



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ANÁLISIS DE LA PROBABILIDAD DE ERROR DE BIT DE SISTEMAS
MIMO QUE UTILIZAN EL DETECTOR DE MÁXIMA VEROSIMILITUD EN
ESCENARIOS CON ESTIMACIÓN IMPERFECTA DEL CANAL.

AUTOR

Francisco Javier Balseca Bravo

AÑO

2020



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ANÁLISIS DE LA PROBABILIDAD DE ERROR DE BIT DE SISTEMAS MIMO
QUE UTILIZAN EL DETECTOR DE MÁXIMA VEROSIMILITUD EN
ESCENARIOS CON ESTIMACIÓN IMPERFECTA DEL CANAL.

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero en Redes y
Telecomunicaciones.

Profesor Guía

Doctor Henry Ramiro Carvajal

Autor

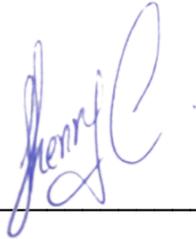
Francisco Javier Balseca Bravo

Año

2020

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, ANÁLISIS DE LA PROBABILIDAD DE ERROR DE BIT DE SISTEMAS MIMO QUE UTILIZAN EL DETECTOR DE MÁXIMA VEROSIMILITUD EN ESCENARIOS CON ESTIMACIÓN IMPERFECTA DEL CANAL, a través de reuniones periódicas con el estudiante Francisco Javier Balseca Bravo, en el semestre 202020, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.



Henry Ramiro Carvajal Mora

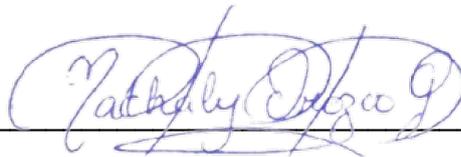
Doctor en Ingeniería Eléctrica en el Área de

Telecomunicaciones y Telemática.

C.I. 1721327862

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, ANÁLISIS DE LA PROBABILIDAD DE ERROR DE BIT DE SISTEMAS MIMO QUE UTILIZAN EL DETECTOR DE MÁXIMA VEROSIMILITUD EN ESCENARIOS CON ESTIMACIÓN IMPERFECTA DEL CANAL, de Francisco Javier Balseca Bravo, en el semestre 202020, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.



Nathaly Verónica Orozco Garzón

Doctor en Ingeniería Eléctrica en el Área de

Telecomunicaciones y Telemática

C.I 1720938586

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi auditoria, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke, positioned above a solid black horizontal line.

Francisco Javier Balseca Bravo

C.I 1722645742

AGRADECIMIENTOS

A Dios que guía mi camino, y especialmente a mis padres Bélgica y Julio que, con sus consejos, su amor, su sacrificio y su esfuerzo nunca dejaron que desfallezca para alcanzar mis metas

A mis hermanos Miguel y Gaby que siempre me han brindado sus consejos y su cariño incondicional.

A Johanna por su cariño, y motivación incondicional.

A la Universidad de las Américas, a mi director de la carrera y docentes, quienes me han brindado los conocimientos para alcanzar una formación de excelencia, y de manera especial la Doctora Nathaly Orozco y a mi tutor Doctor Henry Carvajal por su dirección, apoyo y paciencia brindadas a lo largo de esta investigación.

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado a mis padres y hermanos por sus enseñanzas sus consejos y su apoyo me enseñaron a nunca rendirme, que nunca es tarde para cumplir los sueños y metas que con esfuerzo y trabajo duro siempre se alcanzarán por más lejanos y oscuros que se vean.

RESUMEN

Los sistemas de comunicación inalámbrica constituyen una de las áreas de mayor desarrollo de las redes de telecomunicaciones, las cuales son impulsadas por nuevas tecnologías. El crecimiento exponencial de los usuarios demanda conexiones más rápidas y mayor velocidad de transmisión, lo que nos conlleva a pensar en cómo utilizar el espectro radioeléctrico de manera eficiente. La quinta generación (5G) de comunicaciones móviles busca nuevas tecnologías más eficientes que mejoren el desempeño del sistema, una de estas técnicas es múltiples entradas múltiples salidas (MIMO), que implica el uso de varias antenas de transmisión y recepción. Esta técnica es la principal motivación para el presente trabajo, en el cual se analiza la probabilidad de error de bit (BER) de un sistema MIMO, en un canal con desvanecimiento Rayleigh utilizando el detector de máxima verosimilitud (MLD) en el receptor considerando además una estimación imperfecta del canal y modulación por desplazamiento de fase (BPSK) y modulación en amplitud de cuadratura de orden cuatro (4-QAM). Los resultados muestran que cuando se aumentan las antenas de transmisión el desempeño del sistema empeora, pero cuando el número de antenas de recepción se incrementa, entonces la BER disminuye. Un aspecto interesante es que al aumentar las antenas de transmisión la inclinación de las curvas de la BER en función de la relación señal ruido no cambian y se mantienen paralelas, es decir, el sistema conserva su diversidad; por otra parte, se observó que la estimación imperfecta del canal afecta considerablemente el desempeño del receptor, estableciendo que, para BPSK se requiere de una estimación imperfecta de 95% para que el desempeño del sistema sea razonable. Lo propio para 4-QAM con un 98%.

Palabras claves: MIMO, MLD, Canal con estimación imperfecta.

ABSTRACT

Wireless communication systems constitute one with the areas of greatest development related to telecommunications networks. The exponential growth of users demands faster connections and higher transmission speed, which leads us to think about how to take advantage of using the frequency spectrum efficiently. The fifth generation (5G) of mobile communications aims more efficient technologies that improve the system performance. One of these techniques is multiple input multiple output (MIMO), which involves the use of various transmitting and receiving antennas. This technique is the main motivation for the present work, in which the bit error rate (BER) of a MIMO system is analyzed, in a channel with Rayleigh fading using the maximum likelihood detector (MLD) in the receiver considering also imperfect channel estimation, with binary phase shift keying (BPSK) and four level quadrature amplitude modulation (4-QAM). The results show that when the number of transmitting antennas is increased, the system performance degrades, but when the number of receiving antennas increases, the BER decreases. An interesting aspect is that, as the transmission antennas increase, the inclination of the BER curves as a function of the signal-to-noise-ratio does not change and remains parallel, that is, the system maintains its diversity; as well, it was observed that the imperfect estimation of the channel considerably affects the performance of the receiver, establishing that, for BPSK, an imperfect estimation of 95% is required for the system performance to be reasonable. The same for 4-QAM with 98%.

Key words: MIMO, MLD, Imperfect estimation channel.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Alcance.....	3
1.3 Justificación.....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo General.....	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
2 CAPITULO II. CONCEPTOS BÁSICOS	4
2.1 Introducción.....	4
2.2 Canal Inalámbrico.....	5
2.2.1 Modos de propagación	5
2.2.1.1 Propagación por Onda de Tierra.....	5
2.2.1.2 Propagación de Ondas de Cielo.....	6
2.2.1.3 Propagación con Línea de Vista.....	7
2.2.1.4 Propagación Sin Línea de Vista.....	8
2.2.2 Ruido.....	11
2.3 Modulación Digital	13
2.3.1 <i>Binary phase shift keying</i> (BPSK).....	13

2.3.2 Multilevel quadrature amplitude modulation (M-QAM).....	14
2.4 MIMO.....	15
2.4.1 Única entrada única salida - SISO.....	16
2.4.2 Única entrada múltiples salidas - SIMO.....	17
2.4.3 Múltiples entradas y una salida - MISO.....	18
2.4.4 Múltiples entradas múltiples salidas - MIMO.....	18
2.5 Detectores para MIMO.....	19
2.5.1 Detectores Lineales.....	20
2.5.2 Detector Óptimo.....	20
2.6 Probabilidad de Error de Bit.....	20
3 CAPITULO III. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	
MIMO/MLD.....	21
3.1 Introducción.....	21
3.2 Estructura Matricial de las Señales en el Receptor.....	22
3.2.1 Símbolos Transmitidos.....	23
3.2.2 Ganancia del Canal Inalámbrico.....	24
3.2.3 Ruido.....	24
3.3 Detector de Máxima Verosimilitud (MLD).....	25
3.4 Estimación Imperfecta del Canal.....	27

3.5 Código en Matlab.....	29
3.5.1 Simulación para BPSK.....	29
3.5.2 Simulación para 4-QAM.....	34
3.5.3 Código para Generar Gráficos Resultantes	37
4 CAPITULO IV. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL	
SISTEMA MIMO/MLD	39
4.1 Introducción	39
4.2 Análisis de la probabilidad de error de bit.....	40
4.2.1 Análisis para BPSK.....	40
4.2.2 Análisis para 4-QAM.....	48
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
5.1 Conclusiones	55
5.2 Recomendaciones.....	57
5.3 Trabajos Futuros	58
REFERENCIAS.....	59
ANEXOS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Propagación por ondas de tierra.....	6
Figura 2. Propagación de ondas de cielo.....	7
Figura 3. Propagación de línea de vista.....	8
Figura 4. Propagación sin línea de vista.....	9
Figura 5. Propagación con múltiples trayectos.....	10
Figura 6. Ruido blanco.....	11
Figura 7. Representación del ruido impulsivo.....	12
Figura 8. Modulación BPSK.....	14
Figura 9. Modulación M-QAM.....	15
Figura 10. Representación de SISO.....	17
Figura 11. Representación de SIMO.....	17
Figura 12. Representación de MISO.....	18
Figura 13. Representación de MIMO.....	19
Figura 14. Señal recibida en el sistema MIMO.....	22
Figura 15. Estructura de MIMO / MLD.....	27
Figura 16: Script MDL_MIMO_BPSK Parámetros del canal.....	30
Figura 17. Vector Options para BPSK.....	31
Figura 18. Sección Modulación PAM.....	32
Figura 19 Sección Canal para BPSK.....	33
Figura 20 Sección Canal imperfecto para BPSK.....	33
Figura 21 Sección MLD para BPSK.....	34
Figura 22. Sección parámetros del canal para 4-QAM.....	35
Figura 23. Sección Opciones para 4-QAM.....	35

