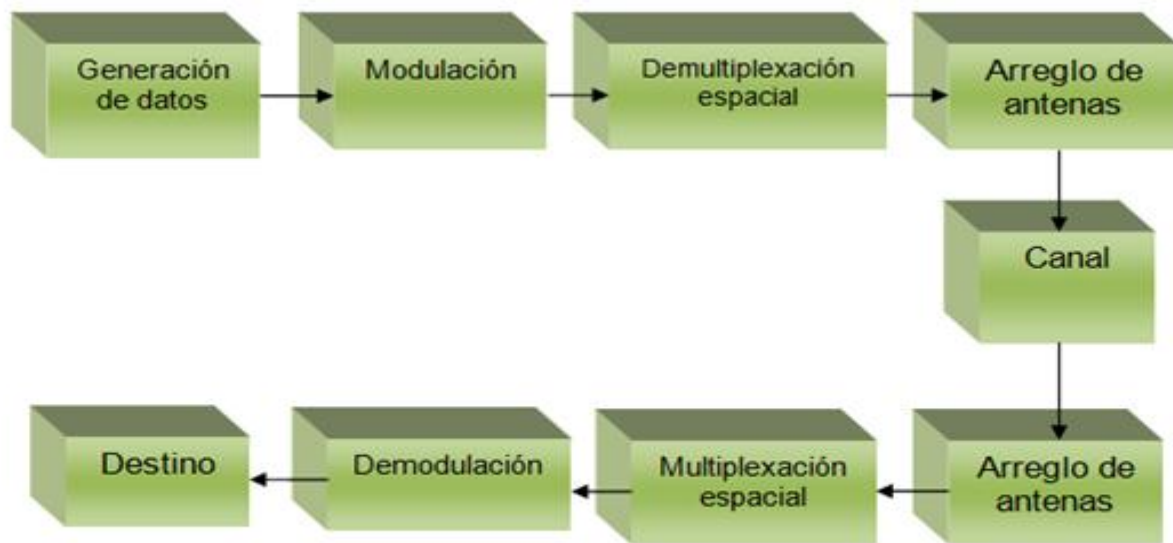


Figura 3.2. Diagrama de bloques de MIMO.

Generación de datos: Es el encargado de proporcionar la información que se desea transmitir. La información generada puede ser de todo tipo: voz, datos y video. Se genera de manera digital en Matlab.

Demultiplexación espacial: Es el encargado de definir la forma en que se distribuirá la información a transmitir por el arreglo de antenas transmisoras. Para este caso se utilizará V-BLAST, ideal para comunicaciones que utilizan los sistemas MIMO.



Modulación: La modulación utilizada en el sistema puede ser QPSK, QAM y 16QAM.

Arreglo de antenas: El arreglo de antenas está conformado por un sistema MIMO 2x2 y 4x4.

Canal: Se emplean canales Rayleigh y AWGN invariantes en el tiempo, con desvanecimiento plano y se asume conocimiento perfecto del canal en el receptor.

Multiplexación espacial: Esquema utilizado en sistemas MIMO dado a los altos niveles de eficiencia que ofrece.

Demodulación: Se emplean procesos asociados con la modulación empleada, para este caso la modulación puede ser QPSK, QAM y 16QAM, cuyos demoduladores son del mismo tipo.

Destino: En este bloque se reciben las señales generadas inicialmente.

3.4.1 Diagrama de Flujo de un Sistema MIMO

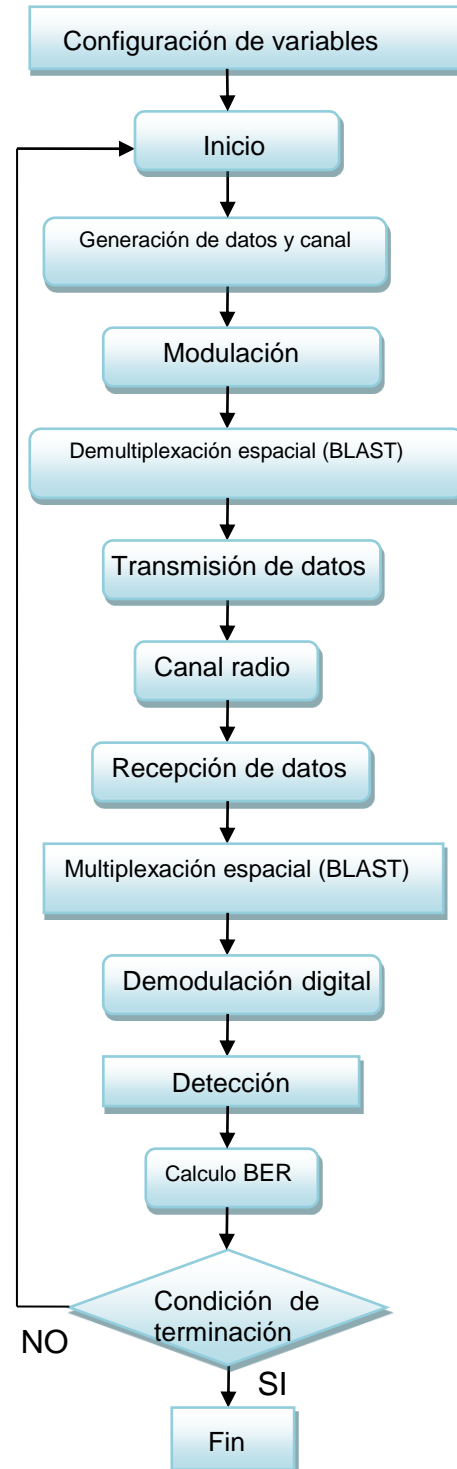


Figura 3.3. Esquemas de comunicación



Este trabajo de grado enfatiza en el análisis del comportamiento de los algoritmos de detección como son ZF, MMSE, Esférico y ML en conjunto con el esquema de multiplexación espacial V-Blast y diferentes arreglos de antenas.

Estos algoritmos se configuran con variaciones en modulación, canal inalámbrico y cantidad de bits a transmitir. La modulación, el canal y la generación de datos son temas ampliamente estudiados, por lo tanto no se profundiza en su estudio por medio de diagramas de flujo, a continuación se realiza la formulación del modelo de los algoritmos de detección y la técnica de multiplexación espacial V-Blast, por medio de diagramas de flujo teniendo en cuenta que estos temas hacen parte de los objetivos del trabajo, razón por lo cual se profundiza en ellos.

3.4.2 Diagramas de flujo de la Multiplexación V-Blast

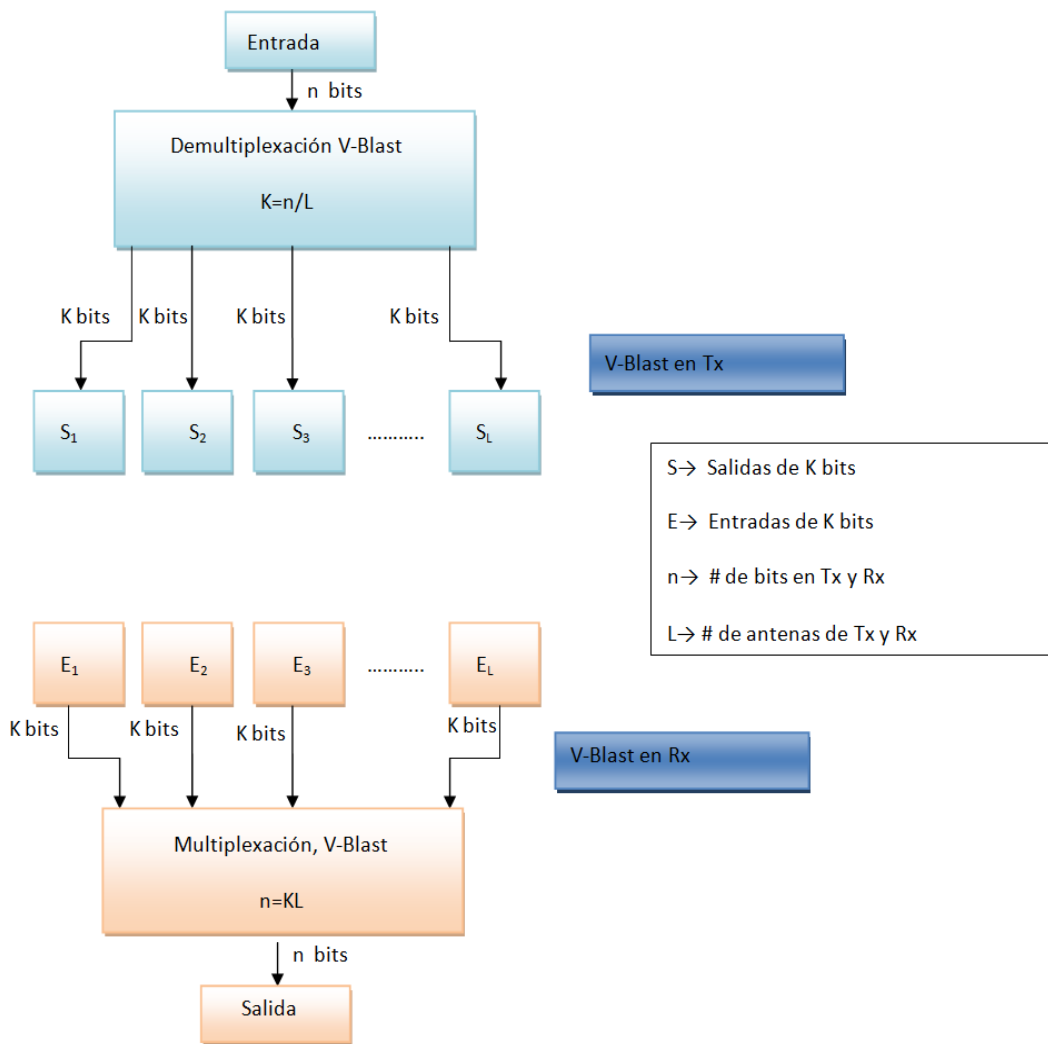
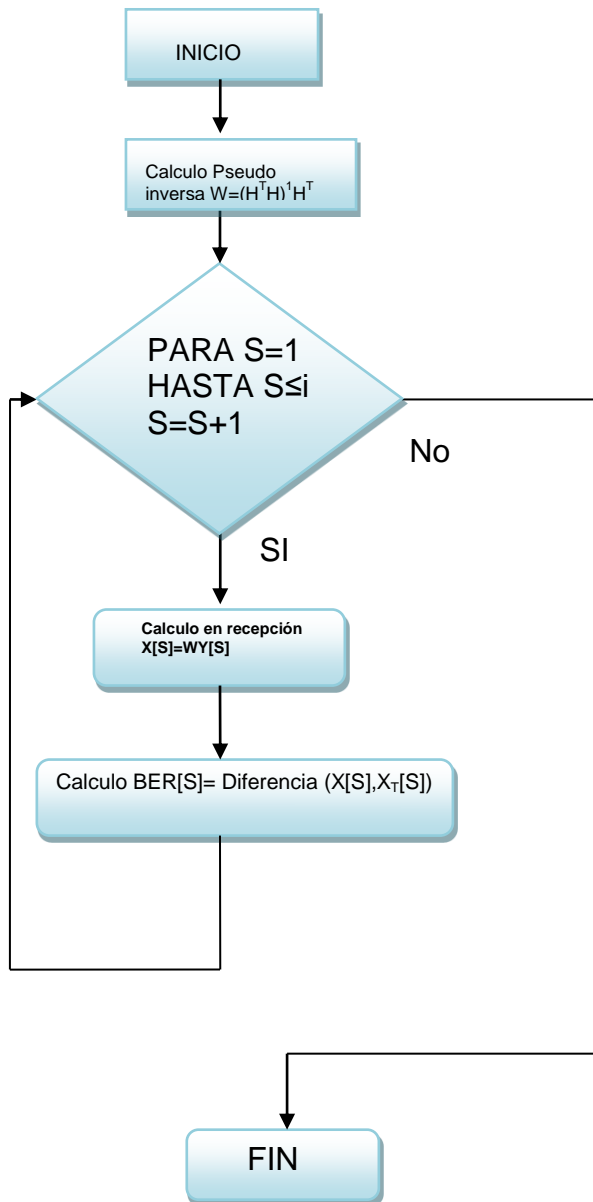


Figura 3.4. Esquemas V-Blast



3.4.3 Diagrama de flujo del Algoritmo de Detección ZF



W → Matriz pseudo-inversa para ZF
 X → Bits recibidos con errores
 X_T → Bits transmitidos
 BER → Bits errados (Bit Error Rate)
 Y → Bits recibidos del canal con ruido donde $Y=HX+N$
 H → Matriz del canal
 N → Ruido
 i → # de tramas transmitidas
 S → # de señales transmitidas

Al iniciar la simulación se obtiene la pseudo-inversa W para ZF, luego se halla la señal recibida por cada antena y se analiza los errores en la transmisión.