Figura 24. Sección Modulación QAM	36
Figura 25. Sección Parámetros de entrada	37
Figura 26. Código utilizado para minorar la carga de procesamiento.	38
Figura 27 Sección de parámetros para la gráfica.....	39
Figura 28 BER en función de $EbN0$, parametrizado por At y el factor ρ considerando un sistema MIMO que utiliza MLD con $Ar = 2$ y modulación BPSK.	42
Figura 29 BER en función de $EbN0$, parametrizado por At y el factor ρ considerando un sistema MIMO que utiliza MLD con $Ar = 4$ y modulación BPSK.	44
Figura 30. BER en función ρ , parametrizado por At y $EbNo$ considerando un sistema MIMO que utiliza MLD con $Ar=2$, $Ar = 4$ y modulación BPSK.....	46
Figura 31. BER en función de Ar , parametrizado por At , ρ y $Eb No = 15dB$ considerando un sistema MIMO que utiliza MLD con modulación BPSK.....	47
Figura 32 BER en función de $EbN0 [dB]$, parametrizado por At y el factor ρ considerando un sistema MIMO que utiliza MLD con $Ar = 2$ en modulación 4-QAM.....	49
Figura 33 BER en función de la $EbN0 [dB]$, parametrizado por At y el factor ρ considerando un sistema MIMO que utiliza MLD con $Ar = 4$ en modulación 4-QAM.....	51
Figura 34. BER en función ρ , parametrizado por At y $EbNo$ considerando un sistema MIMO que utiliza MLD con $Ar=2$, $Ar = 4$ y modulación 4-QAM.....	53

INTRODUCCIÓN

En esta sección se presenta la problemática para el presente trabajo de titulación, así como la motivación, objetivos y generalidades para la realización de esta investigación.

1.1 Antecedentes

La tecnología en la actualidad ha dado pasos agigantados, sin embargo, el incremento de los usuarios y dispositivos electrónicos demanda el avance tecnológico considerando conexiones más rápidas, mayor velocidad de transmisión y un aumento considerable en la cantidad de procesamiento de datos, lo que conlleva a la necesidad de pensar en cómo aprovechar el desempeño de la transmisión y recepción de información en los sistemas de comunicaciones inalámbricas, focalizando el problema en el ancho de canal, la velocidad y la complejidad de la implementación de nuevas tecnologías.

Los sistemas de comunicación inalámbrica constituyen una de las áreas de mayor desarrollo de las redes de telecomunicaciones, las cuales son impulsadas por nuevas y novedosas tecnologías. El crecimiento exponencial de usuarios de telecomunicaciones requiere que nuevas investigaciones busquen mecanismos para atender a estos usuarios garantizando estándares de calidad.

Lo que las nuevas tecnologías de telecomunicaciones buscan es mejorar el desempeño del sistema desde el punto de vista de la transmisión y la recepción, permitiendo así el aumento de las velocidades de transmisión y de la confiabilidad de la comunicación, la cual puede medirse en términos de la probabilidad de error de bit.

El aumento de usuarios en las redes de comunicación celular en todo el planeta, las nuevas tendencias de servicios y el alto procesamiento de datos en las diferentes redes, ha evidenciado una problemática en la transmisión de información, conllevando a niveles de calidad poco deseables. Como resultado, nuevos desarrollos dan nuevas tendencias tecnológicas como aquellas

asociadas a los sistemas de quinta generación (5G). Una técnica propuesta para 5G y que ya se está usando es la denominada: MIMO o *Multiple Input Multiple Output* que es una tecnología que se refiere específicamente al uso de múltiples señales que viajan simultáneamente y en la misma frecuencia por un solo canal de radiofrecuencia, y que aprovecha la propagación multi-camino para incrementar la eficiencia espectral de nuestro sistema de comunicaciones inalámbrico (Anguís, 2008). Con este fin, se emplean varias antenas de recepción en las estaciones radio-base. Esta sería una de las soluciones para el tradicional cuello de botella, generado por el incremento de tráfico, pues se aumenta capacidad de transmisión por medio de la redundancia de antenas. Sin embargo, lograr este resultado no es fácil, existiendo una alta probabilidad de errores transmitidos, perdiendo información en bits de manera deliberada. Para resolver dicho problema se emplean técnicas de detección multiusuario, las cuales se pueden clasificar en dos categorías: detectores lineales y el detector óptimo.

Existen varios algoritmos que permiten la detección de las señales recibidas en un sistema MIMO, en el caso de los detectores lineales tenemos *Zero-Forcing* (ZF), que elimina la interferencia provocada por el resto de símbolos transmitidos, pero en la cual el sistema pierde diversidad a expensas de eliminar la interferencia, otra técnica es la *Minimum Mean Squared Error* (MMSE), que actúa igual que la ZF, pero además considera la potencia del ruido, ayudando así a reducir también los efectos del ruido. Por otra parte, para el algoritmo del detector óptimo se utiliza la técnica Máxima verosimilitud que minimiza de la probabilidad de error de bit. Específicamente el detector óptimo tiene el mejor desempeño, pero tiene mayor complejidad de implementación.

Consecuente con lo antes indicado, mediante el presente trabajo de titulación se pretende aportar con una de las nuevas tendencias para 5G, pues en este estudio se analizará el comportamiento de MIMO que utilizan la técnica *Maximun Likelihood* Detector a fin de determinar la probabilidad de error de bits en escenarios en los cuales el canal de comunicaciones no se estima de manera ideal en el receptor.

1.2 Alcance.

El alcance de este trabajo de titulación es analizar el desempeño de la tecnología MIMO, que utiliza el detector óptimo en entornos de estimación imperfecta del canal en términos de probabilidad de error de bit (BER). Para ello se utilizarán simulaciones realizadas utilizando el software MATLAB en diferentes condiciones de operación. En la presente simulación se pretende modelar un entorno de estimación imperfecta del canal utilizando modulaciones BPSK y 4-QAM.

1.3 Justificación.

El crecimiento exponencial de los usuarios de telecomunicaciones es el principal impulsador para el desarrollo de nuevas tecnologías de vanguardia, lo cual da paso a la inherente investigación de nuevas técnicas para la detección y procesamiento de señales, que a su vez constituye el principal desafío e incentivo para este trabajo de titulación.

Este trabajo pretende analizar el comportamiento del algoritmo de máxima verosimilitud en sistemas MIMO, en términos de la BER. El análisis de este detector en escenarios con estimación imperfecta del canal es fundamental, pues emula un escenario real, pretende aportar a la investigación de nuevas tecnologías que pueden ser implementadas en redes 5G.

Para que la detección óptima opere de forma adecuada en sistemas MIMO es necesario conocer el canal de comunicaciones en el receptor. Desafortunadamente la estimación de dicho canal no es perfecta en el receptor y, por lo tanto, pueden existir fallas en la recepción. (Wang, Au, Murch, & Lau, 2007) y (Zhu & Murch, 2002)

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Analizar el desempeño del algoritmo de detección de máxima verosimilitud para sistemas MIMO, en escenarios con estimación imperfecta del canal mediante la probabilidad de error de bit en diferentes escenarios de operación.

1.4.2 Objetivos específicos

- Entender y analizar la operación del algoritmo de detección óptimo (Detector de Máxima Verosimilitud) cuando opera en sistemas MIMO.
- Simular la técnica de detector de máxima verosimilitud para sistemas MIMO considerando estimación imperfecta del canal inalámbrico utilizando rutinas en el software Matlab.
- Evaluar el desempeño del algoritmo máxima verosimilitud para sistemas MIMO en términos de la probabilidad de error de bit considerando las modulaciones de BPSK y 4-QAM.
- Comparar el desempeño del detector MLD en escenarios de estimación perfecta e imperfecta del canal.

CAPITULO II. CONCEPTOS BÁSICOS

2.1 Introducción

Hoy en día las comunicaciones inalámbricas son muy importantes en la vida de las personas, a tal punto que, desplazan las redes cableadas en algunos segmentos del sector de telecomunicaciones. Por este motivo, el crecimiento exponencial del usuario y sus dispositivos electrónicos saturan el espectro radioeléctrico. Esta es una de las principales motivaciones para mejorar el uso eficiente del espectro radio eléctrico. Estas nuevas técnicas facilitarán la implementación de las nuevas tecnologías de quinta generación (5G).