Figura 3.5. Diagrama de ZF



3.4.4 Diagrama de flujo del Algoritmo de Detección MMSE

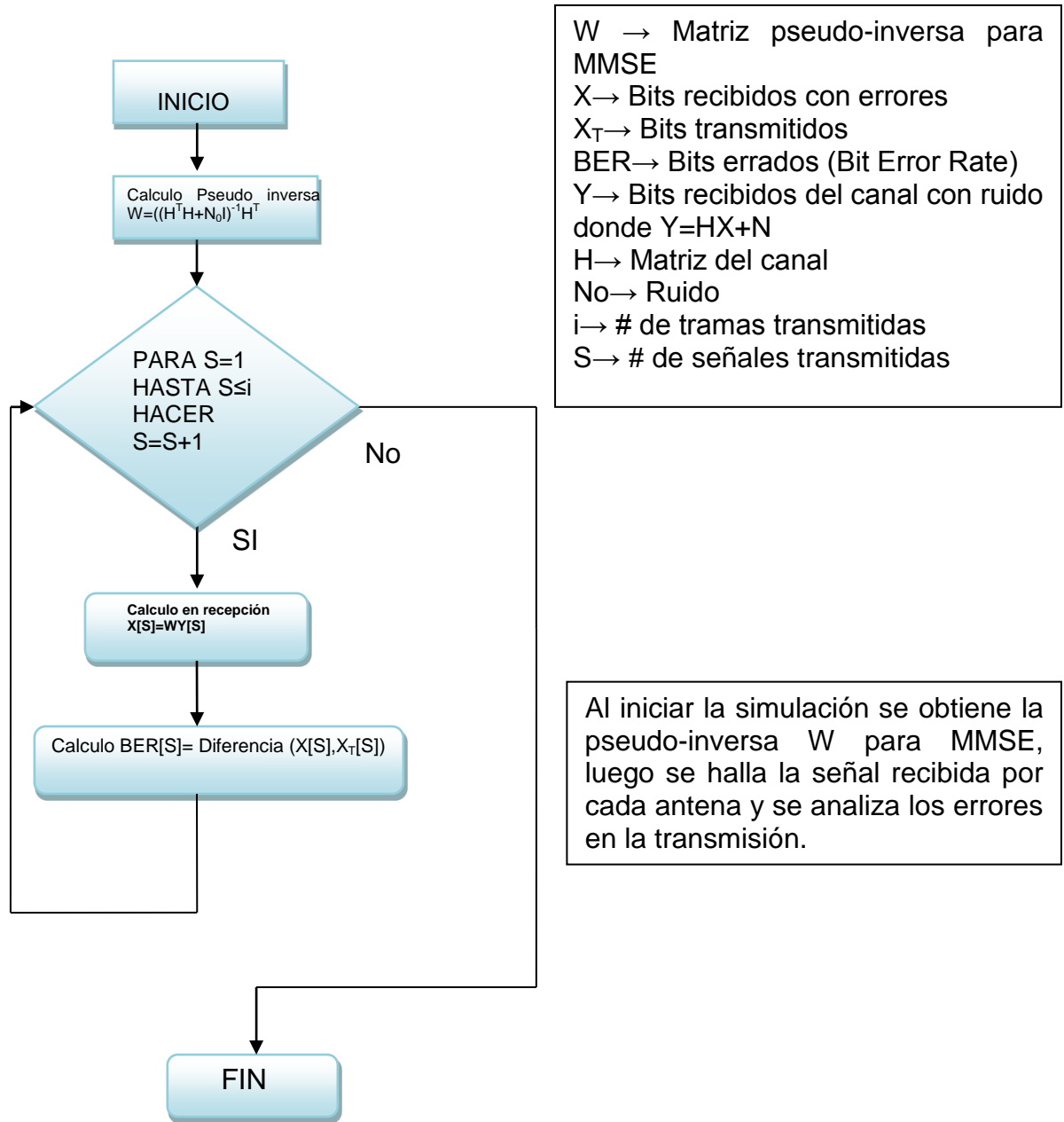


Figura 3.6. Diagrama de MMSE



3.4.5 Diagrama de flujo del Algoritmo de Detección ML

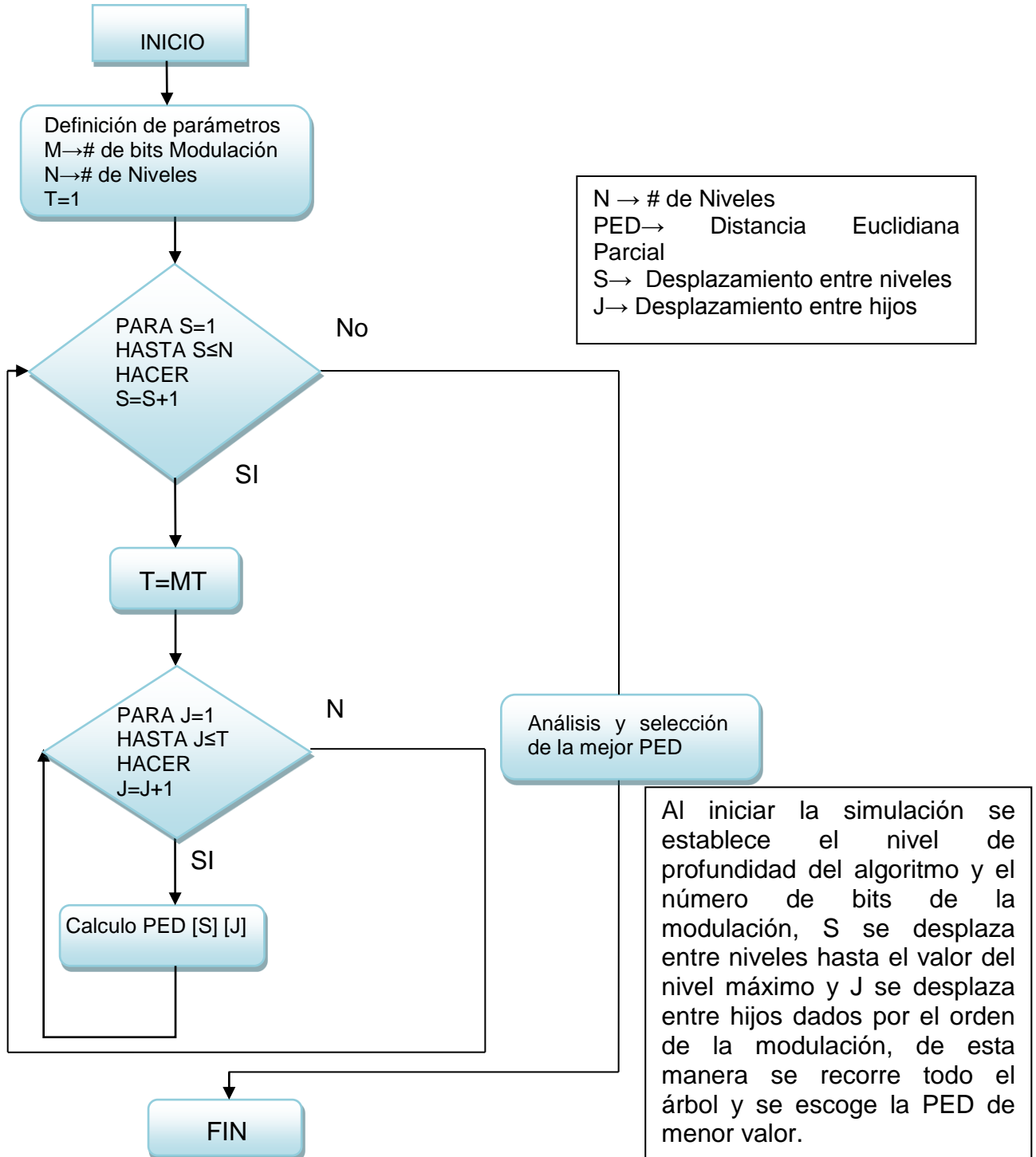
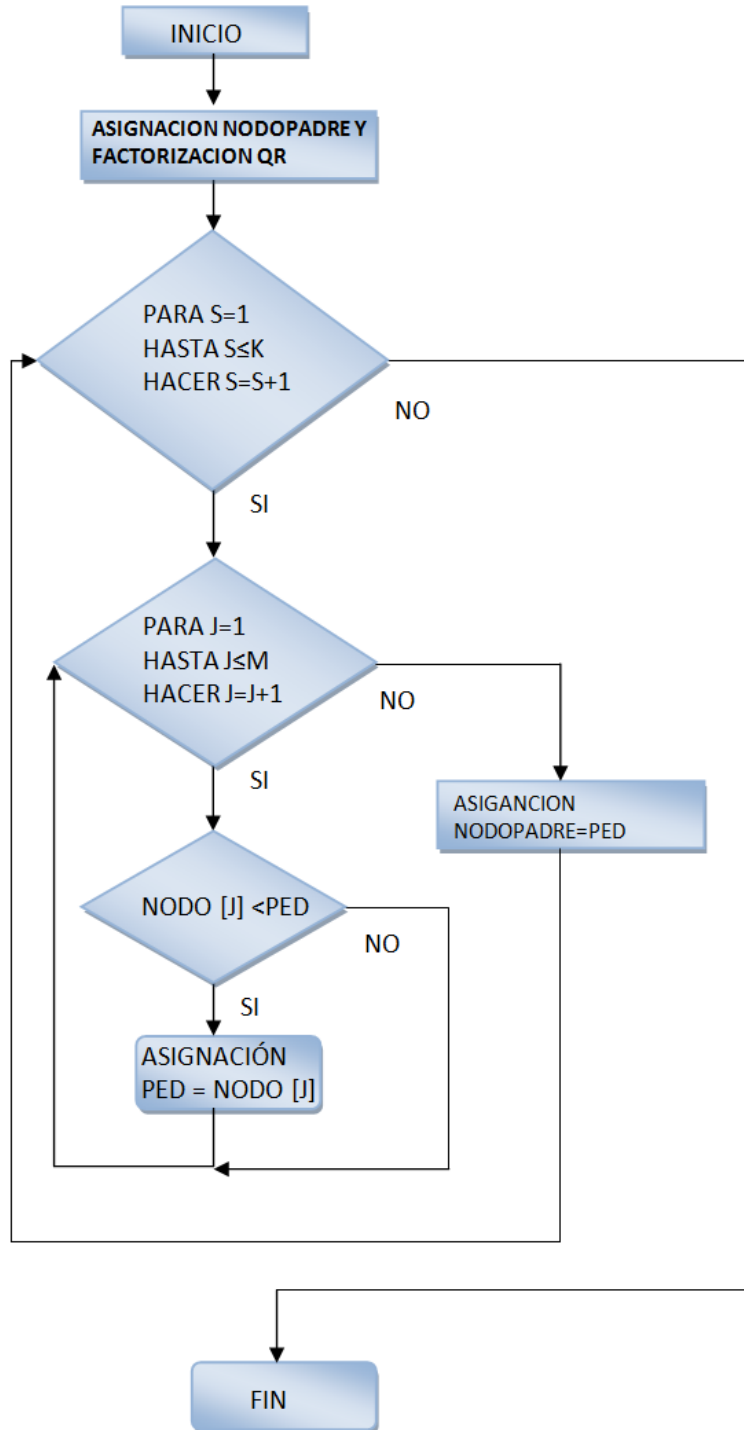


Figura 3.7. Diagrama de ML

3.4.6 Diagrama de flujo del Algoritmo de Detección Esférico



K → Nivel límite de búsqueda K-Best
 PED → Distancia Euclidiana Parcial
 S → Desplazamiento entre niveles
 J → Desplazamiento entre hijos
 PED → Distancia euclidiana parcial con un valor alto comparado con las PED normal.
 Nodo Padre → Nodo escogido como inicio y con la PED menor.

Figura 3.8. Diagrama de Esférico



3.5 Fase 4 Selección del lenguaje

Para la selección de la herramienta de simulación se realizó un análisis de varias alternativas que brindaban la posibilidad de simular sistemas inalámbricos y más concretamente, sistemas MIMO. En el mercado existen varias herramientas de simulación que son capaces de simular entornos de comunicaciones inalámbricas, pero la mayoría necesitan de una licencia. Entre las herramientas de simulación que se encontraron para el análisis de sistemas MIMO, están: MATLAB 7.9 (R2009b), LabVIEW 7.0, NCTUns 3.0, NS2, SCILAB 5.1, entre otras.

Después de realizar un análisis, las herramientas tenidas en cuenta fueron dos, considerando aspectos como las licencias y experiencia previa en el manejo de la herramienta: MATLAB 7.9 y SCILAB 5.1.

3.5.1 MATLAB 7.9

MATLAB es un software de simulación que integra en un solo programa distintas características como análisis numéricos, cálculo de matrices, procesamiento de señales, generación de gráficas y la posibilidad de desarrollar interfaces gráficas que integren varias simulaciones, además de contar con su propio lenguaje de programación (Lenguaje M) y de estar disponible para las plataformas Windows, UNIX y Apple Mac OS X, entre otras.

MATLAB tiene una gran cantidad de prestaciones útiles, como son: la posibilidad de interactuar con otros programas que trabajen con distintos lenguajes, implementación de algoritmos y asociación del software con dispositivos hardware externos. En MATLAB se pueden ampliar las capacidades del sistema, con las cajas de herramientas más conocidas con su nombre en inglés “*toolboxes*”, que son soluciones para aplicaciones específicas introducidas al sistema, mediante funciones que solucionan algún problema en particular. Una de las características fundamentales de MATLAB, es la posibilidad de introducir ecuaciones matemáticas al código de una forma más sencilla que en cualquier otra herramienta. Debido a que permite redactar y programar las ecuaciones tal y como están escritas en la literatura matemática, generando un lenguaje amigable y real de comunicación con el usuario.



3.5.2 SCILAB 5.1

SCILAB es un software de desarrollo diseñado y pensando para ofrecer al usuario herramientas de programación, cálculo numérico y gráficos en un mismo ambiente. Su funcionamiento es similar al que se emplea en MATLAB y puede ser instalado en diversos sistemas operativos sin ningún inconveniente (WINDOWS, UNIX, LINUX, etc). Los desarrolladores de SCILAB mantienen a la herramienta actualizada con los últimos avances científicos en diversas áreas de estudio como la computación numérica.

INIRA (*“Institut Nationale de Recherche en Informatique et en Automatique”*), empresa creadora de SCILAB, siempre se ha caracterizado por fomentar la educación e investigación tanto universitaria como científica, mediante el uso de su herramienta brindando al usuario innumerables ventajas.

3.5.3 Selección de la herramienta.

Después de analizar las características y desventajas de las herramientas, se concluyó que MATLAB es la mejor opción para las exigencias que este trabajo de grado requiere. Debido a los siguientes aspectos se tomó la decisión final que conllevó a trabajar con MATLAB:

- La universidad del cauca cuenta con una licencia de MATLAB.
- En la red se encuentran tutoriales y ejemplos de las dos herramientas pero la gran mayoría están realizados en MATLAB. Aspecto fundamental, dado que para el desarrollo de este proyecto fue necesario adquirir conocimientos nuevos, esto fue posible después de leer y analizar algunos de los tutoriales y ejemplos disponibles en la red.
- MATLAB es una herramienta muy utilizada por los docentes del departamento de telecomunicaciones de la FIET de la Universidad del Cauca y su experiencia con el manejo de esta fue de gran ayuda en el desarrollo de este proyecto.
- Los trabajos de investigación que se realizan a nivel mundial emplean Matlab como herramienta fundamental.



3.6 Fase 5 Codificación del modelo:

Consiste en generar un código computacional compatible con uno o varios tipos de computadores, con el fin de lograr que el modelo pueda ser ejecutado. La codificación del modelo está directamente relacionada con la selección del lenguaje, esta codificación se implementa para cada bloque de la figura 3.2, como se muestra a continuación.

3.6.1 Código de Bloques de MIMO

Generación de datos:

```
msg=randint(log2(mod_num),Nt*Number/2);
```

Código implementado en Matlab con las siguientes características.

Entradas:

- **Mod_num:** Orden de la modulación.
- **Nt:** Número de antenas en transmisión.
- **Number:** Número de tramas.

Salidas:

- **Msg:** Variable donde se almacenan los bits a transmitir.

Funciones:

- **Randint:** Genera una matriz de números aleatorios enteros.

Demultiplexación espacial:

```
for i = 0:M-1  
Y = [Y; X((length(X)/M)*i + 1:(length(X)/M)*(i+1))];  
end
```

Código implementado en Matlab con las siguientes características:

Entradas:

- **X:** Vector a multiplexar.
- **M:** Número de antenas en transmisión.



✚ Salidas:

- **Y:** Matriz generada.

✚ Funciones:

- **Length:** Comando en Matlab que obtiene la cantidad de elementos de un vector.

Modulación:

```
if m==16
li=modem.qammod('M',m,'InputType','bit','symbolorder','Gray');
v=modulate(li,mg);%modulacion
cons=[-3-3*j -3-j -3+3*j -3+j -1-3*j -1-j -1+3*j -1+j 3-3*j 3-j 3+3*j 3+j 1-3*j
1-j 1+3*j 1+j];%puntos 16QAM
code=[-3 -1 1 3];%Amplitudes 16QAM
elseif m==4
li=modem.qammod('M',m,'InputType','bit','symbolorder','Gray');%qam
v=modulate(li,mg);%modulacion
cons=[1+j 1-j -1+j -1-j];%puntos QAM
code=[-1 1];%amplitudes QAM
end
```

Código implementado en Matlab con las siguientes características:

✚ Entradas:

- **M:** Orden de la modulación.

✚ Salidas:

- **V:** Datos modulados.
- **Const:** Puntos de la modulación.
- **Code:** Amplitudes de la modulación.

✚ Funciones:

- **Li:** Variable que almacena las características de la modulación.
- **Modem.qammod:** Comando Matlab generar el modulador QAM.
- **Modulate:** Comando Matlab para modular.



Canal: Rayleigh

```
coefCanal = (randn(numRx,numTx) + 1j*randn(numRx,numTx))/sqrt(2);
```

AWGN

```
coefCanal = (randn(numRx,numTx) + 1j*randn(numRx,numTx));
```

Código implementado en Matlab con las siguientes características:

✚ Entradas:

- **NumRx**: Número de antenas en recepción.
- **NumTx**: Número de antenas en transmisión.

✚ Salidas:

- **CoefCanal**: Coeficiente donde se almacena el canal.

✚ Funciones:

- **Randn**: Comando Matlab que genera una matriz de elementos que sigue una distribución normal.
- **Sqrt**: Comando Matlab el cual sirve para raíz cuadrada.

Multiplexor espacial V-Blast:

```
for i = 1:size(X,1)  
    Y = [Y, X(i,:)];  
end
```

Código implementado en Matlab con las siguientes características:

✚ Entradas:

- **X**: Vectores fragmentados.

✚ Salidas:

- **Y**: Matriz generada.

✚ Funciones:

- **Size**: Comando en Matlab que obtiene la dimensión de un vector.



Demodulación:

```
if j==16
h=modem.qamdemod('M',j,'OutputType','bit','symbolorder','Gray');
z=demodulate(h,y);
else
h=modem.qamdemod('M',j,'OutputType','bit','symbolorder','Gray');
z=demodulate(h,y);
end
```

Código implementado en Matlab con las siguientes características:

✚ Entradas:

➤ **J**: Orden de la modulación.