Para entender el presente trabajo, es fundamental conocer los aspectos básicos relacionados con la transmisión en los sistemas de comunicaciones inalámbricas. Específicamente, nos referimos a conceptos relacionados con el canal inalámbrico, los esquemas de modulación, además de una descripción de los sistemas MIMO y la forma en que se detecta la señal en este tipo de sistemas.

Este capítulo se encuentra organizado de la siguiente manera: se describirán los conceptos básicos para entender esta investigación, en la sección 2.2 se describe el canal inalámbrico, seguida por la sección 2.3 que se menciona la modulación digital, la sección 2.4 en la que se establece una reseña de las configuraciones de MIMO, en la sección 2.5 se hará una introducción a los detectores MIMO y finalmente en la sección 2.6 se explica la probabilidad de error de bit.

2.2 Canal Inalámbrico

En esta sección se describirá los aspectos básicos relacionados con el canal inalámbrico, se realizará una breve reseña de los modelos de propagación, desvanecimiento, además de una caracterización del canal multitrayecto.

2.2.1 Modos de propagación

A continuación, se describirá como viajan las ondas irradiadas desde una antena receptora hacia una antena trasmisora.

2.2.1.1 Propagación por Onda de Tierra.

Este tipo de onda es propagada describiendo un trayecto semejante a la superficie terrestre. Este tipo de ondas pueden transmitirse recorriendo distancias sobre la línea de horizonte visible.

Esta onda electromagnética sufre los efectos de difracción, es decir, cuando este tipo de onda son transmitidas chocan con los obstáculos y la dirección tiende a curvar hacia el centro de la tierra realizando una pequeña curvatura. Su principal

uso está en la transmisión de radio de amplitud modulada (AM) con frecuencias hasta los 2 MHz (Proakis & Mosoud, 2007).

En la figura 1 se puede observar una gráfica de un enlace radioeléctrico representando la trayectoria que tiene la señal, en la cual describe una ligera curvatura al centro de la Tierra entre las antenas transmisora (Tx) y receptora (Rx).

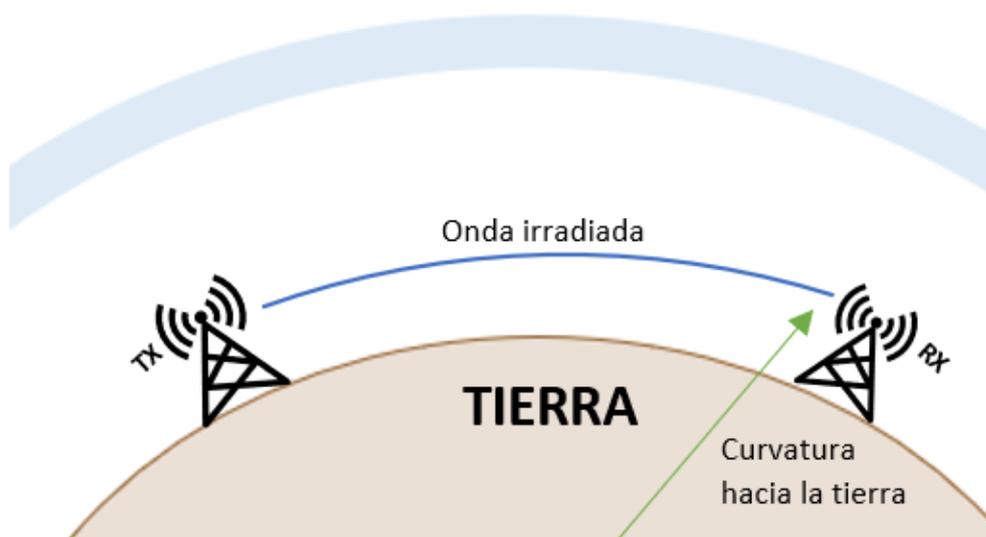


Figura 1. Propagación por ondas de tierra.

2.2.1.2 Propagación de Ondas de Cielo.

Este tipo de propagación se basa en el efecto de reflexión, dicho efecto no permite traspasar a otro medio, por lo cual se forma una barrera invisible a causa del ancho de la ionósfera lo que provoca rebotes de la señal.

En la figura 2 se puede observar como el trasmisor (Tx) y receptor (Rx) terrestres, la onda irradiada viaja hacia la ionosfera rebotando hacia la superficie de la tierra de forma progresiva llegando alcanzar grandes distancias, este fenómeno se denomina reflexión.

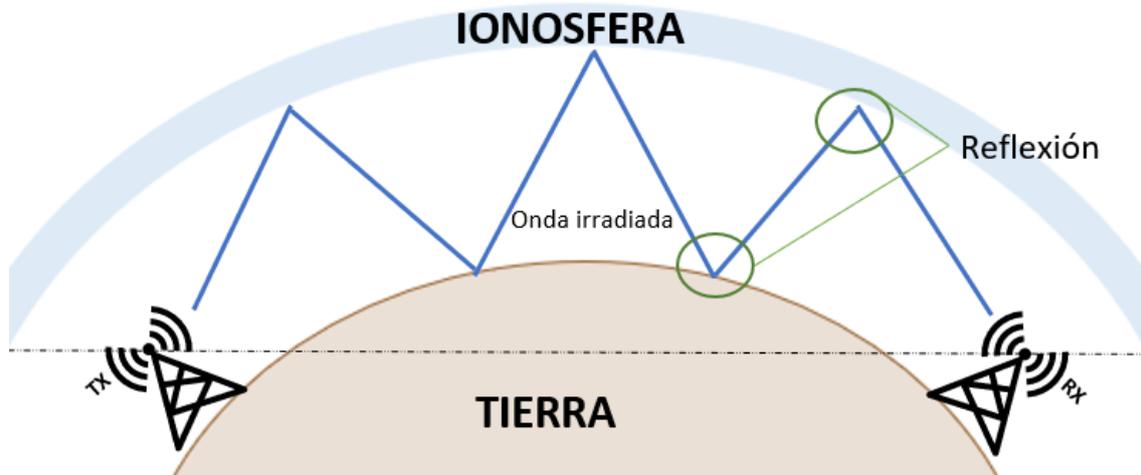


Figura 2. Propagación de ondas de cielo.

Estas ondas se encuentran en el rango de los 2 a 30 MHz, cuya principal aplicación está enfocada en los radioaficionados y radios de banda ciudadana (Perez, 2007).

2.2.1.3 Propagación con Línea de Vista.

En este caso, las ondas electromagnéticas permiten realizar enlaces microondas. Estos enlaces trabajan en frecuencias sobre los 30 MHz, en cuyo caso no existe el proceso de reflexión con la capa de la ionosfera y la superficie. Este tipo de enlaces tienen línea de vista (LOS) entre el transmisor y el receptor, es decir, se deben apuntar el receptor y el transmisor de tal manera que sus antenas estén alineadas para poder establecer el enlace de comunicación sin que ningún objeto esté entre ambas antenas.

La distancia en la que se puede irradiar no debe ser más allá de la línea del horizonte. Otra forma para transmitir distancias es a través de enlaces de comunicación satelital.

En la figura 3 se observa dos representaciones de enlaces con línea de vista, en la sección a) hace referencia a un enlace corto apuntado directamente el receptor (RX) con el transmisor (TX); y, en la sección b) se observa una representación de un enlace satelital cuya onda irradiada parte del transmisor (TX) sube al satélite y pasa al receptor (RX).

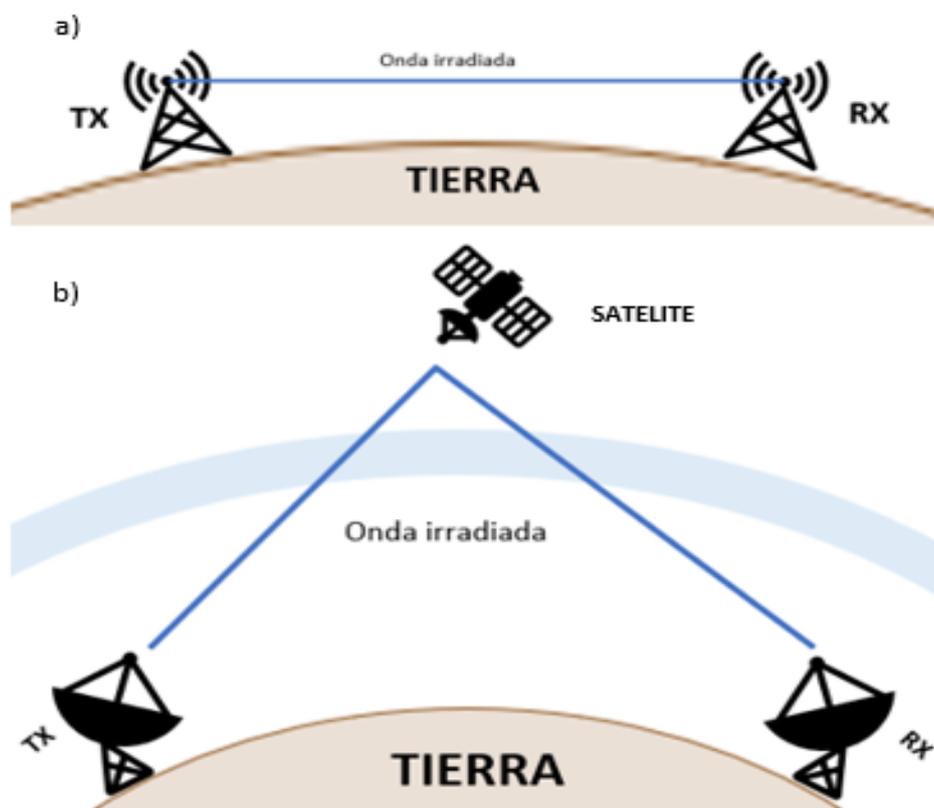


Figura 3. Propagación de línea de vista.

- a). Enlace línea de vista terrestre.
- b). Enlace línea de vista satelital.

Otra característica importante de este tipo de enlaces es la propagación por múltiples trayectos. En este caso debido a la reflexión estas chocan en la ionósfera y/u obstáculos. En estos casos, la señal de los enlaces de comunicación microondas pueden eliminarse en el receptor, pues las réplicas de la señal pueden llegar completamente desfasadas al receptor, lo que obviamente produce una anulación de la señal.

2.2.1.4 Propagación Sin Línea de Vista.

Esta propagación se caracteriza, porque no existe línea de vista (NLOS) entre el trasmisor y el receptor. Esto generalmente ocurre en entornos urbanos, debido a la presencia de edificios, casas, árboles que interfieren en una comunicación

directa del transmisor y receptor. Este tipo de propagación es típica de redes móviles celulares. En esta propagación, se hace hincapié en el análisis de las fluctuaciones aleatorias de la señal debido que esto podría destruir la señal. Para ello, se debe caracterizar a los fenómenos de grande y pequeña escala.

En la figura 4, se puede observar cómo irradia la señal desde la antena transmisora hacia todas las direcciones, rebotando en todo tipo de obstáculos como un entorno urbano, como se aprecia en la gráfica, hasta llegar al usuario final.

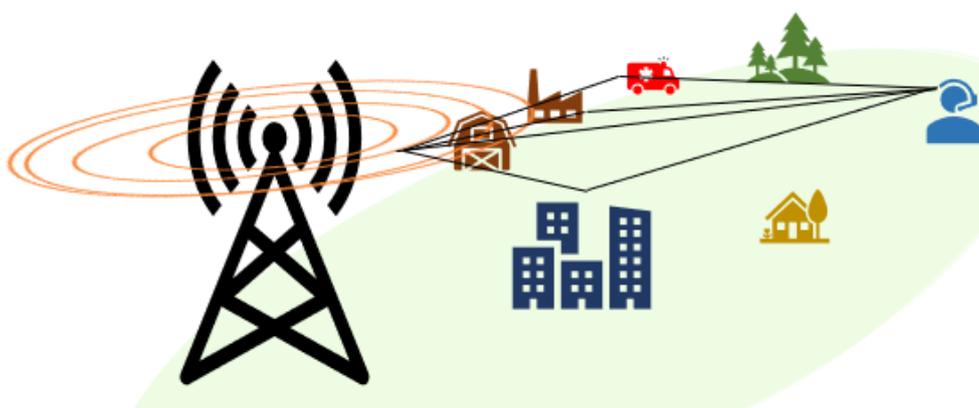


Figura 4. Propagación sin línea de vista.

Los fenómenos de **gran escala** están relacionados con la atenuación de la señal en relación con la distancia recorrida y los obstáculos en la transmisión y recepción. Las pérdidas por trayectoria, como su nombre lo indica, hacen referencia a la pérdida de potencia de la señal cuando está viajando una determinada distancia.

Otro fenómeno importante es el sombreadamiento, que es producido por los obstáculos entre el transmisor y el receptor, lo que produce fluctuaciones de la potencia recibida que se caracterizan por su lenta variación.

Los fenómenos de **pequeña escala** se caracterizan porque producen una rápida variación de potencia recibida. El fenómeno que modela este comportamiento se llama desvanecimiento, que es la fluctuación rápida de la potencia recibida en pequeñas distancias. El desvanecimiento puede caracterizarse en base al ancho

del canal, la velocidad de desplazamiento del dispositivo móvil, y la velocidad del equipo que utiliza el usuario (Proakis & Mosoud, 2007).

Al hablar de múltiples trayectos se hace relación a la respuesta al impulso del canal inalámbrico. Esta respuesta es una función del tiempo. Así, el canal de comunicaciones inalámbrico puede comportarse como un filtro lineal variante en el tiempo, en el cual se suman las réplicas de la señal transmitida, cambia en amplitud y fase el tiempo. La naturaleza de variaciones en el tiempo se da por el movimiento de los dispositivos móviles o del entorno.

En la figura 5, se puede observar el fenómeno de múltiples trayectos que no es más que, diferentes réplicas de onda irradiada original, las cuales son enviadas del transmisor (TX) hasta el receptor (RX), lo cual es perjudicial para el procesamiento de la señal debido a que pueden ser canceladas entre la señal original y sus réplicas.

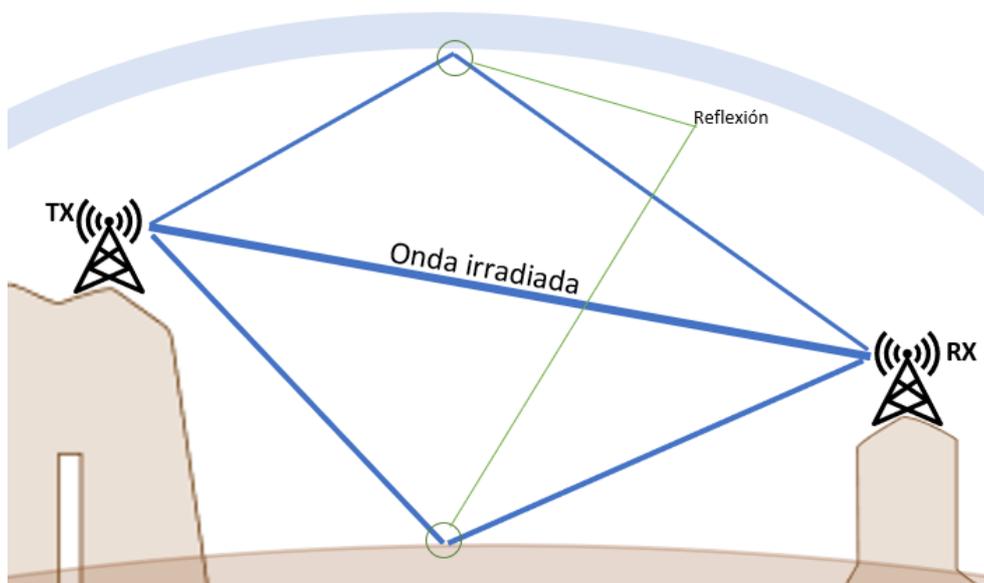


Figura 5. Propagación con múltiples trayectos.

La atenuación que se produce en la señal se puede modelar como un factor de multiplicativo a la señal transmitida. Este factor, a menudo denominado ganancia del canal h , se puede modelar por un proceso Gaussiano complejo de media cero en escenarios NLOS, la envolvente de este proceso es la amplitud del

desvanecimiento α , y puede modelarse como una variable aleatoria de tipo Rayleigh, cuya función densidad de probabilidad es:

$$y = hs + n, \quad \text{Ecuación 1}$$

dónde s es el símbolo transmitido y n es el ruido aditivo, el cual será descrito en la siguiente sección.

2.2.2 Ruido

El ruido es un tipo de interferencia que afectan a todos los sistemas electrónicos. Así, en estos sistemas se considera la existencia del ruido térmico y del ruido impulsivo que son producidos por el movimiento aleatorio de los electrones en los dispositivos semiconductores.

El ruido térmico, se produce esencialmente por el flujo de los electrones y su movimiento, el cual produce calor en las piezas electrónicas, es decir que todo dispositivo electrónico es propenso a este fenómeno.

En la figura 6, se puede observar una representación de la forma de onda de ruido blanco gaussiano aditivo.

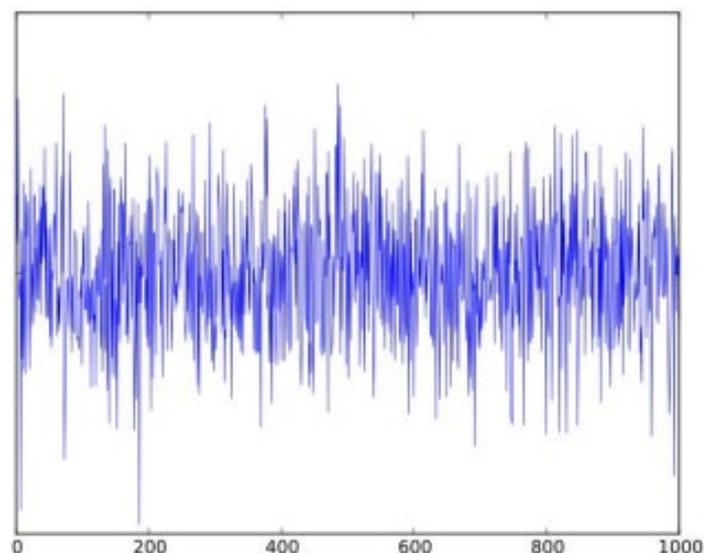


Figura 6. Ruido blanco.