✚ Salidas:

➤ **Z**: Datos demodulados.

✚ Funciones:

➤ **H**: Variable que almacena las características de la modulación.

➤ **Modem.qammod**: Comando Matlab generar el modulador QAM.

➤ **Demodulate**: Comando Matlab para demodular.

3.6.2 Código Principal

Debido a que el código involucra todas las opciones de simulación se hace demasiado denso, a continuación se ilustran los fragmentos más importantes, aclarando que el código fuente completo se encuentra disponible en los archivos fuente de este trabajo de grado.

A continuación se presenta el código en MATLAB que integra las funciones necesarias para simular los algoritmos de detección con sus respectivas características en modulación, número de bits, SNR y número de antenas en transmisión y recepción, con el fin de calcular y graficar las curvas de la BER vs SNR y tiempo vs SNR.



3.6.3 Código ZF y MMSE

Implementación del código para ZF y MMSE, en el cual se calcula la Pseudo-inversa y el vector recibido.

```
for tx = 1:numTx
    if strcmp(criterio,'zf')
        G = pinv(H); % matriz pseudo-inversa ZF
    else
        G = inv(H'*H + snr_inv*eye(numTx))*H'; % matriz pseudo-inversa MMSE
    end
    w = G(tx,:); % Se halla W
    y = w*r; % Se halla Y
end
```

Las características del código implementado en Matlab son las siguientes:

✚ Entradas:

- **Tx**: Antenas de transmisión.
- **Criterio**: Elige entre ZF y MMSE.
- **H**: Matriz de canal.

✚ Salidas:

- **Y**: Vector recibido.

✚ Funciones:

- **Pinv**: Función de Matlab para hallar la matriz pseudo-inversa de H.
- **Snr_inv**: Relación de potencia.
- **Inv**: Función de Matlab para hallar la inversa de una matriz.

3.6.4 Código ML

Implementación del código para ML, que varía según el número de antenas en transmisión y la modulación, en el cual se busca la mejor PED.



3.6.4.1 Código ML para 2x2

```
for tmp=1:Num/2                                % Recorre las tramas
    min=100000;                                  % PED inicial
    for flag1=1:mod                              % Cada flag1 son las antenas de TX
        for flag2=1:mod
            stmp=[const(flag1);const(flag2)]; % Matriz de la modulación
            rtmp=r(:,tmp);Maximum=norm(rtmp-hr(:,:,ro)*stmp);% PED
            if Maximum<min
                min=Maximum; slast=stmp; % PED minima
            end
        end
    end
end
for jj=1:Tx
    c(Tx*tmp+jj-Tx)=slast(jj);% PED minima
end
end
```

Código implementado en Matlab con las siguientes características:

✚ Entradas:

- **Mod:** Orden de la modulación.
- **Const:** Puntos de constelación de la modulación.
- **Num:** Número de tramas.

✚ Salidas:

- **C:** Vector solución.

✚ Funciones:

- **Min:** PED con un valor inicial alto.
- **Norm:** Función de Matlab que encuentra la distancia euclidiana.



3.6.4.2 Código ML para 4x4

```
for tmp=1:Num/2                                % Recorre las tramas
    min=100000;                                % PED
    for flag1=1:mod                             % Cada flag son las antenas de TX
        for flag2=1:mod
            for flag3=1:mod
                for flag4=1:mod
                    stmp=[const(flag1);const(flag2);const(flag3);const(flag4)];
                    rtmp=r(:,tmp);
                    Maximum=norm(rtmp-hr(:,:,ro)*stmp); %Se halla cada PED
                    if Maximum<min                %se compara cada PED
                        min=Maximum;slast=stmp; % PED minima
                    end
                end
            end
        end
    end
    for jj=1:Tx
        c(Tx*tmp+jj-Tx)=slast(jj); % PED minima
    end
end
end
```

Código implementado en Matlab con las siguientes características:

✚ Entradas:

- **Mod:** Orden de la modulación.
- **Const:** Puntos de constelación de la modulación.
- **Num:** Número de tramas.

✚ Salidas:

- **C:** Vector solución.

✚ Funciones:

- **Min:** PED con un valor inicial alto.
- **Norm:** Función de Matlab que encuentra la distancia euclidiana.



3.6.5 Código algoritmo Esférico

Implementación del código para el algoritmo Esférico, en el cual la búsqueda se desplaza hasta el radio k podando los niveles del árbol y escogiendo la mejor PED siguiendo las características del algoritmo.

```
[Q,R]=qr(H);      %Factorización QR
ro = Q'*rev;      %y'=Q1'y
while k >= 1      %Radio y nivel del árbol
    while d1 > d - 10^(-11) %Distancia Euclidiana
        ind(k) = ind(k) + 1;
        k = k+1;
        if k > 1 %hallar la PED del siguiente nivel de cada punto
            T(k-1) = T(k) - R(k,k)*(S(k)-Y(k,ind(k)))^2;
            tmp = 0;
            for ii = k:n %hallar la PED del siguiente nivel de cada punto
                tmp = tmp + R(k-1, ii)*Y(ii,ind(ii));
            end
            S(k-1) = ro(k-1) - tmp;
            k = k - 1;%hallar la PED del siguiente nivel del siguiente punto
        end
        d1 = T(n) - T(1) + R(1,1)*(S(1) - Y(1, ind(1)))^2;
    end %while d1 > d
    if d1 < d-10^(-11)
        for ii=1:n
            y1(ii) = Y(ii, ind(ii)); %asigno la mejor PED dentro del radio K
        end
        d = d1;
    end
end
```

Código implementado en Matlab con las siguientes características:

- ✚ Entradas:
- **H**: Matriz de canal.

- ✚ Salidas:
- **Y1**: La mejor solución.

- ✚ Funciones:
- **K**: Radio o nivel de búsqueda.
- **D**: Condición de PED menor.
- **Ro**: Solución del factor y' .
- **T**: SNR.



3.7 Fase 6 Validación del modelo:

Consiste en realizar comparaciones entre los resultados del modelo y los resultados reales, respaldando dichas comparaciones en tablas estadísticas. Esto se realiza para determinar si un modelo tiene la suficiente habilidad para ser representado en la realidad. Los resultados obtenidos de las simulaciones desarrolladas en este trabajo de grado se verifican en el capítulo cinco.

3.8 Fase 7 Experimentación:

Se tienen en cuenta todas las alternativas que pueden ser variables de entrada, como las modulaciones QPSK, QAM y 16QAM, los bits a transmitir variando el número de tramas y su longitud, el algoritmo de detección entre los cuales están ZF, MMSE, Esférico y ML, el arreglo de antenas en transmisión y recepción los cuales son de 2x2 y 4x4. Estas combinaciones se clasifican y se ordenan dependiendo de su funcionalidad, para optimizar la respuesta de las variables del sistema real y realizar un análisis completo y detallado como se llevó a cabo en el capítulo 5.

3.9 Fase 8 Implantación:

Una vez seleccionada la mejor opción, se prosigue a ponerla en marcha. Es un paso difícil debido a que se deben exponer los argumentos de cada una de las opciones elegidas en la realización del proyecto. Las ventajas, desventajas y la explicación de cada uno de estos aspectos se ilustran en el capítulo 2.

3.10 Fase 9 Monitoreo y control:

Todo sistema es dinámico y con el transcurso del tiempo es normal que cambie en su estructura real. Es por ello que el modelo de la simulación debe contar con la posibilidad de ser modificado para realizar actualizaciones periódicas, garantizando que siga siendo una representación exacta del sistema con el transcurrir del tiempo.

En este caso, la simulación desarrollada puede ser modificada en cualquier momento, ya sea para adaptarla a un sistema en concreto o para mejorarla. También se puede actualizar su funcionamiento a medida que avancen los estudios y conocimientos relacionados con los sistemas MIMO, en aspectos como algoritmos de detección y modulaciones más eficientes.



4. Validación de resultados

En este capítulo se comparan los resultados obtenidos en la simulación desarrollada, con resultados de investigaciones similares, para verificar valores y comprobar la veracidad de los mismos.

4.1 Verificación de resultados

La figura 4.1 muestra los resultados de una simulación que utiliza V-BLAST, en donde se incluyen cuatro antenas de transmisión y cuatro antenas receptoras, la modulación es QPSK y se comparan cuatro algoritmos de detección en el receptor. Los algoritmos utilizados son ZF /detección lineal, MMSE /detección lineal, ZF /detección Sic MMSE y detección Sic (“*Successive interference cancellation*”). Para esta simulación se utiliza el modelo de canal AWGN y no se especifican el número de tramas, ni la herramienta utilizada para la simulación [32].

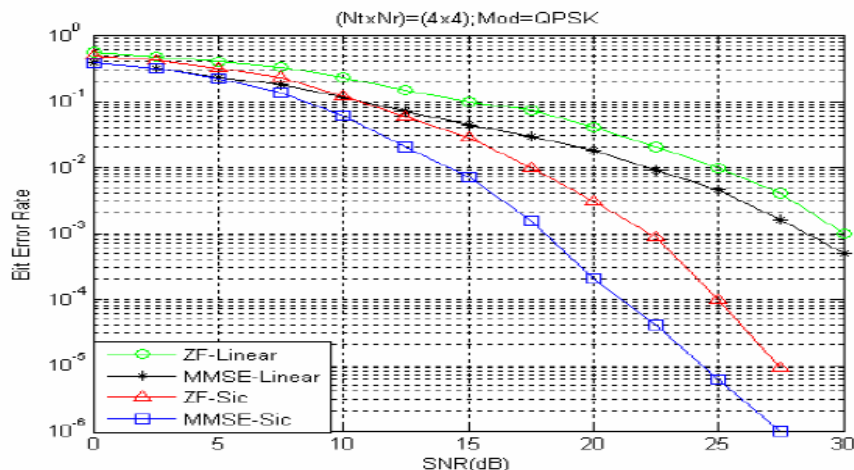


Figura 4.1. MIMO QPSK 4x4 ZF y MMSE AWGN



En la figura 4.2 se ilustran resultados correspondientes a una simulación de un sistema MIMO 4x4 con modulación QPSK, en donde se implementa un modelo de canal Rayleigh con algoritmos de detección ZF y MMSE sin ordenamiento y ZF y MMSE con ordenamiento, no se especifica el número de tramas ni la herramienta utilizada para la simulación [33].

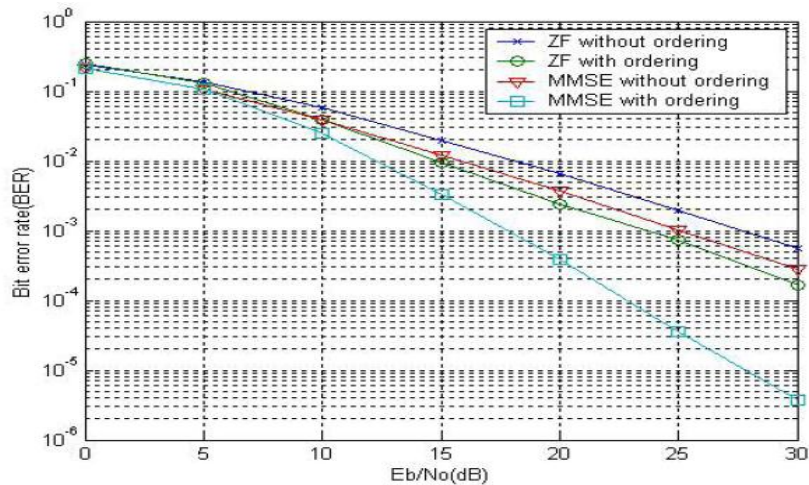


Figura 4.2. MIMO QPSK 4x4 ZF y MMSE Rayleigh

Los resultados obtenidos en la figura 4.3 surgen de simular un sistema MIMO 4x4 con modulación QPSK, en un canal Rayleigh para ZF y MMSE sin ordenamiento, con 100 tramas de 1000 bits. Estos resultados son producto de la simulación desarrollada en este trabajo de grado y si se comparan con los resultados de las figuras 4.1 y 4.2, se repite el procedimiento 4 veces y se obtuvo los mismos resultados, se observa que sus comportamientos son semejantes y las diferencias en los valores de E_b/N_0 son de 1dB para valores de la BER mayores a 10^{-3} , teniendo en cuenta que las configuraciones no son iguales.

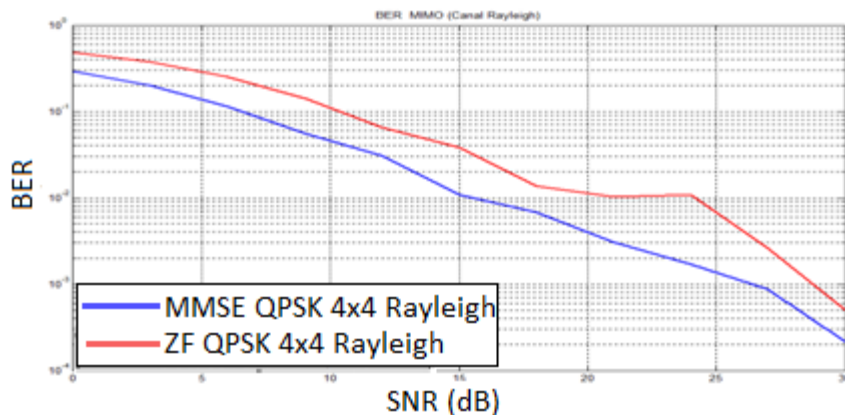


Figura 4.3. MIMO QPSK 4x4 ZF y MMSE Rayleigh



En la tabla 4.1 se presentan los valores de BER obtenidos de las curvas de las figuras 4.1 y 4.3, con el objetivo de comparar los resultados que arroja la simulación desarrollada, con resultados que obtenidos en otros estudios. En amarillo los valores de la figura 4.1 y en azul los datos de la figura 4.3.

BER	ZF SNR(dB)	MMSE SNR(dB)	ZF SNR(dB)	MMSE SNR(dB)
10^{-1}	15	10	10.5	6.2
10^{-2}	25	22	21	15
10^{-3}	30	28	29	26,5
Pendiente	-111.11	-133.33	-116.66	-100

Tabla 4.1.Valores ZF y MMSE figura 4.1 y 4.3.

En la tabla 4.2 nuevamente se toman valores de BER, ahora con el fin de comparar resultados de las figuras 4.2 y 4.3. En amarillo los valores de la figura 4.2 y en azul los datos de la figura 4.3.

BER	ZF SNR(dB)	MMSE SNR(dB)	ZF SNR(dB)	MMSE SNR(dB)
10^{-1}	7	5	10.5	6.2
10^{-2}	17	15	21	15
10^{-3}	27.5	25	29	26,5
Pendiente	-111.11	-111.11	-116.66	-100

Tabla 4.2.Valores ZF y MMSE figura 4.2 y 4.3.

En conclusión la simulación de ZF y MMSE presenta un comportamiento lineal y valores aceptables comparados con resultados de otras investigaciones y guías teóricas con pendientes aproximadas. La diferencia en los valores se presenta por tener más variables a considerar, tales como el número de bits y tramas a transmitir, la forma de implementar el código del algoritmo, también el programa utilizado para desarrollarlo.



La figura 4.4 ilustra el desempeño de un sistema V-BLAST ZF, V-BLAST (SIC) y V-BLAST (ML) con variación del número de antenas de transmisión y recepción, con modulación 4-QAM [34], no se especifican el número de tramas, longitud de las tramas, el canal, ni la herramienta utilizada para la simulación.