Adaptado de (Márquez, 2012)

El ruido térmico también se lo conoce como ruido blanco, debido a que se encuentra distribuido uniformemente a lo largo del espectro de frecuencia.

El ruido impulsivo, afecta a las comunicaciones inalámbricas en diferentes fuentes como son las condiciones atmosféricas perturbaciones eléctricas. Sin embargo, no es crítico, pero resulta ser un gran problema para las telecomunicaciones por su gran diversidad de condiciones de ambiente (Márquez, 2012).

En la figura 7, se puede observar cómo los efectos de las descargas eléctricas precipitadas, como son los rayos, truenos, relámpagos, afectan a las comunicaciones inalámbricas debido a que ionizan el aire, el cual es el medio de propagación de estas señales, produciendo una mayor interferencia.



Figura 7. Representación del ruido impulsivo

Adaptado de (González, 2019)

El ruido típicamente se modela como una variable aleatoria Gaussiana compleja con media cero y varianza σ_n^2 (Perez, 2007).

Un canal AWGN agrega una señal de ruido blanco Gaussiano que lo atraviesa como se muestra en la siguiente ecuación 2, aquí la señal recibida es la suma de la señal transmitida s y el ruido n (Zenitha & Savitha, 2014).

$$y = s + n, \quad \text{Ecuación 2}$$

2.3 Modulación Digital

Modulación implica transformar uno o más bits en un símbolo único que se pueda transmitir en un canal en forma de onda. Para ello, el receptor recibe un conjunto de ondas las cuales forman parte de una constelación.

En la modulación el transmisor mapea los bits en amplitud, este proceso se lo conoce como mapeo, para luego agregar una frecuencia portadora a la señal. Antes de esto, las amplitudes (pulsos) pasan a través de un filtro cuya respuesta satisface el criterio de Nyquist para evitar la presencia de interferencia intersimbólica (ISI). En el receptor se demodulan las ondas recibidas para la obtención de los bits transmitidos.

En el presente trabajo de titulación se emplearán las técnicas de modulación *binary phase shift keying* (BPSK) y *quaternary quadrature amplitude modulation* (4-QAM) mismas que se describen a continuación.

2.3.1 *Binary phase shift keying* (BPSK)

BPSK es un esquema binario con modulación pasa-banda, el cual permite la transmisión de la información en una portadora en la cual la información se modula en fase de la misma. Esta fase puede asumir dos valores diferentes separados por π radianes. Por lo tanto, en la figura 8 se puede observar que generalmente se asumen los valores de 0 rad y π rad. Esta modulación transmite un bit por cada símbolo.

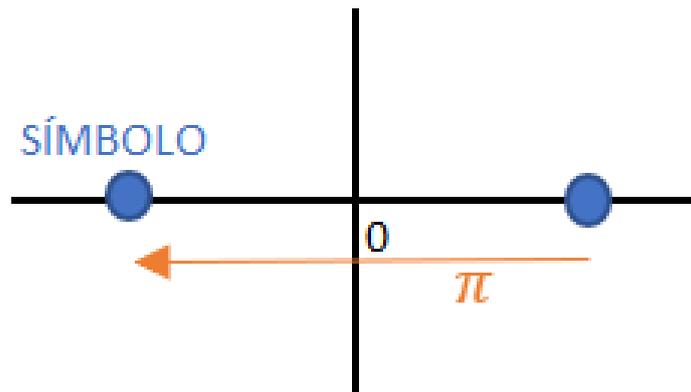


Figura 8. Modulación BPSK

Adaptado de (Proakis & Mosoud, 2007).

2.3.2 Multilevel quadrature amplitude modulation (M-QAM).

Es un esquema pasa banda, que permite transmitir información combinada en dos posibles portadoras ortogonales, utilizando la misma frecuencia, pero desfazada una fase de otra de $\frac{\pi}{2}$ radianes. Así, se puede transmitir información en estas portadoras de forma simultánea. M representa el número de símbolos de la constelación y está dado por:

$$M = 2^k, \quad \text{Ecuación 3}$$

dónde k representa el número de bits transmitidos por cada símbolo, M también se le conoce como el orden de la modulación. En la modulación M-QAM, dónde k , es una potencia de 2, la constelación se obtiene a partir de un producto cartesiano de dos constelaciones, separando una constelación para la fase y otra para la componente en cuadratura (Carvajal, 2019).

La Figura 9 muestra algunas constelaciones de diferentes modulaciones M-QAM. Se puede observar que aquellas en las que M es potencia de 2, la constelación tiene una forma cuadrada. Es necesario aclarar que la energía por símbolo en la modulación M-QAM es:

$$E_s = \frac{1}{2} \bar{S}^2 T_s, \quad \text{Ecuación 4}$$

donde \bar{s}^2 denota la potencia media de la constelación base, otro aspecto a tener en cuenta es la relación de la energía de símbolo con la energía de bit.

$$E_b = \frac{E_s}{\log_2 M} \quad \text{Ecuación 5}$$

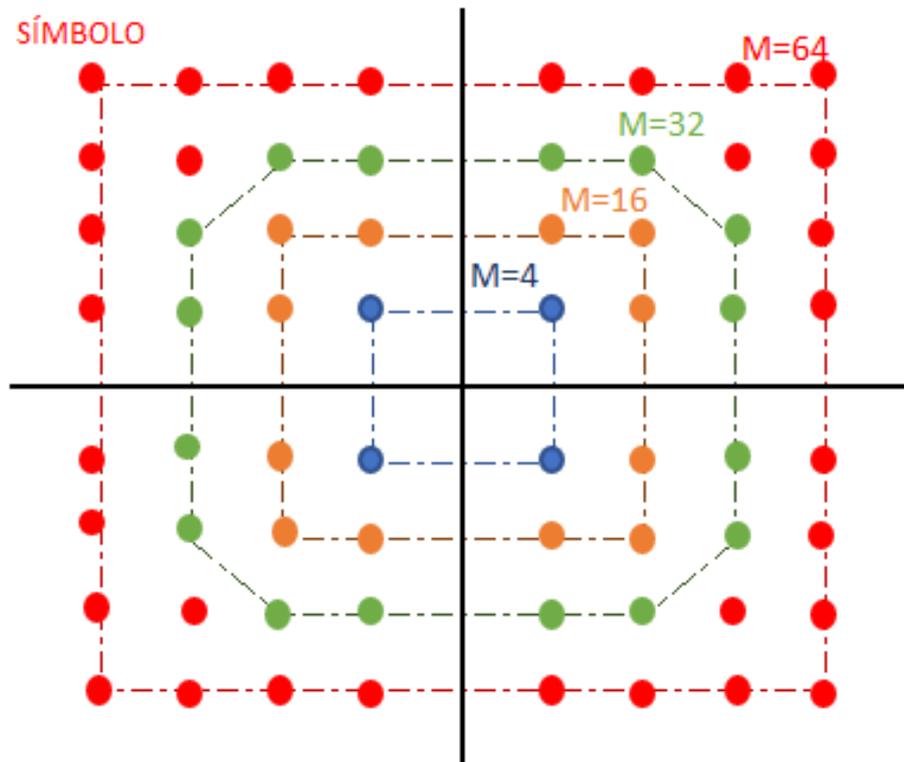


Figura 9. Modulación M-QAM

Adaptado de (Proakis & Mosoud, 2007).

2.4 MIMO

La demanda del tráfico y el incremento de los usuarios en las redes móviles han demandado nuevas tecnologías para que nuevos tipos de servicios y aplicaciones puedan ser ofrecidas. Con este fin, se ha resuelto utilizar un mayor número de antenas de transmisión y recepción lo que permite incrementar la denominada diversidad espacial, para mejorar el desempeño del sistema. Por otra parte, estas nuevas tecnologías requieren de receptores más complejos que sean también capaces de mitigar la interferencia.

Esta técnica se conoce como técnica de múltiples entradas y salidas (MIMO). La misma que facilita aprovechar la diversidad espacial debido a que utiliza un número grande de antenas receptoras. Esto permite captar varias réplicas de la señal transmitida, de manera que estas señales sean afectadas por desvanecimientos independientes. Esto, junto con un detector más robusto permite garantizar esta mejora de desempeño y a la vez, hacer que varios usuarios con dispositivos con una sola antena o un solo dispositivo con varias antenas puedan transmitir de forma simultánea en el mismo canal de comunicaciones.

En la siguiente sección se identificará y analizará la clasificación de MIMO, la cual se puede identificar por sus distintas configuraciones como es una entrada y una salida (SISO), una entrada y múltiples salidas (SIMO), múltiples entradas y una salida (MISO), múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) (Sim, Kim, Kim, & Lee, 2019)

2.4.1 Única entrada única salida - SISO.

SISO es la configuración de antenas más sencilla de implementar en un enlace de comunicación, implica una sola antena de recepción. Por lo tanto, es una técnica simple y robusta, pero sin diversidad; en consecuencia, es propensa a los efectos del desvanecimiento e interferencia y, además, no se puede transmitir varias señales en un mismo canal de comunicaciones.

En la figura 10, se puede observar un sistema en el cual consta con una antena transmisora (Tx) y una antena receptora (Rx).