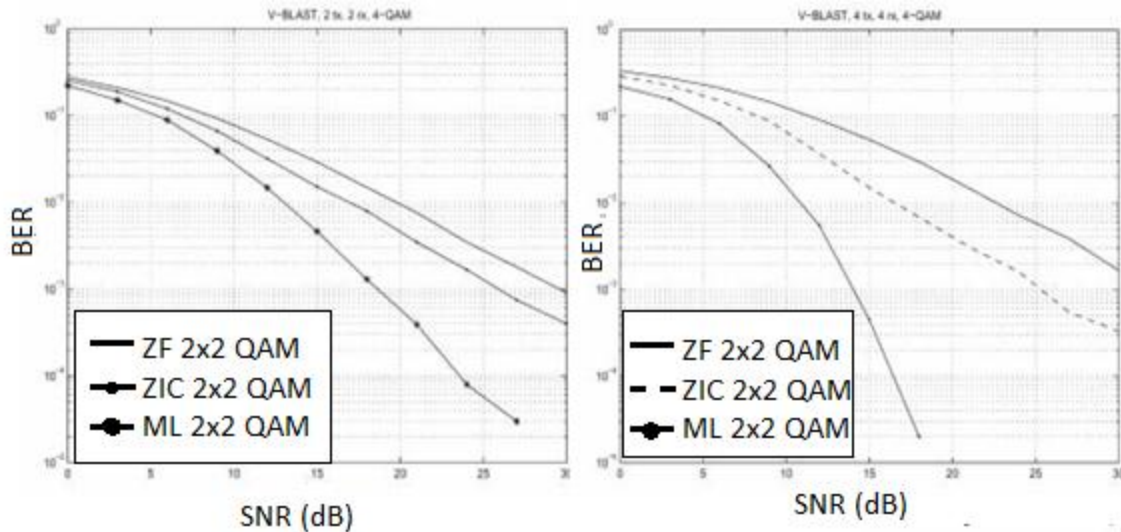


Figura 4.4. MIMO QAM 4x4 y 2x2 ML y ZF.

Los resultados obtenidos de la simulación que se muestra con la figura 4.5 pertenecen a un sistema MIMO V-BLAST, utilizando algoritmos de detección ZF y ML con variación del número de antenas de transmisión y recepción de 2x2 y 4x4, con modulación QAM y con 100 tramas de 1000 bits, simulación desarrollada en este trabajo de grado, se repite el procedimiento 4 veces y se obtuvo los mismos resultados.

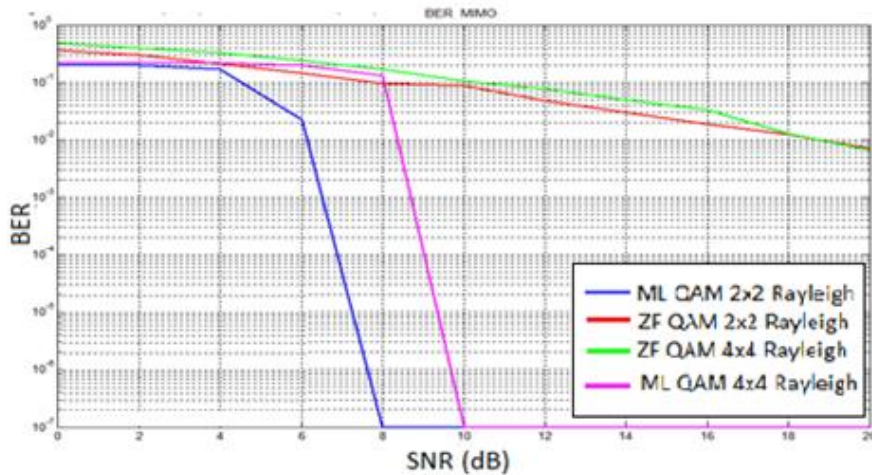


Figura 4.5. MIMO QAM 4x4 2x2 ZF y ML.



En las tablas 4.3 y 4.4 se toman los valores de BER de las curvas obtenidas en las gráficas 4.4 y 4.5, datos que se muestran con el objetivo de comparar los resultados con los valores obtenidos en la simulación desarrollada. En amarillo los valores de la figura 4.4 y en azul los valores de la figura 4.5.

BER	2x2 SNR(dB)	4x4 SNR(dB)	2x2 SNR(dB)	4x4 SNR(dB)
10^{-1}	8	11	8	11
10^{-2}	19	22.5	18	21
10^{-3}	28.5	32	29	27
Pendiente	-122.22	-127.77	-122.22	-111.11

Tabla 4.3. Valores de BER, Algoritmo de Detección ZF con 2x2 y 4x4 figura 4.4 y 4.5.

BER	2x2 SNR(dB)	4x4 SNR(dB)	2x2 SNR(dB)	4x4 SNR(dB)
10^{-1}	4.5	5	5	8
10^{-2}	12.5	11	6.5	10
10^{-3}	18	14	7	11
Pendiente	-83.33	-66.66	-16.66	-22.22

Tabla 4.4. Valores de BER, Algoritmo de Detección ML con 2x2 y 4x4 figura 4.4 y 4.5.

En conclusión, de la simulación de ZF y ML con variación de antenas de 2x2 a 4x4, se puede observar que ML presenta un desempeño mejor que ZF en los dos arreglos de antenas, para ML 4x4 con BER 10^{-2} la Eb/No es 10dB y para ZF 4x4 es 21dB. La configuración 2x2 tiene mejor comportamiento que 4x4, para ML 4x4 con BER 10^{-2} la Eb/No es 10dB y para ML 2x2 con BER 10^{-2} la Eb/No es 6.5dB, estos resultados presentan un comportamiento de las curvas de la BER similar a los resultados obtenidos de otras investigaciones y guías teóricas.

La diferencia en los valores de las gráficas radica en tener distintas variables de análisis a considerar, tales como el número de bits y tramas a transmitir, la forma de implementar el código del algoritmo como también el programa utilizado para desarrollar dichas simulaciones.

En la figura 4.6 se ilustran los resultados de una simulación que implementa un sistema MIMO ML y Esférico 2x2, con modulación 16QAM [35], no se especifican número de tramas, longitud de las tramas, canal, ni la herramienta utilizada para la simulación.

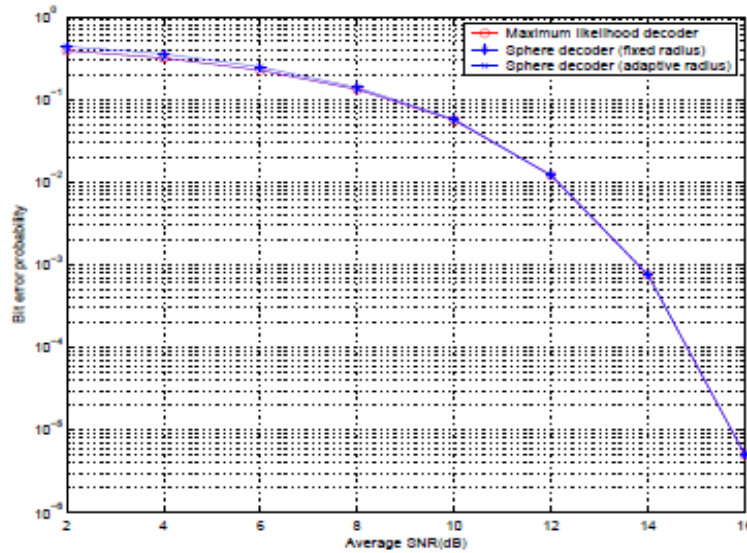


Figura 4.6. MIMO 16QAM 2x2 Esférico y ML.

Los resultados obtenidos de la simulación que se muestra en la figura 4.7, corresponden a resultados obtenidos de la simulación que se desarrolló en este trabajo de grado. Los parámetros de la simulación son un sistema ML y Esférico 2x2 con modulación 16QAM con canal Rayleigh, se repite el procedimiento 4 veces y se obtuvo los mismos resultados.

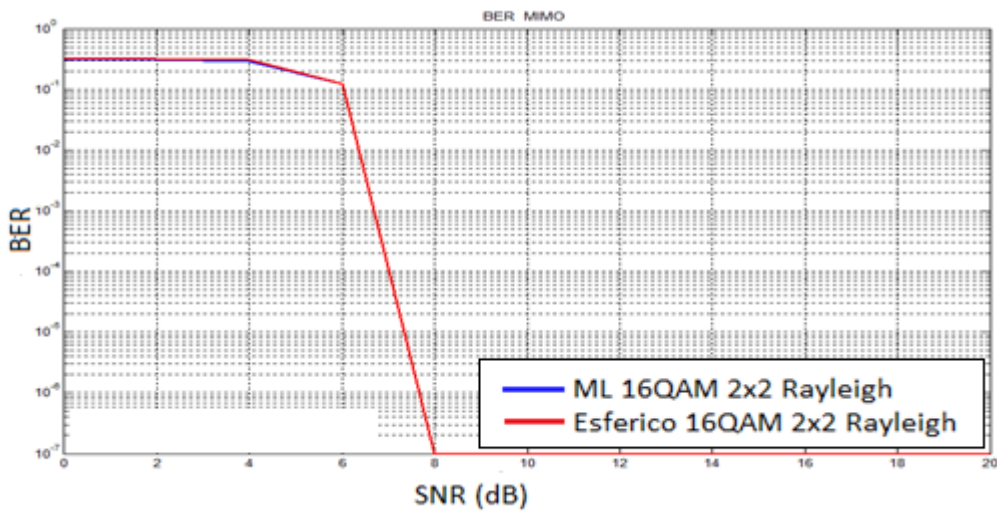


Figura 4.7. MIMO 16QAM 2x2 Esférico y ML.



En la siguiente tabla se toman datos de las gráficas con el objetivo de comparar los resultados con los valores obtenidos en la simulación desarrollada. En amarillo los valores de la figura 4.6 y en azul los valores de la figura 4.7

BER	ML SNR(dB)	Esférico SNR(dB)	ML SNR(dB)	Esférico SNR(dB)
10^{-1}	8	8	6	6
10^{-2}	12	12	6.5	6.5
10^{-3}	13.5	13.5	7	7
Pendiente	-16.66	-16.66	-5.55	-5.55

Tabla 4.5. Valores de ML y Esférico 2x2 16QAM figura 4.6 y 4.7.

En cuanto a la simulación de un sistema MIMO que implementa algoritmos de detección Esférico y ML con arreglo de antenas 2x2 y modulación 16QAM, se observa que el algoritmo Esférico presenta un desempeño similar a ML, en la curva de la gráfica 4.6 de ML y Esférico con valores de BER de 10^{-1} la E_b/N_0 es de 8db, para la curva de la gráfica 4.7 de ML y Esférico con valores de BER de 10^{-1} la E_b/N_0 es de 6db, resultados que también se encuentran en otras investigaciones y simulaciones elaboradas en el mundo.

Nuevamente los resultados que se comparan en las tablas 4.5, ilustran una aproximación en los valores de sus pendientes entre los algoritmos ML y Esférico, dando coherencia a los resultados obtenidos en este trabajo de grado, la diferencia es grande porque los códigos no son los mismos, así como otras características que hacen variar en un pequeño margen los resultados que se obtienen.



5. Análisis de resultados

En este capítulo se crean escenarios de simulación con diferentes configuraciones, con el fin de analizar y comparar los resultados del comportamiento del nivel físico de un sistema MIMO punto a punto variando los algoritmos de detección, el canal, la modulación y el número de antenas, se repite el procedimiento 4 veces y se obtuvo los mismos resultados. El equipo de simulación presenta las siguientes características: Procesador AMD Athlon II X2 245 de 2.91GHz, 2 Gigabytes RAM, tarjeta de video NVIDIA Ge Forcé 9500 GT de 1 Gigabyte, sistema operativo Windows 7 profesional de 64 bits.

5.1 Resultados obtenidos

5.1.1 Escenario 1

En el escenario 1 se implementa un sistema MIMO 2x2 con canal Rayleigh y modulación 16QAM, donde se varia el algoritmo de detección, se implementan ZF y MMSE. La figura 5.1 ilustra las curvas de desempeño de los algoritmos analizados.

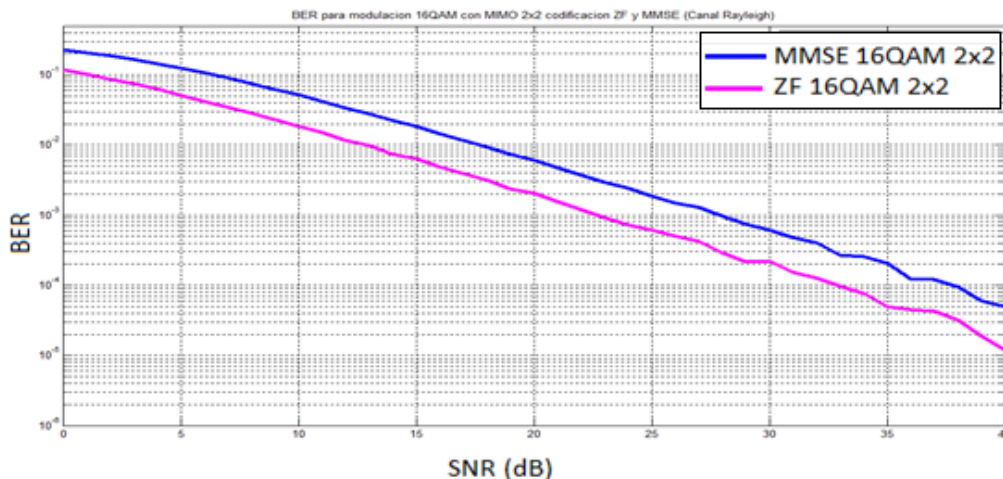


Figura 5.1 Escenario 1: BER Vs Eb/No ZF y MMSE.



Las curvas del sistema MIMO 2x2 tienen similares pendientes, tanto para ZF como para MMSE y tienden a ser lineales (pendiente constante) para valores de BER comprendidos entre 10^{-1} y 10^{-4} . Así mismo, para valores más bajos de BER (entre 10^{-4} y 10^{-6}) la pendiente empieza a fluctuar.

En 16QAM, el desempeño de ZF es mejor que en MMSE (figura 5.1), esto se debe a que en MMSE se tiene en cuenta el ruido producido durante la transmisión, dando como resultado una tasa de error de bit mayor que en ZF para iguales valores de SNR. MMSE presenta un desempeño inferior al ofrecido por ZF cuando se utiliza la modulación 16QAM, dado que MMSE se ve más afectado por los efectos de la ISI.

En la tabla 5.1 se observa que para alcanzar una BER de 10^{-1} , el algoritmo MMSE requiere una E_b/N_0 de 6dB y el algoritmo ZF requiere 1dB. En la tabla 5.1 se presentan las E_b/N_0 requeridas para alcanzar determinados valores de BER en los dos sistemas.

BER	Eb/No (dB)	
	ZF	MMSE
1	--	--
10^{-1}	1	6
10^{-2}	13	18
10^{-3}	23	28
10^{-4}	33	38
10^{-5}	41	--

Tabla 5.1. Valores de E_b/N_0 , BER entre 1 y 10^{-5} en el escenario 1.

5.1.2 Escenario 2

El escenario 2 corresponde a un sistema MIMO 2x2 variando los algoritmos de detección ZF y MMSE, con canal Rayleigh y modulación QPSK. La figura 5.2 presenta el comportamiento de la BER para este escenario.

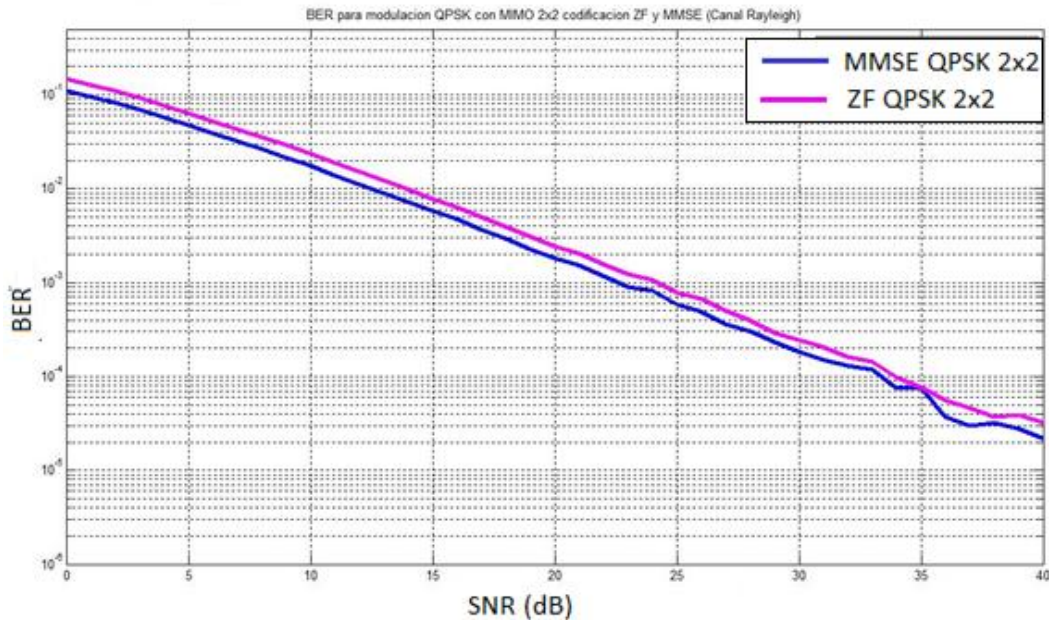


Figura 5.2. Escenario 2: BER Vs Eb/No ZF y MMSE.

Para este caso el desempeño de MMSE es ligeramente mejor, comparado con el ofrecido por ZF, esto sucede porque en este tipo de modulación, la cantidad de bits enviados es menor frente a los transmitidos cuando se usa 16QAM; dando como consecuencia una BER más baja, en especial para MMSE, que tiene en cuenta el ruido durante la transmisión.

Al igual que 16QAM, con QPSK las pendientes de las curvas son similares, tendiendo a ser lineales o de pendiente constante. Para niveles altos de energía de bit, se pierde la linealidad de las curvas y su pendiente es aleatoria.

Para el caso especial donde E_b/N_0 es de 35dB, la BER es igual para los dos algoritmos. En la tabla 5.2 se muestran los valores requeridos de E_b/N_0 para alcanzar determinados valores de BER, tanto para ZF como para MMSE. De la tabla 5.2 se concluye que MMSE ofrece un mejor desempeño comparado con el ofrecido por ZF, por ejemplo, cuando se desea obtener una BER de 10^{-4} , ZF requiere una E_b/N_0 de 34 dB mientras MMSE requiere 32 dB. Si se desea



alcanzar los mismos valores de BER para los dos algoritmos, las variaciones a realizar en E_b/N_0 son pequeñas.

BER	Eb/No (dB)	
	MMSE	ZF
1	--	--
10^{-1}	1	2
10^{-2}	12	14
10^{-3}	23	24
10^{-4}	32	34
10^{-5}	43	--

Tabla 5.2. Valores de E_b/N_0 , BER entre 1 y 10^{-5} en el escenario 2.

5.1.3 Escenario 3

En el escenario 3 se analiza un sistema MIMO con algoritmo de detección ZF, en el cual se varía el número de antenas y la modulación utilizada. La figura 5.3 muestra los resultados obtenidos.

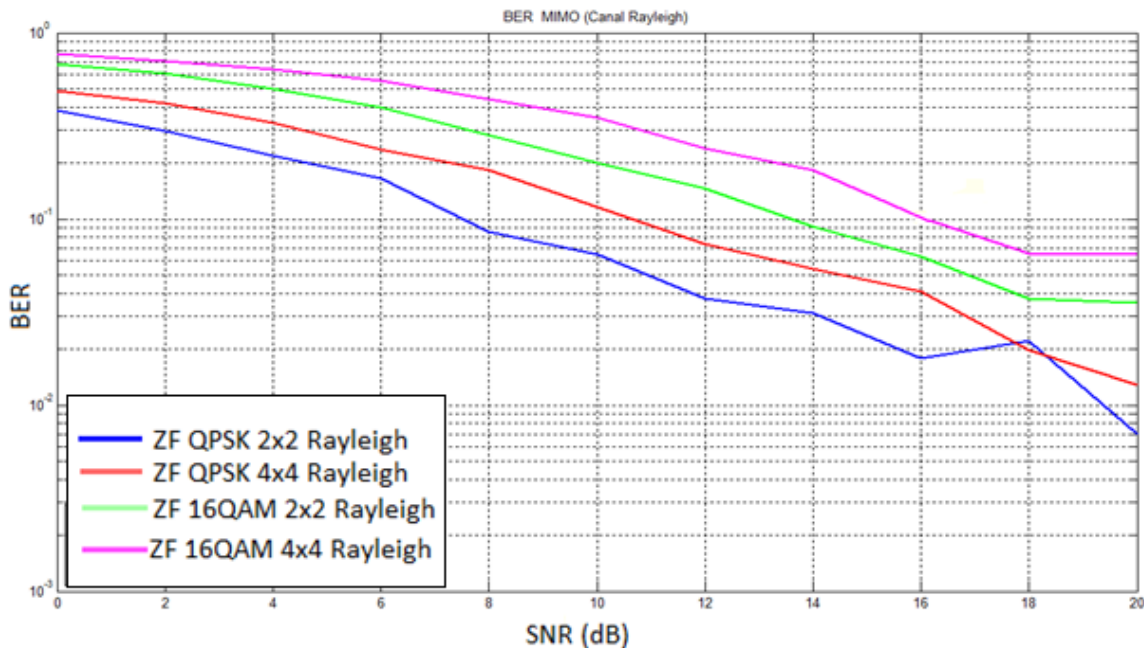


Figura 5.3. Escenario 3: BER Vs E_b/N_0 ZF.



Las curvas exponen el desempeño del sistema, dependido de la configuración empleada, las cuales se distinguen así:

- Azul: Modulación QPSK, arreglo de antenas 2x2
- Rojo: Modulación QPSK, arreglo de antenas 4x4
- Verde: Modulación 16QAM, arreglo de antenas 2x2
- Violeta: Modulación 16QAM, arreglo de antenas 4x4

Para este escenario se emplean:

- Modulaciones QPSK y 16QAM
- Arreglo de antenas 2x2 y 4x4
- Canal Rayleigh
- Datos enviados: trescientas tramas, de 1024 bits cada una

Se envía esta cantidad de información, porque en el desarrollo de los algoritmos se comprobó que este número de tramas y bits se comporta de manera estable o lineal, sin causar un tiempo de ejecución elevado.

El sistema MIMO con modulación QPSK, empleando un arreglo 2x2, ofrece los mejores resultados, seguido por el que también trabaja con modulación QPSK pero con arreglo de antenas 4x4. Los resultados más bajos de los cuatro algoritmos, son los presentados por los sistemas 2x2 y 4x4, usando 16QAM, porque con esta modulación se envían más bits en un mismo instante de tiempo, comparado con QPSK, aumentando la probabilidad de generar errores debido a la presencia de ISI.

El número de antenas también influye en el desempeño de los sistemas MIMO que trabajan con ZF. La figura 5.3 muestra que para arreglos 2x2 se obtiene un mejor desempeño que con 4x4, cuando los sistemas implementan la misma modulación. Al emplear mayor número de antenas es mayor la presencia de interferencia intersimbólica, además se hace más compleja la detección en el receptor debido a la gran cantidad de señales que llegan, generando aumentos en los valores de BER. El incremento de la BER lleva a utilizar algoritmos óptimos diseñados para detección en sistemas de alta complejidad, analizados a partir del escenario 5 en adelante.

De la figura 5.3 se puede deducir que el principal factor influyente en el desempeño de un sistema MIMO que utiliza el algoritmo de detección ZF, es la modulación, seguido por el número de antenas.



Eb/No (dB)	BER			
	ZF-2x2- QPSK	ZF-4x4- QPSK	ZF-2x2- 16QAM	ZF-4x4- 16QAM
0	0.3819	0.4878	0.6775	0.7713
2	0.2951	0.4174	0.6084	0.7072
4	0.2179	0.3288	0.4984	0.638
6	0.1651	0.2372	0.399	0.5522
8	0.0856	0.1821	0.2834	0.4427
10	0.0642	0.1162	0.2	0.3501
12	0.0370	0.0736	0.1464	0.2394
14	0.0311	0.0540	0.0908	0.1837
16	0.0178	0.0406	0.0629	0.1023
18	0.0220	0.0196	0.0373	0.0652
20	0.0069	0.0127	0.0353	0.0641

Tabla 5.3. BER vs Eb/No en el Escenario 3.

En la tabla 5.3 se observa la Eb/No requerida para alcanzar determinados valores de BER, permitiendo realizar comparaciones y determinar cuál configuración es la ideal. Por ejemplo, trabajando con una Eb/No de 10 dB, los valores de BER obtenidos son: 0.0642 y 0.1162 utilizando modulación QPSK y arreglos 2x2 y 4x4 respectivamente

Para 16QAM los valores que se obtiene son 0.2 y 0.3501 y arreglos 2x2 y 4x4, donde se observa que QPSK ofrece mejor desempeño que 16QAM, tal como se mencionó anteriormente en este escenario.

5.1.4 Escenario 4

El escenario 4 representa un sistema MIMO que emplea el algoritmo de detección MMSE, utilizando el modelo de canal Rayleigh, variando la modulación y el número de antenas. Las modulaciones son QPSK y 16QAM.

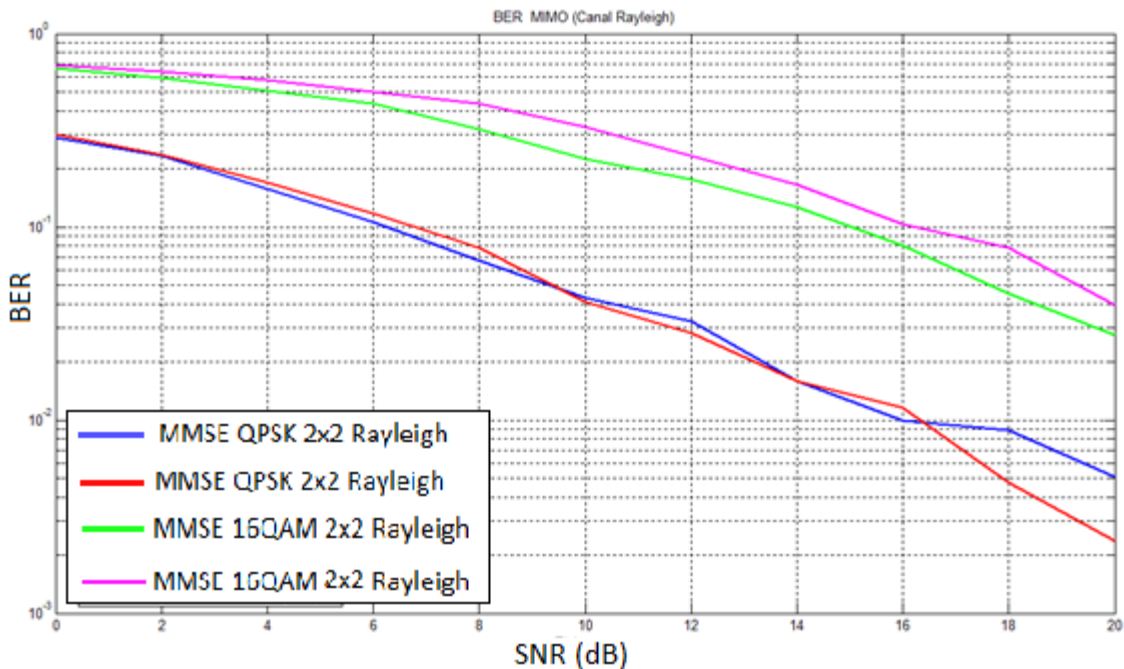


Figura 5.4. Escenario 4: BER Vs Eb/No MMSE.

La figura 5.4 muestra el desempeño del algoritmo de detección MMSE utilizando diversas configuraciones. Las curvas ilustran el comportamiento de cuatro configuraciones que utilizan multiplexación espacial V-BLAST y canal Rayleigh, las cuales se distinguen así:

- Azul: Modulación QPSK, arreglo de antenas 2x2
- Rojo: Modulación QPSK, arreglo de antenas 4x4
- Verde: Modulación 16QAM, arreglo de antenas 2x2
- Violeta: Modulación 16QAM, arreglo de antenas 4x4

Las curvas de color azul y rojo indican que utilizando la modulación QPSK, el desempeño del sistema con el algoritmo MMSE tiene resultados muy parecidos para arreglos 2x2 y 4x4, donde este último brinda mayor capacidad, teniendo tasas de error de bit semejantes. La capacidad en los sistemas MIMO se incrementa porque al tener más antenas, crece el número de canales de transmisión aumentando así el ancho de banda.



Cuando el sistema trabaja con modulación 16QAM (curvas de color verde y violeta), el desempeño es más bajo, en comparación al ofrecido por el sistema con modulación QPSK (curvas de color azul y rojo), pero posee valores de BER ideales para varios tipos de comunicaciones. El desempeño obtenido cuando se utiliza la modulación 16QAM, es inferior al ofrecido por el sistema QPSK, debido a que la cantidad de bits enviados es superior, aumentando de este modo la BER.

Respecto a las curvas verde y violeta que ilustran el comportamiento del sistema con modulación 16QAM, variando el número de antenas, se observa que para un arreglo 2x2, el desempeño es ligeramente mejor que para uno 4x4, cuya diferencia no es significativa. Sin embargo 4x4 permite transmitir más información.

La tabla 5.4 muestra valores de BER que varían respecto a la configuración del sistema y a la E_b/N_0 utilizada. Por ejemplo, se observa que para valores de energía de bit de 14 dB la BER es la misma con arreglos 2x2 y 4x4, utilizando en ambos casos modulación QPSK, mientras que para 16QAM, ZF de 4x4 presenta una BER mayor que en 2x2.

Eb/No (dB)	BER			
	ZF-2x2-QPSK	ZF-4x4-QPSK	ZF-2x2-16QAM	ZF-4x4-16QAM
0	0.2885	0.3012	0.6581	0.6849
2	0.235	0.235	0.5869	0.6343
4	0.1569	0.1706	0.5092	0.5728
6	0.1056	0.1175	0.4319	0.4969
8	0.0666	0.0776	0.3194	0.4323
10	0.0426	0.0409	0.2238	0.3289
12	0.0324	0.0282	0.1759	0.2324
14	0.0159	0.0159	0.1263	0.1663
16	0.0099	0.0115	0.0802	0.1027
18	0.0088	0.0047	0.0449	0.0776
20	0.0050	0.0023	0.0273	0.0393

Tabla 5.4. BER vs Eb/No en el escenario 4.

5.1.5 Escenario 5

El escenario 5 es un sistema MIMO con algoritmo de detección ML, variando el número de antenas y la modulación utilizada. La figura 5.5 muestra los resultados obtenidos en dicho escenario.

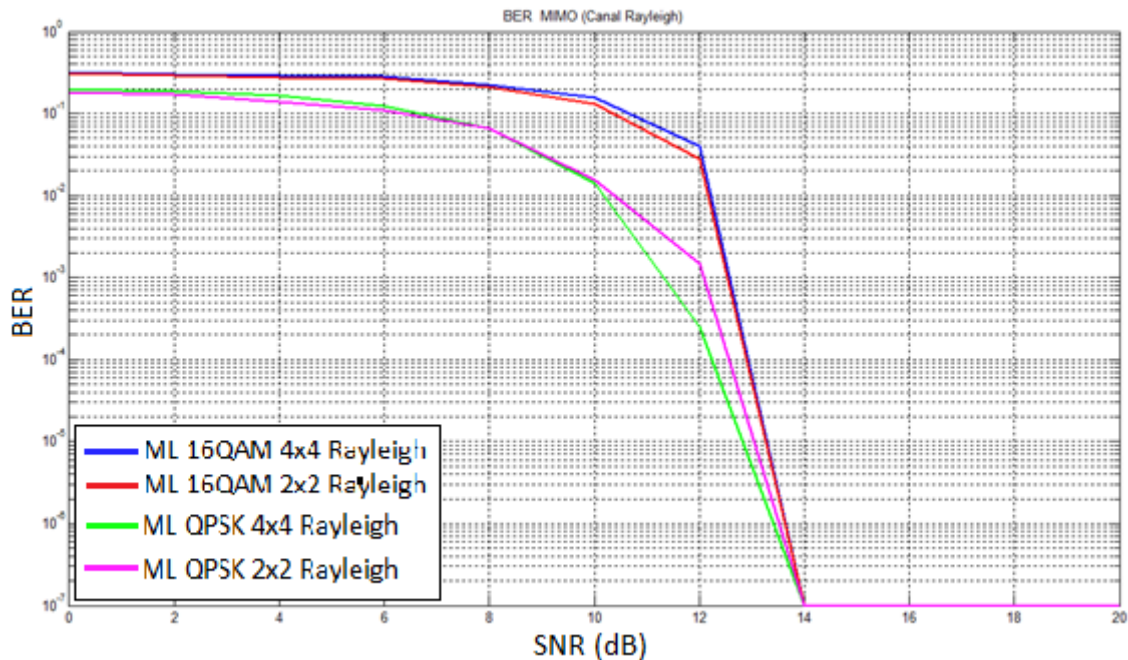


Figura 5.5. Escenario 5: BER Vs Eb/No ML.