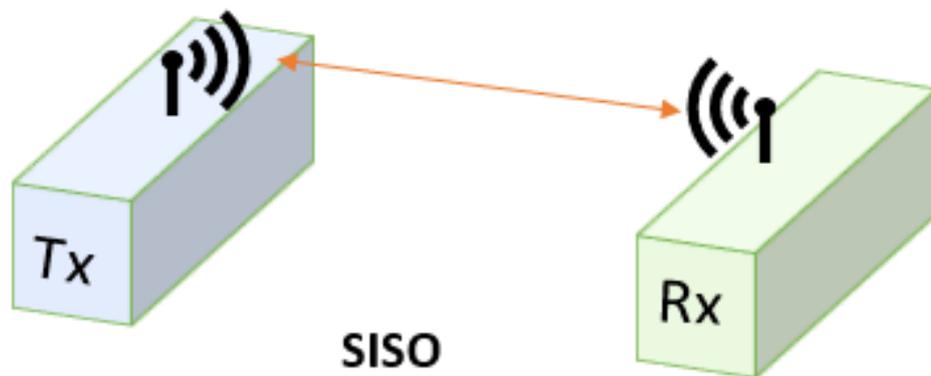


Figura 10. Representación de SISO

2.4.2 Única entrada múltiples salidas - SIMO.

La característica de este arreglo es que tiene una sola antena en el transmisor y múltiples antenas en el receptor, es decir que, tiene diversidad en el receptor ayudando a la disminución de los efectos de desvanecimiento. Por este motivo, se aumenta la complejidad y procesamiento en el receptor. No obstante, no se aumenta la velocidad de transmisión debido a que existe una sola antena en el transmisor.

En la figura 11, se puede observar un arreglo de antenas el cual hace representación a SIMO con una antena transmisora (Tx) y dos antenas receptoras (Rx).

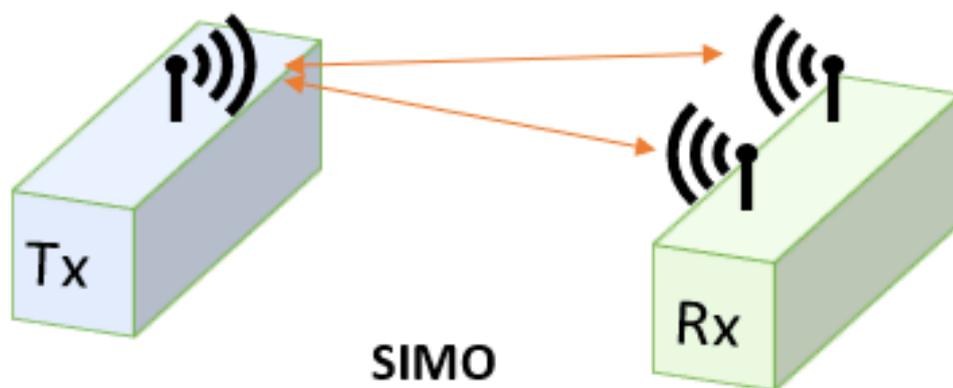


Figura 11. Representación de SIMO

2.4.3 Múltiples entradas y una salida - MISO.

En esta configuración, se tiene múltiples antenas de transmisión y una antena de recepción, dando como resultado diversidad en la transmisión permitiendo la comunicación redundante y así bajar el procesamiento en el receptor. En este caso, se puede aumentar la velocidad de transmisión, pero es necesario un procesador más complejo en el receptor.

En la figura 12, se puede observar un arreglo de antenas, el cual hace representación a MISO con dos antenas transmisoras (Tx) y una antena receptora (Rx).

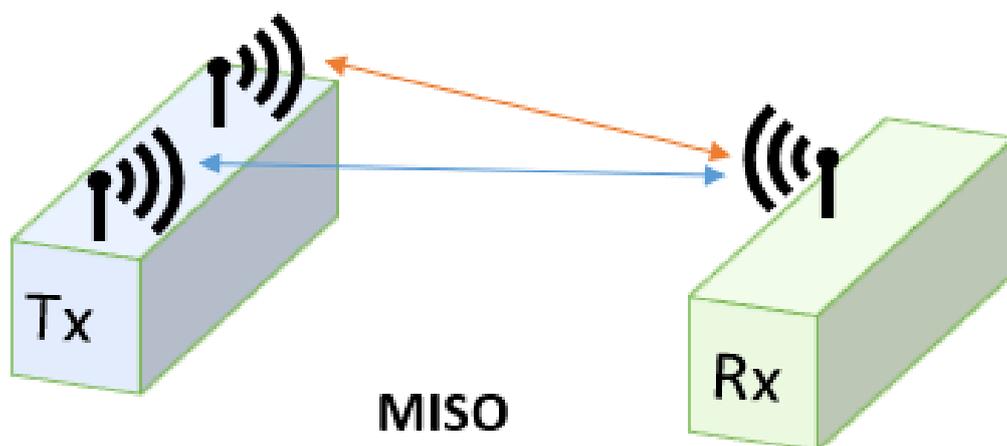


Figura 12. Representación de MISO

2.4.4 Múltiples entradas múltiples salidas - MIMO

MIMO permite optimizar la capacidad del ancho de banda del canal, esto se logra porque varios dispositivos transmiten de manera simultánea en un mismo canal de comunicaciones. Además, se obtiene diversidad en la recepción, lo cual permite contar con un sistema más robusto en el cual es posible incrementar la velocidad de transmisión.

El funcionamiento de esta técnica se basa en la codificación de la transmisión. Esta codificación se logra debido a que las señales son afectadas por diferentes

desvanecimientos. Así, esta técnica saca provecho de la propagación por múltiples trayectos (Raouf, Maha, Prayongpun, & Ammar , 2011).

Con MIMO, se transmiten diferentes símbolos en cada una de las antenas de transmisión y esto llega a diferentes antenas receptoras. Así, existen una interferencia producida por el diseño propio del sistema. En este caso, es necesario incrementar la complejidad del receptor a fin de eliminar esta interferencia.

En la figura 13, se puede observar un arreglo de antenas 2x2, que hace referencia a un sistema MIMO de dos antenas trasmisoras (Tx) y dos antenas receptoras (Rx).

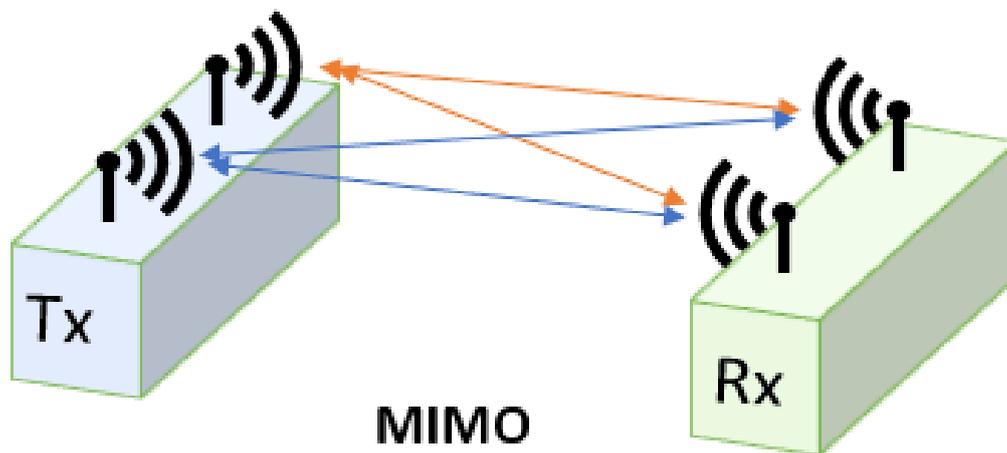


Figura 13. Representación de MIMO.

2.5 Detectores para MIMO

Antes de hablar del detector óptimo se debe establecer conceptos de detectores lineales subóptimos, los cuales son generalmente utilizados debido a que presentan un incremento de relación entre desempeño y complejidad de implementación.

2.5.1 Detectores Lineales

Estos detectores se clasifican como subóptimos, su principal característica se basa en su simplicidad y buen rendimiento, haciéndolos atractivos para la implementación. Se caracterizan porque aplican una transformación lineal en las señales recibidas. Para esto se debe emplear un banco de filtros, los cuales son diseñados con dos criterios, el detector *Zero Forcing* (ZF), el cual elimina la interferencia provocada por el resto de los símbolos transmitidos, pero en el cual el sistema pierde diversidad a expensas de eliminar la interferencia; el otro detector es *Minimum Mean Squared Error* (MMSE), que también actúa de forma similar al ZF, pero además considera la potencia del ruido en su implementación. Este detector tiene mejor desempeño que el ZF, pero también se caracteriza porque el sistema sacrifica diversidad a cambio de eliminar la interferencia.

2.5.2 Detector Óptimo

Este detector se utiliza en el presente trabajo de titulación. En la literatura se lo conoce como detector de máxima verosimilitud y se caracteriza porque tiene el mejor desempeño pues permite minimizar la probabilidad de error de bit. Dicho detector si bien tiene el compromiso para obtener mejor desempeño, pero también tiene mayor complejidad de implementación en el receptor que los detectores lineales. En la sección 3.3 del capítulo 3 se explicará a mayor detalle el funcionamiento de este detector óptimo.