Las curvas ilustran el desempeño del sistema dependiendo la configuración empleada. Para este escenario se usan las modulaciones QPSK y 16QAM, arreglos 2x2 y 4x4, canal Rayleigh, se transmiten trescientas tramas de 1024 bits cada una. Las curvas que representan cada configuración están definidas así:

- Azul: Modulación 16QAM, arreglo de antenas 4x4
- Rojo: Modulación 16QAM, arreglo de antenas 2x2
- Verde: Modulación QPSK, arreglo de antenas 4x4
- Violeta: Modulación QPSK, arreglo de antenas 2x2

El arreglo 2x2 con modulación QPSK es la configuración que mejor desempeño ofrece, seguido por el que utiliza QPSK, con arreglo de antenas 4x4. Los resultados más bajos son los de las configuraciones 2x2 y 4x4 que emplean 16QAM, dado que se envían más bits en un mismo instante de tiempo comparado con QPSK, aumentando la interferencia intersimbólica en la comunicación.



El número de antenas empleadas también influye en el desempeño de los sistemas MIMO que utilizan ML. La figura 5.5 muestra que para arreglos 2x2 se obtiene un mejor desempeño que para arreglos 4x4, cuando los sistemas utilizan la misma modulación. A mayor número de antenas utilizadas es mayor la presencia de interferencia intersimbólica, además se hace más compleja la detección en el receptor, generando aumentos en los valores de la BER.

De la figura 5.5 se puede deducir que el principal factor que influye en el desempeño de un sistema MIMO que usa el algoritmo de detección ML es la modulación empleada, seguido por el número de antenas. La tabla 5.5 indica los valores de E_b/N_0 requeridos para obtener determinados valores de BER deseados. A partir de 14 dB de E_b/N_0 , la BER tiene valores tan bajos que se acercan a cero.

Eb/No (dB)	BER			
	ML-2x2-QPSK	ML-4x4-QPSK	ML-2x2-16QAM	ML-4x4-16QAM
0	0.181	0.1962	0.3127	0.3231
2	0.1705	0.1865	0.2917	0.3035
4	0.1405	0.1638	0.271	0.2946
6	0.1085	0.1248	0.2652	0.28
8	0.0655	0.066	0.2095	0.2266
10	0.0155	0.014	0.1293	0.1577
12	0.0015	0.00025	0.028	0.0398
14	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}
16	0	0	0	0
18	0	0	0	0
20	0	0	0	0

Tabla 5.5. BER vs Eb/No en el Escenario 5.



5.1.6 Escenario 6

El escenario 6 es un sistema MIMO con modulación 16QAM, AWGN, 4x4, transmitiendo 100 tramas de 100 bits, variando los algoritmos de detección. La figura 5.6 muestra los resultados de la variación de los algoritmos de detección con modulación 16QAM, canal AWGN y arreglo de antenas 4x4.

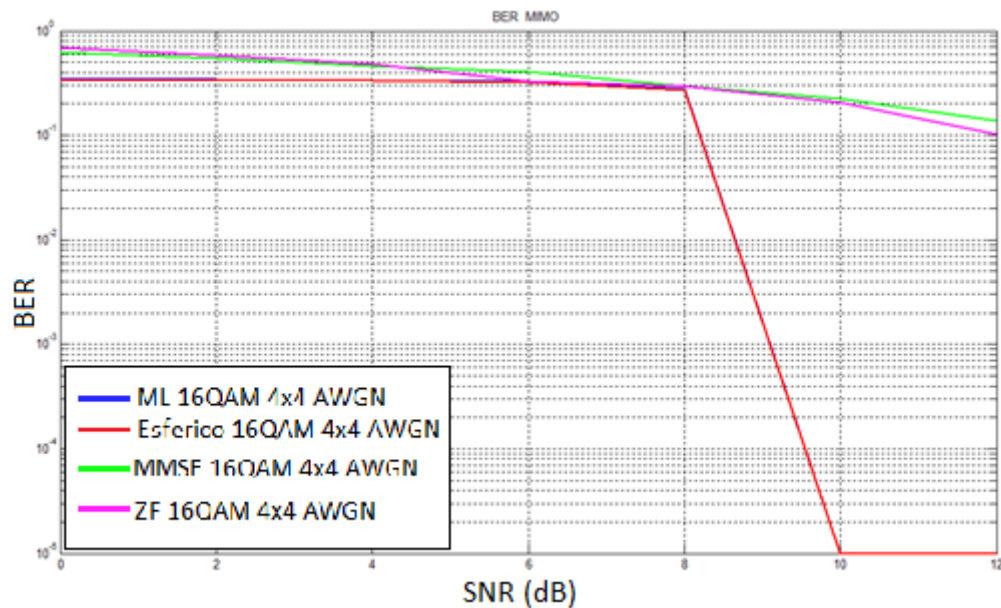


Figura 5.6. Escenario 6: BER Vs Eb/No para los cuatro algoritmos.

De acuerdo a la figura 5.6, el desempeño del sistema es mejor al presentado anteriormente con el canal Rayleigh. Esto se especifica más detalladamente en el escenario 9. Se convierte en una constante encontrar que MMSE es el algoritmo de peor desempeño, cuando se emplea la modulación 16QAM, siendo superado levemente por el algoritmo ZF, tal como se observó en el escenario 1. Al trabajar con el modelo de canal AWGN, el desempeño de los algoritmos ML y Esférico es superior a los anteriormente mencionados, al igual que cuando se utiliza el modelo de canal Rayleigh.



La figura 5.7 presenta la diferencia existente entre los algoritmos óptimos y subóptimos, en cuanto a tiempo de procesamiento medido por los comandos tic y toc de matlab, siendo ML el que más tiempo tarda en procesar la señal que recibe, seguido por el algoritmo Esférico, mientras que los tiempos de procesamiento de ZF y MMSE, son mucho más bajos que los requeridos por los algoritmos óptimos. Por ejemplo, ML requiere 800 segundos en procesar la señal enviada, utilizando una E_b/N_0 de 6 dB, mientras que el algoritmo Esférico tarda aproximadamente 35 segundos en hacerlo con la misma E_b/N_0 .

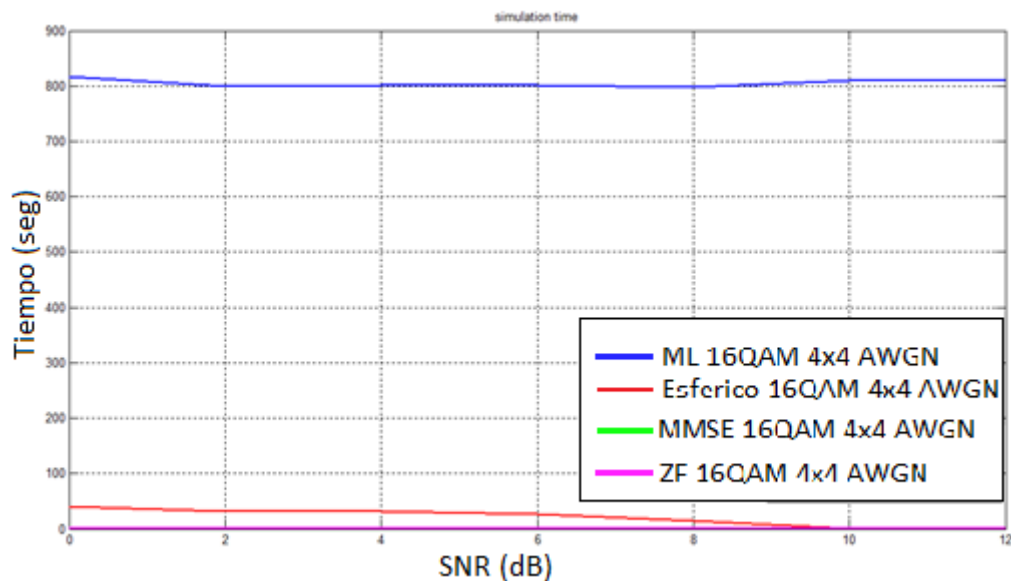


Figura 5.7. Tiempos de procesamiento Escenario 6.

5.1.7 Escenario 7

En el escenario 7 se trabaja con la siguiente configuración: modulación QAM, modelo de canal AWGN, arreglo de antenas 2x2, transmitidos 100 tramas de 100 bits cada una, variando los algoritmos de detección, ML(Azul), Esférico(Rojo), MMSE(Verde) y ZF(Violeta).

Teniendo en cuenta que el desempeño de la modulación 4QAM es similar al obtenido con una modulación QPSK, en este escenario se trabaja con la modulación 4QAM, en un sistema MIMO 2x2, variando los cuatro algoritmos de detección y haciendo uso del modelo de canal AWGN.

La figura 5.8 expone los resultados de la variación de los algoritmos de detección con modulación QAM, canal AWGN y arreglo de antenas 2x2.

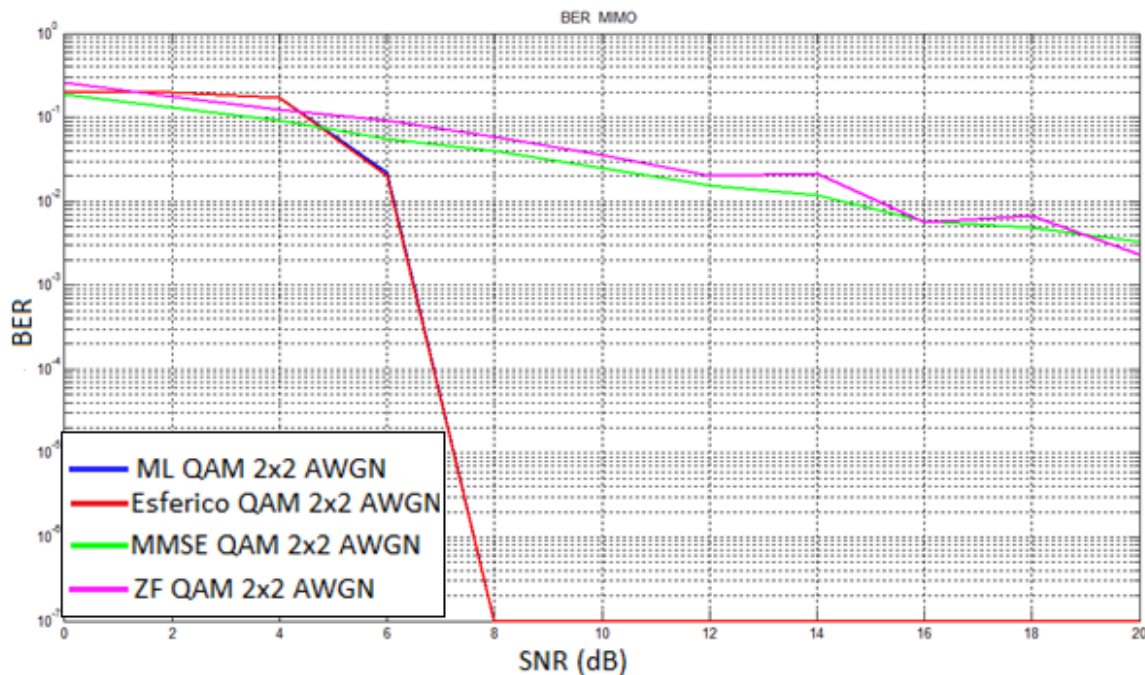


Figura 5.8. Escenario 7: BER Vs Eb/No para los cuatro algoritmos.

La figura 5.8 muestra que los algoritmos óptimos poseen una BER mayor que los subóptimos, sólo para los casos en que se tiene una E_b/N_0 entre 2dB y 4dB, para el resto de valores de E_b/N_0 , la BER de los cuatro sistemas presenta valores esperados.

El algoritmo de detección MMSE tiene mejor desempeño que el algoritmo ZF, contrario a lo que sucede cuando se simula con modulación 16QAM. El ecualizador implementado por ZF no trabaja con la eficiencia que lo hace el de MMSE, permitiendo el paso de ruido. MMSE utiliza el algoritmo de nombre: algoritmo de estimación del mínimo error cuadrático medio, en el cual el ruido es reducido al mínimo, lo que conlleva a mejorar la calidad de la señal recibida respecto a la recibida empleando ZF, pero con mayor número de errores detectados.

La diferencia en desempeño ofrecido por los algoritmos MMSE y ZF es muy pequeña, deduciendo que es mejor implementar un sistema MIMO que utilice ZF y no MMSE si se cuenta con pocos recursos. Para realizar la detección con ZF solo se necesitan conocer las características del canal, mientras que para realizarla con MMSE es necesario conocer la matriz de covarianza, la señal de referencia y las características del canal, lo que conlleva a una mayor complejidad, a cambio de resultados levemente mejores. Si los recursos disponibles no son un problema, la mejor opción es el algoritmo MMSE, porque brinda mejor desempeño que ZF, así sea mínima la diferencia entre los dos.



5.1.8 Escenario 8

En el escenario 8 se trabaja con la siguiente configuración modulación 16QAM, modelo de canal Rayleigh, arreglo de antenas 2x2 y 4x4, transmitidos 100 tramas de 100 bits cada una, variando los algoritmos de detección.

En primera instancia, en la figuras 5.9 y 5.10 se presentan las curvas de los cuatro algoritmos, con una configuración de antenas 2x2. Posteriormente se encuentran las gráficas 5.11 y 5.12 que contienen las curvas de los cuatro algoritmos de detección, con un arreglo de antenas 4x4. Para todos los casos se utiliza 16QAM, modelo de canal Rayleigh, se envían 500 tramas con un tamaño de 100 cada una y se varían los algoritmos de detección.

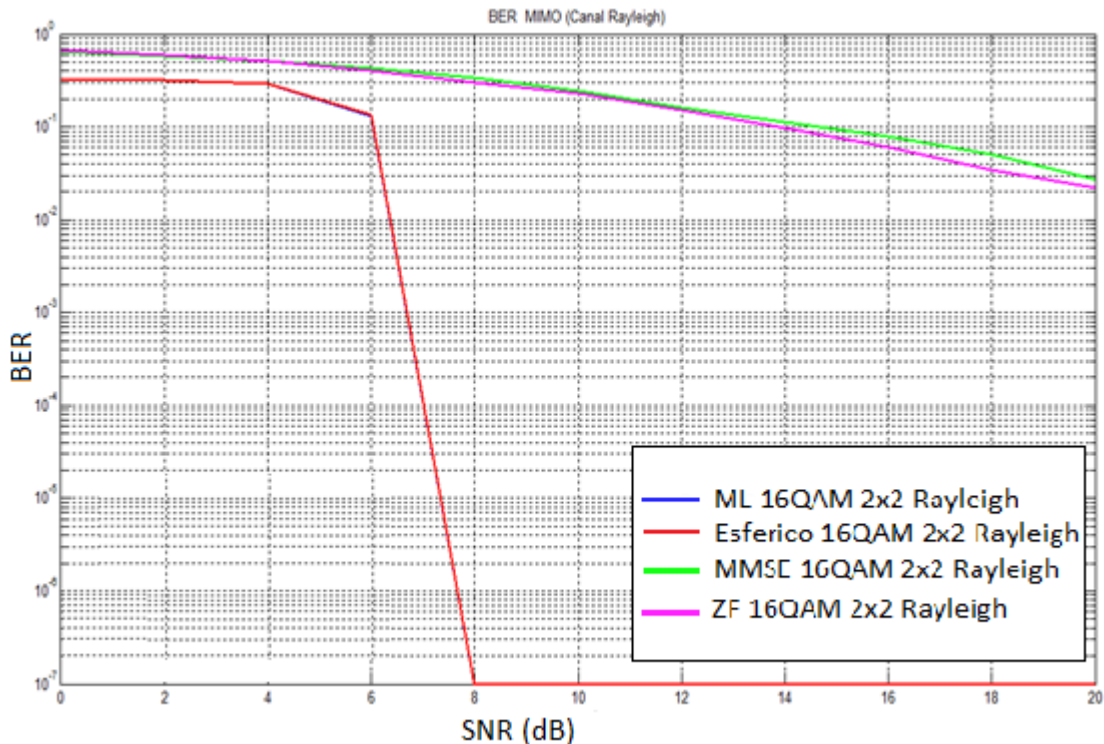


Figura 5.9. Escenario 8: BER Vs Eb/No para los cuatro algoritmos.