2.6 Probabilidad de Error de Bit

La probabilidad de error de bit (BER) es la probabilidad de bits que llegan con error al receptor, es decir, es el número de bits con error detectados en una gran secuencia de datos transmitidos los cuales son afectados por un sin número de efectos nocivos en las comunicaciones inalámbricas como son: el ruido, la interferencia, distorsión o sincronización.

La probabilidad de error de bit se denota con la relación entre el número de error de bits recibidos con error entre el número total de bits transmitidos.

$$P_b = \frac{\#Bits\ Resibidos\ Error}{\#Total\ de\ Bits\ Transmitidos} \quad \text{Ecuación 6}$$

Como se explicó anteriormente existen diferentes factores que de alguna forma modificaran el valor de la BER estos tienen que ver con el medio y las características del canal como es la relación señal a ruido (S/N), más los efectos de interferencia intersimbólica de las diferentes modulaciones. Es decir, la variación de estos factores permitirá el aumento o disminución de la probabilidad de error de bit.

CAPITULO III. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MIMO/MLD

3.1 Introducción

En el presente capítulo se describe el modelo matemático del sistema MIMO, y el funcionamiento del detector óptimo de máxima verosimilitud (MLD) haciendo énfasis en el modelado de canal imperfecto y finalmente realizará una explicación del código desarrollado en el software de simulación de Matlab.

Como se mencionó en el capítulo II, cuando existe más de una antena de transmisión y más de una de recepción para establecer una comunicación la técnica se denomina MIMO, la cual permite mejorar el rendimiento del sistema de comunicación inalámbrica. De hecho, el detector óptimo es el algoritmo de MLD, cuya característica adicional es su complejidad exponencial. Por lo tanto, la presente investigación pretende entender y analizar el mejor desempeño que es posible obtener con MIMO, lo cual permitirá minimizar la probabilidad de error seleccionando el vector de símbolos, cuya métrica euclidiana es la de menor valor.

3.2 Estructura Matricial de las Señales en el Receptor.

En sistemas MIMO se separan los símbolos enviados, aprovechando las diferentes ganancias del canal de comunicaciones para la misma señal o diferentes señales viajando a través de diferentes trayectos, lo que resulta beneficioso debido a que se puede tener ganancias separadas por cada trayecto, el principal inconveniente que se presenta es la interferencia entre las señales transmitidas por diversas antenas, debido a que todas estas señales son transmitidas en la misma frecuencia.

Por lo tanto, MIMO es un sistema robusto que permite obtener una mayor capacidad del enlace (mayor velocidad de transmisión), mejorando significativamente la eficiencia espectral, aumentando su diversidad espacial, haciéndola más fuerte con mayor confiabilidad, incrementando el número de usuarios con mejor rendimiento.

Para la presente investigación se considera un sistema MIMO con A_t antenas transmisoras y A_r antenas receptoras. Dicho sistema opera en un canal aleatorio que varía en el tiempo, en el cual todas las ganancias son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas. Este sistema se muestra con mayor detalle en la Figura 14, donde h_{A_r, A_t} son las ganancias del canal s_{A_t} son los símbolos transmitidos y n_{A_r} es el ruido aditivo blanco Gaussiano (AWGN).

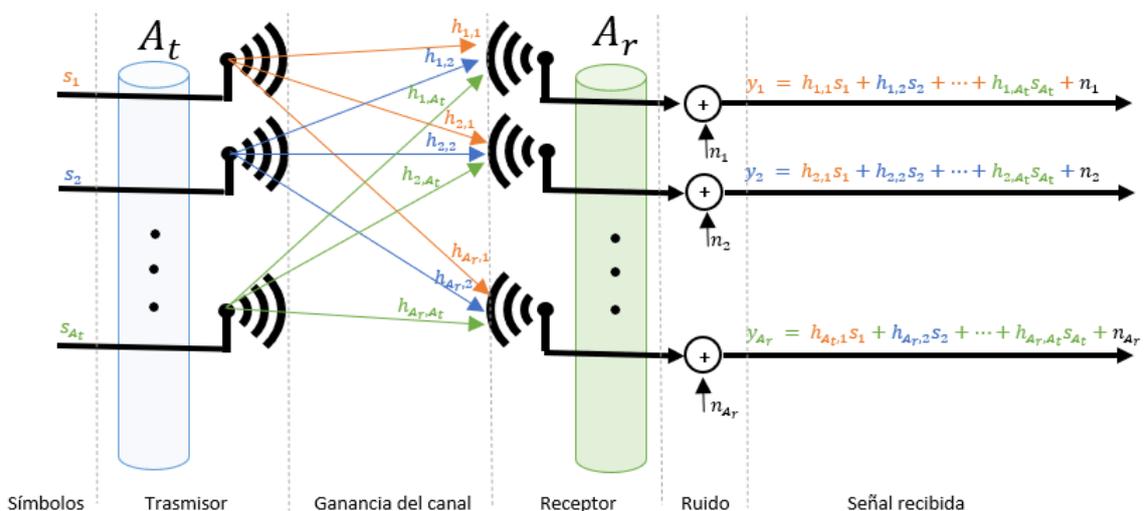


Figura 14. Señal recibida en el sistema MIMO.

La relación de entrada y salida del sistema MIMO se puede representar de una forma matricial, la cual encapsula las diferentes rutas que recorren los símbolos transmitidos en el sistema. Así, las señales recibidas se pueden escribir como

$$y = Hs + n, \quad \text{Ecuación 7}$$

donde y es el vector que contiene las señales recibidas a las A_r antenas que es un vector fila columna con A_r filas y , por lo tanto, se puede escribir como:

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_{A_r})^T$$

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{A_r} \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 8}$$

3.2.1 Símbolos Transmitidos

En la actualidad se utilizan las técnicas de modulación las cuales permiten aumentar la información enviada al mismo tiempo, dando un mejor uso al canal inalámbrico.

Para la presente investigación se utilizará la técnica de modulación de transmisión por desplazamiento binaria (BPSK) y la modulación por amplitud en cuadratura de orden cuarto (4-QAM).

Lo que se consigue es poder codificar los bits transmitidos en una constelación de símbolos para poder así aprovechar de mejor modo el canal inalámbrico.

Los símbolos transmitidos por las A_r antenas transmisoras son símbolos complejos pertenecientes a una constelación. Estos símbolos se representan como s_1, s_2, \dots, s_{A_r} cómo se puede observar en la Figura 14.

Estos símbolos son representados por el vector columna s de dimensión $(A_t \times 1)$, es decir estos símbolos son transmitidos por cada antena transmisora. El vector de símbolos se representa de la siguiente manera:

$$s = (s_1, s_2, \dots, s_{A_t})^T$$

$$s = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{A_t} \end{pmatrix}$$

Ecuación 9

3.2.2 Ganancia del Canal Inalámbrico

La ganancia del canal es una atenuación producida por el canal inalámbrico. En este trabajo consideraremos que la envolvente de cada ganancia es el desvanecimiento que se modela por una variable aleatoria tipo Rayleigh, por lo tanto, cada ganancia $h_{k,l}$ son variables Gaussianas aleatorias complejas de media cero y varianza normalizada.

En la ecuación 10, las ganancias del canal están dentro de una matriz H de dimensiones $(A_r \times A_t)$ y se representa de la siguiente manera:

$$H = \begin{pmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,A_t} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,A_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{A_r,1} & h_{A_r,2} & \dots & h_{A_r,A_t} \end{pmatrix}$$

Ecuación 10

3.2.3 Ruido

En la ecuación 7, el ruido se representa por el vector n , de dimensión $(A_r \times 1)$, por lo que cada elemento del vector de ruido es la muestra de AWGN que afecta a la señal recibida en cada antena, en consecuencia, los elementos n son variables aleatorias Gaussianas complejas de media cero y varianza σ_n^2 (Carvajal, 2019).

$$n = (n_1, n_2, \dots, n_{A_r})^T$$

$$n = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{A_r} \end{pmatrix}$$

Ecuación 11

Por lo expuesto, el vector y se puede obtener de la siguiente manera:

$$y = Hs + n$$

$$y = \begin{pmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,A_t} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,A_t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{A_r,1} & h_{A_r,2} & \cdots & h_{A_r,A_t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{A_t} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{A_r} \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 12}$$

El resultado de la operación en la ecuación 12 se describe a continuación en donde se puede observar el vector resultante de la señal recibida en la cual cada fila es la salida que se muestra en cada antena de la Figura 14.

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{A_t} \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 13}$$

3.3 Detector de Máxima Verosimilitud (MLD)

La detección de máxima verosimilitud es el detector de mejor desempeño y por lo tal es conocido como detector óptimo, permitiendo minimizar la probabilidad de error de bit del sistema, pues se realiza una búsqueda exhaustiva de entre todos los posibles vectores de símbolos candidatos.

En otras palabras, el detector óptimo realiza el cálculo de una métrica con todas las posibles opciones, y escoge el vector de símbolos que genera el menor valor de la métrica, es decir compara con la métrica de menor valor con la posible constelación usada, permitiendo encontrar el símbolo transmitido en cierta posición, por lo que se hace referencia a una demodulación en la cual se extrae el dato enviado en dicho símbolo. En simulación, se compara el vector de bits transmitidos con el vector de bits detectado por el MLD y se establece el número de bits recibidos con error, esto permite cuantificar la probabilidad de error de bit del sistema.