La figura 5.9 plasma las curvas resultantes de simular un sistema MIMO 2x2. En ellas se evidencia la diferencia presentada por los algoritmos subóptimos y los óptimos, en cuanto a desempeño. Por ejemplo, en la tabla 5.6 se visualiza la diferencia existente entre los dos tipos de algoritmos, cuando se trabaja con 8 dB de E_b/N_0 , el algoritmo ZF presenta una BER de 0.3025 y el algoritmo ML de 10^{-7} teniendo la misma configuración.

En este caso sucede lo mismo que lo observado en el escenario 7, para los algoritmos de detección ZF y MMSE, utilizando el modelo de canal Rayleigh, permitiendo un desempeño semejante, en donde la diferencia es mínima, dando mejores resultados el algoritmo ZF. En la tabla 5.6 se observa que ZF genera una BER de 0.06048 y MMSE de 0.07917 cuando se trabaja con una E_b/N_0 de 16 dB y la misma configuración.

El desempeño de los algoritmos Esférico y ML es superior a los ofrecidos por MMSE y ZF, su eficiencia es bastante alta y a medida en que se incrementa la energía de bit, la tasa de error de bit tiende a cero. Así se evidencia en la figura 5.9, que muestra las curvas de desempeño de estos algoritmos, cuya diferencia radica en el tiempo de procesamiento de la señal (figura 5.10). Lo anterior se evidencia en la tabla 5.6, si se observa que cuando la E_b/N_0 es 10 dB, los valores de BER generados por ZF y MMSE se asemejan así como también los generados por Esférico y ML, pero la diferencia entre los dos tipos de algoritmos es grande tal como se ilustra en los siguientes valores:

- ZF-4X4-16QAM: 0.3701
- MMSE-4X4-16QAM: 0.3779
- Esférico-4X4-16QAM: 10^{-7}
- ML-4X4-16QAM: 10^{-7}

El algoritmo ML es más complejo comparado con el algoritmo Esférico, ya que este último reduce considerablemente el número de operaciones realizadas para lograr la detección, lo cual se puede visualizar en las figura 5.10, que expone los tiempos en que cada algoritmo desarrolla el proceso de detección de la señal recibida. Por ejemplo, ML requiere 87 segundos para realizar la detección de una señal enviada con E_b/N_0 de 10 dB, mientras que el algoritmo Esférico 35 segundos, 52 segundos menos producto del menor número de operaciones realizadas por el algoritmo Esférico. Pese a que el desempeño es semejante para ML y Esférico, los tiempos de procesamiento de ML son superiores a cualquier otro algoritmo, convirtiéndolo en un algoritmo imposible de implementar.

En la figura 5.11 se ilustran los resultados obtenidos al simular los algoritmos de detección, empleando modulación 16QAM con un arreglo de antenas 4x4. Como se puede observar en la tabla 5.6, el desempeño es ligeramente menor que cuando se utiliza un arreglo de antenas 2x2, con la ventaja de incrementar la



capacidad del sistema. En esta tabla se indican los valores de BER obtenidos a medida que se incrementa la Eb/No, en donde cada letra y color representa una determinada configuración. Los valores de BER que se indican en la tabla 5.6 corresponden a las configuraciones siguientes:

- A(Amarillo): ZF-2x2-16QAM
- B(Azul): MMSE-2x2-16QAM
- C(Rojo): Esférico-2x2-16QAM
- D(Verde): ML-2x2-16QAM
- F(Púrpura): ZF-4X4-16QAM
- G(Azul claro): MMSE-4X4-16QAM
- H(Rojo oscuro): Esférico-4X4-16QAM
- I(Blanco): ML-4X4-16QAM

Eb/No (dB)	BER							
	A	B	C	D	F	G	H	I
0	0.6768	0.649	0.3319	0.3206	0.7458	0.7061	0.3376	0.3434
2	0.5913	0.5854	0.3193	0.3171	0.7067	0.634	0.3428	0.3338
4	0.506	0.5175	0.300	0.2951	0.6253	0.5732	0.3354	0.3313
6	0.4073	0.4321	0.1346	0.1338	0.4924	0.5245	0.3268	0.3242
8	0.3025	0.3376	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	0.3798	0.4019	0.2825	0.2675
10	0.231	0.2437	0	0	0.3701	0.3779	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
12	0.1519	0.1588	0	0	0.3051	0.2257	0	0
14	0.09855	0.1129	0	0	0.1187	0.1452	0	0
16	0.06048	0.07917	0	0	0.0916	0.1171	0	0
18	0.03442	0.05074	0	0	0.09	0.0802	0	0
20	0.02193	0.02725	0	0	0.0684	0.0289	0	0

Tabla 5.6. BER vs Eb/No MIMO 2x2 y 4x4 en el Escenario 8.

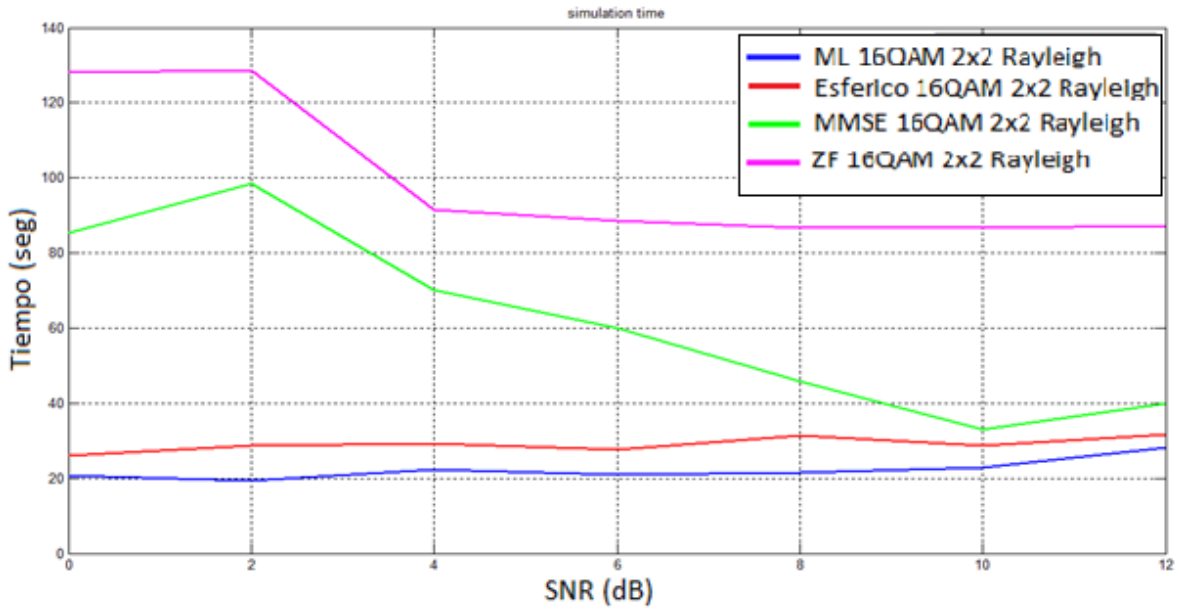


Figura 5.10 Tiempos de procesamiento Escenario 8.

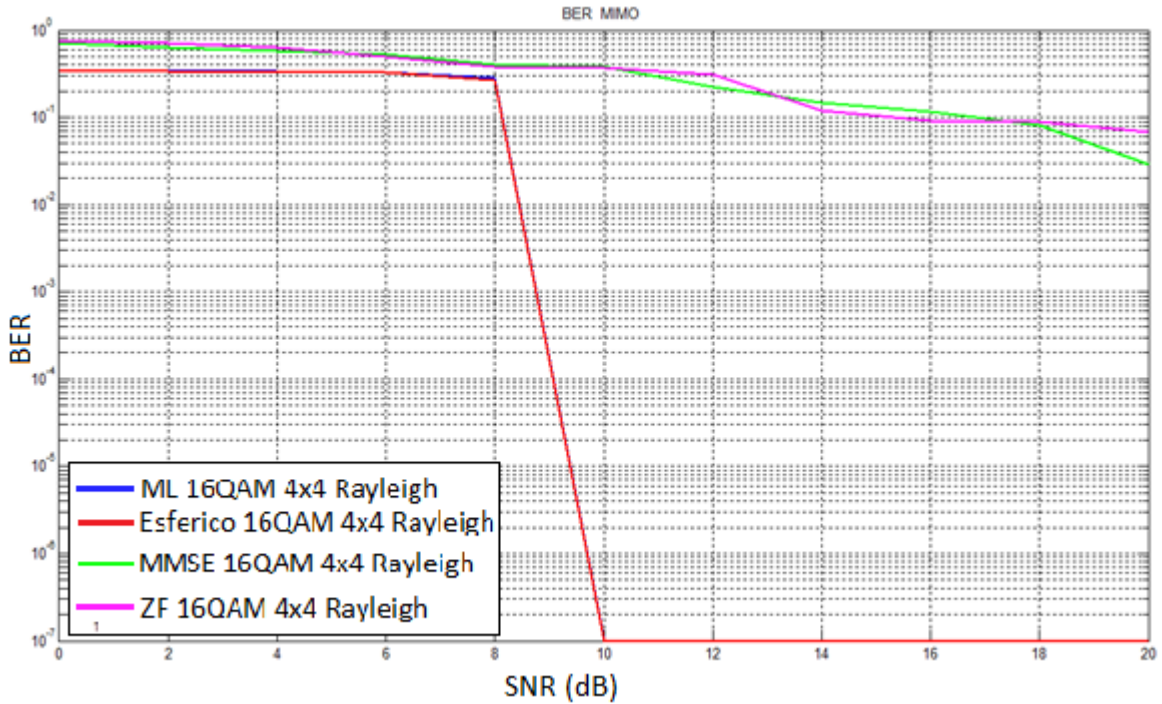


Figura 5.11. Escenario 8: BER Vs Eb/No para los cuatro algoritmos.

En la figura 5.12 las curvas indican los tiempos de simulación de un sistema MIMO 4x4, utilizando distintos algoritmos de detección y modulación 16QAM en un canal Rayleigh, donde se deduce que el tiempo tomado por el algoritmo ML (línea azul), es mayor al utilizado por el algoritmo Esférico (línea roja). Las líneas que representan a los algoritmos ZF y MMSE no se observan debido a que el tiempo de simulación, es inferior al de los algoritmos Esférico y ML.

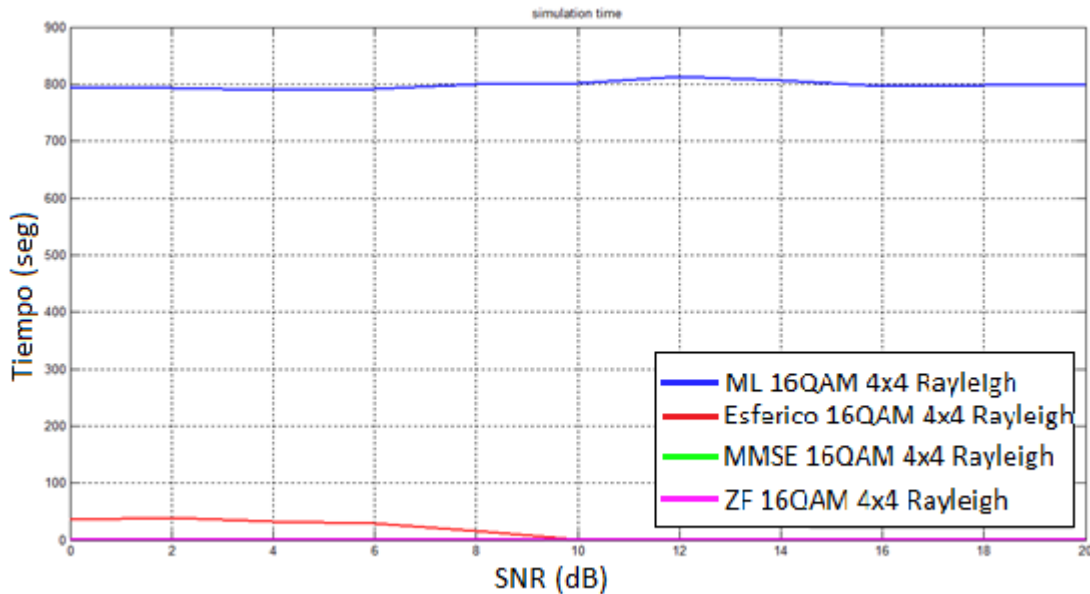


Figura 5.12 tiempos de procesamiento Escenario 8.

De la tabla 5.6 y las figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 se puede concluir que:

- El arreglo de antenas influye en el desempeño de un sistema MIMO que utiliza 16QAM. Esto siempre y cuando se aumente el arreglo de antenas de 2x2 a 4x4.
- Los algoritmos subóptimos están lejos de ofrecer un desempeño similar al ofrecido por los óptimos.
- La ventaja de los algoritmos subóptimos sobre los óptimos, además de su simplicidad de implementación, es el tiempo reducido empleado para realizar la detección de las señales recibidas.
- Los tiempos de procesamiento de ML son muy altos, haciendo de este un sistema aún imposible de implementar. Mientras que el algoritmo Esférico, es una de las mejores opciones disponibles en la actualidad, ya que ofrece tiempos de procesamiento aceptables con elevado desempeño.

5.1.9 Escenario 9

Con el escenario 9 se analiza el comportamiento de un sistema MIMO cuando se cambia el modelo de canal utilizado. En este caso se implementaron los dos modelos de canal más comunes: AWGN y Rayleigh. Es importante analizar este escenario porque AWGN agrega ruido blanco Gaussiano a su modelo de canal. Para este escenario se usa un arreglo de antenas 4x4, modulación 16QAM, algoritmos de detección ZF y MMSE, enviando 200 tramas, con tamaño de 100 bits cada una.

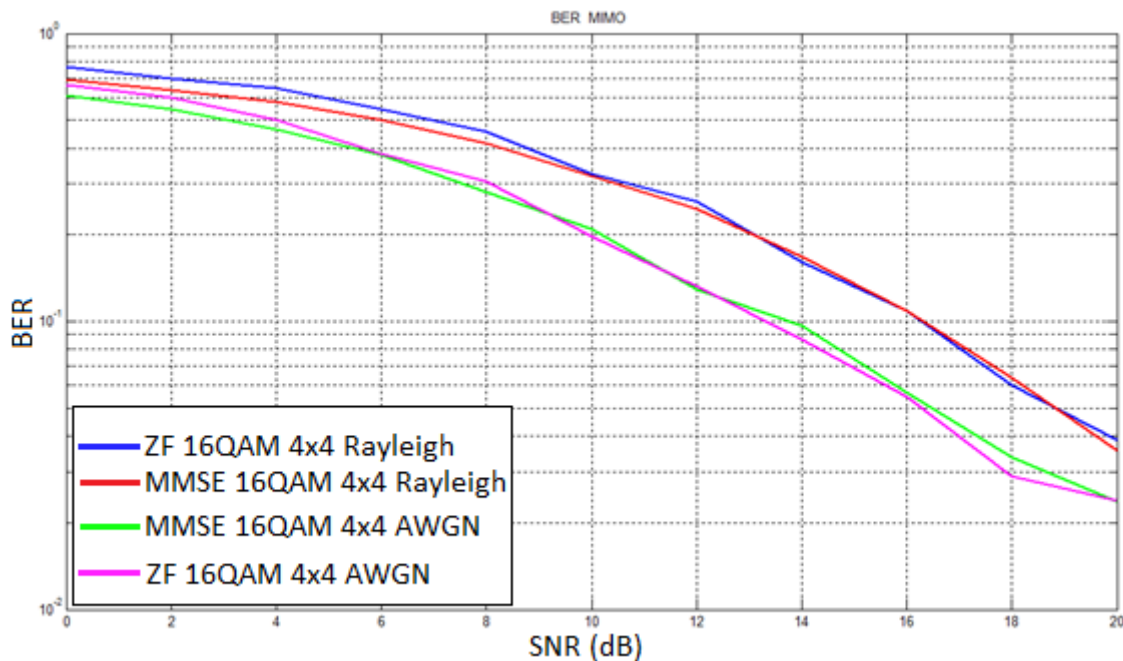


Figura 5.13. Escenario 9: BER Vs Eb/No ZF y MMSE.

La figura 5.13 revela que el desempeño de un sistema MIMO con canal AWGN es mejor en simulaciones que cuando se utiliza el canal Rayleigh, brindando mejores resultados en los dos casos a medida que se incrementa la SNR. La figura 5.13 indica que en un sistema MIMO ZF con modulación 16QAM y un modelo de canal AWGN es necesario una SNR de 13.2 dB para obtener una BER de 10^{-1} , mientras que con Rayleigh se necesita una SNR de 16.2 dB, evidenciando que un modelo de canal AWGN es mejor por ser un canal ideal y Rayleigh se aproxima más al desempeño de un sistema MIMO.

Teóricamente estos resultados son los esperados, ya que en un modelo de canal AWGN solo se tiene ruido blanco, mientras que en un modelo de canal Rayleigh además del ruido blanco, se tienen en cuenta las multitrayectorias generadoras de ISI, dando como consecuencia la aparición de más interferencia en el receptor y aumento en los valores de la BER.



En cuanto a los resultados presentados por los dos algoritmos, no son distintos a los indicados en otros escenarios y se continúa evidenciando que MMSE y ZF, son algoritmos de desempeño inferior al que ofrecen los algoritmos ML y Esférico. Nuevamente se observa que la diferencia entre ZF y MMSE es mínima.

La tabla 5.7 muestra los valores de SNR requeridos para alcanzar determinados niveles de BER, donde los resultados obtenidos indican que el desempeño con el canal AWGN, es mejor al obtenido con el canal Rayleigh, tal como se analizó y argumentó con anterioridad.

Eb/No (dB)	BER			
	ZF-Rayleigh	MMSE-Rayleigh	MMSE-AWGN	ZF-AWGN
0	0.7633	0.6923	0.6104	0.6644
2	0.6987	0.6331	0.5455	0.5996
4	0.6473	0.5776	0.465	0.5025
6	0.5434	0.5002	0.3797	0.3831
8	0.4546	0.4175	0.281	0.3053
10	0.325	0.3184	0.2091	0.1978
12	0.2609	0.2467	0.1287	0.1322
14	0.1608	0.1681	0.09677	0.0866
16	0.1088	0.1086	0.0565	0.0545
18	0.0599	0.0635	0.0338	0.0290
20	0.03869	0.0354	0.0237	0.02386

Tabla 5.7. BER vs Eb/No en el escenario 9.



6 Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se presentan las conclusiones de los resultados, dadas por las diferentes configuraciones utilizadas en los algoritmos MIMO y trabajos futuros.

6.1 Conclusiones

- La variación del desempeño del nivel físico de los sistemas MIMO depende de factores como el número de antenas en transmisión y en recepción, la modulación y el algoritmo de detección. Es necesario tener en cuenta los requerimientos mínimos y las características del sistema MIMO a implementar, para escoger la configuración más adecuada.
- Los algoritmos de detección ML y Esférico tienen un tiempo de procesamiento alto comparado con ZF y MMSE, pero un desempeño mejor. Los factores que influyen en el tiempo de procesamiento son: el orden de la modulación y la configuración de antenas, es decir, entre mayor sea el orden de la modulación y el arreglo de antenas, el tiempo de procesamiento será mucho mayor.
- El desarrollo de simulaciones es el punto de partida ideal para el estudio y verificación del comportamiento de diversos sistemas, ante la imposibilidad de construirlos o adquirirlos. Cuando se desarrollan simulaciones, es posible estudiar el comportamiento de varios tipos de sistemas, así como sus propiedades y verificar su funcionamiento, de forma más sencilla y económica que cuando se realiza una implementación real.
- Los sistemas MIMO al tener múltiples antenas, tanto en transmisión como en recepción, obligatoriamente deben contar con sistemas de procesamiento de señal más eficiente que los utilizados por otras tecnologías. Este aspecto debe ser tenido en cuenta por los desarrolladores y proveedores de servicios, ya que MIMO pese a su complejidad, combate inconvenientes como el desvanecimiento ocasionado en las señales a causa del multitrayecto.



- Los sistemas MIMO son una alternativa viable, ya que según su configuración pueden mejorar el desempeño y/o la tasa de transferencia. MIMO puede constituir una solución a la creciente demanda de servicios que implican la utilización de redes inalámbricas.
- La herramienta desarrollada, servirá a estudiantes de la FIET y programas de telecomunicaciones, como soporte de aspectos relacionados con los sistemas MIMO, también de aspectos asociados a las telecomunicaciones, tales como modulación digital, modelos de canal y multiplexación espacial.
- Los algoritmos de detección mostraron los resultados esperados, tal como se describe en la literatura, ML ofrece el mejor desempeño, mientras que el ofrecido por ZF y MMSE es apenas aceptable. Los desarrolladores de algoritmos de detección siguen en la tarea de encontrar un algoritmo de fácil implementación y de alto desempeño.
- El número de antenas es influyente en el desempeño de un sistema MIMO, pero lo es más aún, la modulación utilizada. Si se aumenta el número de antenas en el sistema, el desempeño presenta una caída en los valores de la BER debido a la presencia de multitrayectorias, mostrando un aumento en la complejidad en detección. La modulación influye considerablemente en el desempeño de un sistema MIMO, dado que si se utilizan modulaciones con mayor orden, aumenta la interferencia intersimbólica, afectando el desempeño del sistema.
- Los resultados obtenidos comprobaron que un arreglo de antenas 2x2, presenta mejor desempeño al ofrecido por un arreglo de antenas 4x4, debido que al presentar mayor número de antenas aumenta la ISI y la complejidad en recepción, con la ventaja de incrementar la capacidad de transmisión del sistema.
- Cuando se trabaje con simulaciones, es recomendable ceñirse a una metodología de desarrollo de simulaciones, dado que estas brindan los pasos a seguir para la obtención de resultados esperados. Una buena metodología de simulación seguida de forma correcta, garantiza éxitos en el resultado final, ya que en el transcurso de su elaboración se ejecutan aspectos como selección del lenguaje de programación, validación de resultados, monitoreo y control, entre otros.



- Es importante validar los resultados obtenidos de las simulaciones desarrolladas. La forma más efectiva es apoyarse en la teoría y en resultados de trabajos previamente elaborados y validados, con el objetivo de realizar comparaciones.

6.2 Trabajos Futuros

- Desarrollar un análisis de capacidad de un sistema MIMO que utilice otros tipos de algoritmos de detección, modulación y para sistemas 4x4, 8x8.
- Combinar los algoritmos de detección de MIMO con técnicas de acceso al medio como CDMA, FDMA, TDMA y OFDM con multiusuario.
- Realizar análisis de desempeño de algoritmos de detección de sistemas MIMO, distintos a los implementados en este trabajo de grado.



Referencias

- [1] D. Gesbert, M. Shafi, “*From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space–Time Coded Wireless Systems*”, Documento PDF disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.116.5395&rep=rep1&type=pdf>. [Citado 22 de junio del 2010].
- [2] G. Foschini, M. Gans, “*On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas*”, Documento PDF, vol. 6, paginas 311–335, Marzo de 1998, disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.116.5688&rep=rep1&type=pdf>. [Citado 22 de junio del 2010].
- [3] D. Duran, J. Olano, “Análisis del funcionamiento y desempeño del código de Alamouti en sistemas MIMO”, trabajo de grado, Noviembre 2006. [Citado 22 de junio del 2010].
- [4] C. Plaza, E. Rey, “Análisis Comparativo Entre un sistema SISO y un sistema MIMO”, trabajo de grado, Julio 2008. [Citado 21 de junio del 2010].
- [5] J. Becerra, “¿Está en MIMO el futuro inalámbrico?”. Disponible en: <http://www.red.com.mx/index.php?gadget=StaticPage&action=Page%id=9>. [Citado 03 de junio del 2010].
- [6] M. Elo, “*SISO to MIMO: Moving Communications from Single-Input Single-Output to Multiple-Input Multiple-Output*”, Keithley Instruments. Disponible en http://www.mobiusconsulting.com/papers/SISO-MIMO_WP.pdf [Citado 17 de Agosto del 2009].
- [7] W. Choi, K. Cheong, J. Cioffi, “*Iterative soft interference cancellation for multiple antenna systems.*” *Wireless Communications and Networking Conf*, Chicago, paginas 304–309. [Citado 18 de julio del 2009].



- [8] C. Oestges y B. Clerckx, “*MIMO wireless communications*”, Elseiver, 2007. [Citado 17 de Agosto del 2009].
- [9] H. Artez, D. Seethaler, “*Efficient Detection Algorithms for MIMO Channels: A Geometrical Approach to Approximate ML Detection*”, “*IEEE transactions on signal processing*”, vol. 51, No. 11, Pag. 2808-2820, Noviembre 2003. [Citado 18 de Agosto del 2009].
- [10] D. Waters, J. Barry. “*The Chase Family of Detection Algorithms for Multiple-Input Multiple-Output Channels*”, “*IEEE Transactions on Signal Processing*”, vol. 56, No. 2, Pag. 739-747, Febrero 2008. [Citado 20 de Agosto del 2009].
- [11] Rohde & Schwarz. “MIMO en redes de radio avanzadas: Requerimientos y soluciones de medida”. Páginas 36-37 España [Citado 22 de Agosto del 2009].
- [12] R. Diez. “Diversidad Espacial: Herramienta de Estudio y Evaluación”. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computadoras, Universidad Nacional del Sur, Argentina, octubre del 2007, disponible en http://170.210.92.6/rpic2007/cd/trabajos/rpic_estudiantil/educacion/326.pdf [Citado 20 de Agosto del 2009].
- [13] O. Fernández, “Caracterización Experimental y Modelado de Canal MIMO para aplicaciones WLAN y WMAN”, universidad de Cantabria Departamento de ingeniería de comunicaciones, mayo 2007, disponible en http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UC/AVAILABLE/TDR-1006108-131325//2de7.OFFcap2.pdf, [Citado 2 de septiembre del 2009].
- [14] D. So, R. Cheng, “Detection techniques for V-BLAST in frequency selective channels,”. *Wireless Communications and Networking 2002*, paginas. 487–491.
- [15] A. Paniagua, “Implementación de los algoritmos V-BLAST y D-BLAST y comparación con los Space-Time Codes para sistemas MIMO”, Proyecto Fin de Carrera, Marzo de 2006. Disponible en: <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/227/1/pfc1818.pdf>. [Citado Abril 03 de 2010].



- [16] D. Chizhik, F. Rashid-Farrokhi, F. Ling, A. Lozano, "Effect of antenna separation on the capacity of BLAST in correlated channels," IEEE vol. 4, paginas. 337–339, Noviembre 2000.
- [17] D. Pérez, "Teoría de Comunicaciones 2", Introducción a los Sistemas de Comunicación, 2009. Disponible en: <http://duberpp.hostoi.com/TC/>. [Citado 23 de Mayo del 2010].
- [18] E. Hernández, "Modelado teórico y experimental de la transmisión de una señal FSK utilizando la técnica de modulación de coherencia luminosa", Tesis de Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Electrónica universidad de Puebla, México, 2007. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/morales_h_oe/. [Citado 31 de Mayo del 2010].
- [19] J. Proakis, "*Digital Communications*", cuarta edición paginas 233-254 [Citado 23 de Mayo del 2010].
- [20] F. Payán "Transmisión de datos". Capítulo 5, señales digitalmente moduladas en canales AWGN. 2005-2006. [Citado 23 de Mayo del 2010].
- [21] T. Rappaport, "*Wireless Communications*", Editorial Prentice Hall, 1996. [Citado 30 de Mayo del 2010].
- [22] R. Dalke, G. Hufford, "*Analysis of the Markov Character of a General Rayleigh Fading Channel*", U.S. department of commerce. Abril 2005 [Citado 30 de Mayo del 2010].
- [23] Y Mahesh K. Li, "*Performance Analysis of ZF and MMSE Equalizers for MIMO Systems: An In-Depth Study of the High SNR Regime*". [Citado 29 de Mayo del 2010].
- [24] J. Jaldén, "*Maximum Likelihood Detection for the Linear MIMO Channel*". *Signal Processing Laboratory Department of Signals, Sensors and Systems, Royal Institute of Technology (KTH)*, 2004. [Citado 22 de abril del 2010].
- [25] R. Trujillo, "Algoritmos paralelos para la solución de problemas de optimización discretos aplicados a la decodificación de señales". Tesis doctoral Julio 2009, Universidad politécnica de Valencia. Disponible en <http://dspace.upv.es/xmlui/bitstream/handle/10251/7108/tesisUPV3099.pdf?sequence=1>. [Citado 15 julio 2010].



- [26] G. Ben Othma, R. Ouertani. “*Hard and soft Spherical Bound Stack decoder for MIMO Systems*”, “*Computer Science*”, “*Cornell University Library, Repos*”. 2008, Article No. 0811.1000, Noviembre 2008. <http://arxiv.org/abs/0811.1000>. [Citado 1 de Septiembre del 2009].
- [27] R. Cushing, “*A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis*”, técnicas para el uso de bloques de procesamiento digital de señales, 1999. Disponible en: http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/450968421DDS_Tutorial_rev12-2-99.pdf. [Citado 26 de Mayo del 2009]
- [28] I. Rioja, “Procesado de señal en comunicaciones”, Modulación QAM, 2007. Disponible en: <http://aholab.ehu.es/~inma/psc/>. [Citado Abril 27 de 2010].
- [29] H. Campanella, A. Morales, R. Saad, “Modulación QPSK no ideal en UTRA-TDD- Análisis de fase y potencia”, artículo analiza la modulación QPSK en UTRA-TDD, 5 de marzo de 2001. Disponible en: http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria_desarrollo/12/modulacion_qpsk_no_ideal_en_utra_tdd.pdf . [Citado Abril 18 de 2010].
- [30] S. Haykin, “Sistema de comunicación”, editorial limusa S.A, primera edición 2002. Capítulo 6 páginas 344-458. [Citado junio 30 de 2010].
- [31] E. Astaiza, H. Bermúdez, P. Muñoz, “Simulación de sistemas de telecomunicaciones”, Documento desarrollado por docentes de la Universidad del Cauca como guía para simular sistemas de telecomunicaciones, 2004. [Citado 25 de Abril de 2010].
- [32] T. Le-Tien, T. Ly-Huu, “V-blast detection in space-time coding wireless system and implementation on fpga”, Hochiminh city University of Technology Vietnam, descargada en http://www.dee.hcmut.edu.vn/isee2007/isee%202007%20proceedings/track_2_electronics&telecommunications/16.pdf [Citado 5 abril 2010]
- [33] M. Park, “Performance evaluation of multiuser detectors with v-blast to mimo channel”, descargada en http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-06182003-151603/unrestricted/Thesis_Mincheol_Park.pdf [Citado 15 diciembre 2009]
- [34] S. Ranvier, “*Overview of MIMO systems*” *Helsinki University of Technology*, descargada en <http://www.comlab.hut.fi/opetus/333/2004slides/topic47.pdf> [Citado 5 abril 2010].



- [35] S. Chen, “*The Sphere Decoding Algorithm Applied to Space-Time Block Codes*”, Marzo 2004, *Department of Signals, Sensors and Systems Royal Institute of Technology (IR-SB-EX-0409)* pag. 25-32. [Citado 5 enero 2010].