La principal desventaja de MLD es el incremento de su complejidad en el receptor, cuando el número de antenas trasmisoras o el orden de la modulación aumenta, lo cual incrementa el procesamiento de recepción.

Lo expuesto en el párrafo anterior constituye una particularidad muy importante, debido a que, si bien sabemos que es un detector óptimo con un buen rendimiento, su complejidad es exponencial y su alto procesamiento lo hace poco atractivo para su implementación en escenarios prácticos con un gran número de antenas de transmisión. De manera particular, la complejidad de este detector es del orden de M^{At} (Zenitha & Savitha, 2014), donde M es el orden de la modulación empleada, es decir, M es el número de símbolos que tiene la constelación.

Las desventajas antes señaladas constituyen un reto en la investigación, las mismas que conllevan a las razones por las que se ha escogido este tipo de detector, para mitigar las pérdidas de información en la comunicación debido a su desempeño.

El funcionamiento de MLD se basa en decidir por el vector de símbolos de interés \hat{s} por lo tanto tiene la menor métrica, la cual es dada por (Zenitha & Savitha, 2014):

$$\Phi(\hat{s}) = \|y - H\hat{s}\|^2, \quad \text{Ecuación 14}$$

donde \hat{s} es uno de los posibles vectores de símbolos transmitidos. Se lo puede comparar con un algoritmo de fuerza bruta, el cual calcula todas a las posibles soluciones y la métrica de menor valor, es el símbolo transmitido, por lo tanto, se puede denotar como: (Sim, Kim, Kim, & Lee, 2019)

$$\hat{s} = \arg \min \Phi(\hat{s}) \quad \text{Ecuación 15}$$

Este algoritmo es capaz de comparar la señal recibida con todos los posibles vectores transmitidos, a esta estimación se le conoce como \hat{s} .

La Figura 15 muestra el lugar del receptor en el que debe implementar el detector de MLD, note que las entradas son las señales recibidas y las salidas es el vector de símbolos estimado. Esto se evidencia también en las ecuaciones 13 y 14.

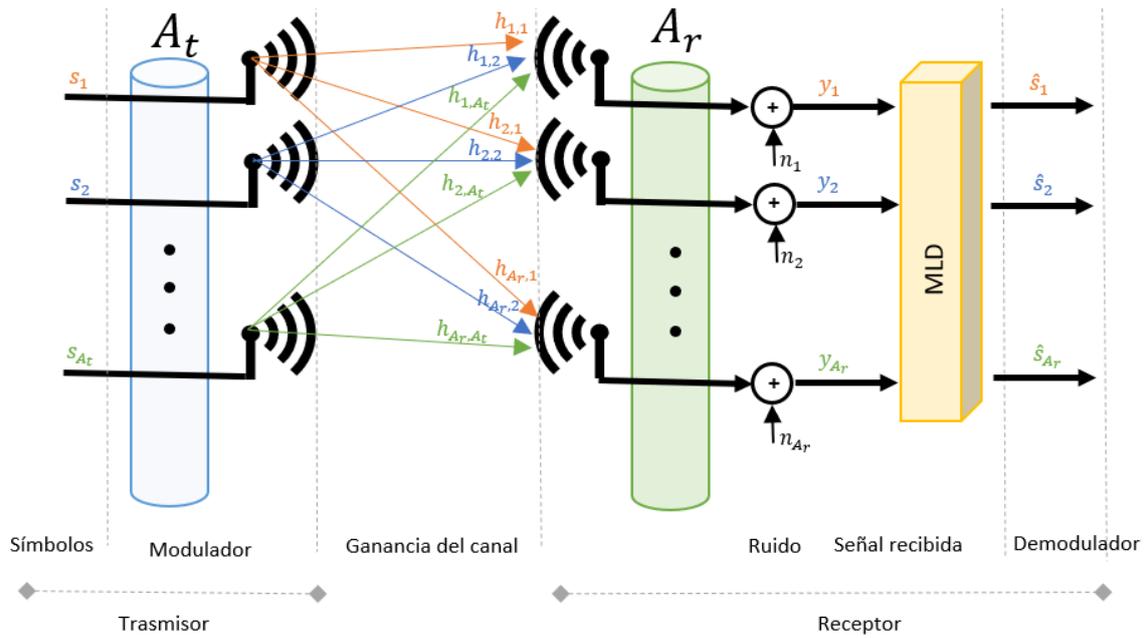


Figura 15. Estructura de MIMO / MLD

La complejidad de este método como se menciona anteriormente es aumentada en función del número de antenas trasmisoras; sin embargo, este detector proporciona la máxima diversidad y garantiza la menor BER.

3.4 Estimación Imperfecta del Canal.

De la ecuación 14 podemos determinar que el detector MLD para la recuperación del vector de símbolos transmitidos, requiere conocer la matriz \mathbf{H} , es decir, necesita que se realice una estimación perfecta del canal de comunicaciones.

Sin embargo, en la realidad las estimaciones del canal no pueden ser perfectas, por lo que se considera que en cualquier sistema de comunicación real exista cierto error en la estimación de las ganancias del canal, por esta razón, en el presente trabajo se considera que el canal de comunicaciones sea estimado de forma imperfecta en el receptor.

Esta estimación imperfecta del canal afecta al algoritmo de detección óptimo, en el cual se emplea una matriz estimada del canal, por lo tanto, la métrica definida en la ecuación 14 se puede reescribir de la siguiente manera (Wang, Au, Murch, & Lau, 2007)

$$\Phi(\hat{s}) = \|y - \hat{H}\hat{s}\|^2, \quad \text{Ecuación 16}$$

dónde \hat{H} es la ganancia estimada del canal y se la puede describir como:

$$\hat{H} = \sqrt{1 - e^2} H + e\Omega, \quad \text{Ecuación 17}$$

dónde $e\Omega$ es la estimación de error, que no está correlacionada con H , los elementos de Ω es una matriz de dimensiones $(A_r \times A_t)$ las cuales son Gaussianas complejas de media cero y varianza uno independiente e idénticamente distribuidos. El factor ρ representa el coeficiente de correlación entre la matriz real H y la estimada \hat{H} . Se considera que este factor de correlación es el mismo para todas las ganancias del canal y es igual a (Wang, Au, Murch, & Lau, 2007)

$$\rho = 1 - e^2 \quad \text{Ecuación 18}$$

La estimación del canal está basada en los valores que asume el factor ρ de correlación expresado en otras palabras $\rho \in (0, 1)$ donde $\rho = 1$ corresponde a la estimación perfecta del canal. Por otra parte $\rho = 0$ implica una estimación totalmente imperfecta de canal.

Por lo tanto, si despejamos e de la ecuación 18 resulta en $0 \leq e \leq 1$. Por lo tanto e es la medida de la calidad de la información del estado del canal en el cual $e = 0$ implica que no hay error en la estimación y $e = 1$ implica que la estimación es completamente imperfecta, consecuentemente,

$$e = \sqrt{1 - \rho^2} \quad \text{Ecuación 19}$$

por lo tanto, ganancia estimada del canal \hat{H} se podría representar en función de ρ y e como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\hat{H} = \rho H + e\Omega, \quad \text{Ecuación 20}$$

Este enfoque de estimación imperfecta del canal se utilizará en la implementación del código en Matlab para la simulación del sistema estudiado. Este código se detalla y explica en la sección siguiente.

3.5 Código en Matlab.

En este apartado se presenta el algoritmo desarrollado en el software de Matlab utilizando para simular el sistema MIMO propuesto. Específicamente se describirán las secciones principales de los *scripts*, empleados para la realización del presente trabajo.

Un *script* es un archivo que contiene varias líneas secuenciales de comandos y llamadas a funciones de Matlab (Zarrinkoub, 2014).

Este apartado se divide en dos principales secciones las cuales describen el algoritmo para generar las modulaciones de BPSK y 4-QAM además de una sección en la cual se describirá cómo se grafican los diferentes resultados para esta investigación. Como dato importante para esta sección se utilizará la nomenclatura que se utilizó en los diferentes *scripts*, que se encuentran en la sección de anexos.

3.5.1 Simulación para BPSK

El algoritmo empleado para simular el sistema MIMO con modulación BPSK se muestra en las figuras 16 a la 21. En la línea 1 de la Figura 16 se muestra el ingreso de todos los parámetros iniciales, a la cual posteriormente se hará el llamado en el *script INDEX* de ejecución y se procederá a realizar las gráficas relacionadas con la probabilidad de error de bit.

Luego se identifica la sección de parámetros del canal como se muestra en Figura 16, en las líneas subsiguientes se define la varianza de las Gaussianas complejas empleadas para generar la ganancia del canal, esto es

$$\sigma = 1/\sqrt{2}, \quad \text{Ecuación 21}$$

se escoge este valor debido a que permite normalizar la potencia media del desvanecimiento, la cual es igual a $2 * \sigma$. Posteriormente se transforma el Es/No , de una escala logarítmica a una escala lineal,

$$EbNo = 10^{\left(\frac{Eb_No_dB}{10}\right)}, \quad \text{Ecuación 22}$$

Posteriormente determinamos la relación entre la potencia recibida por símbolos y la potencia del ruido Es/No para esto multiplicamos el número de bits transmitidos en un símbolo $bits_x_symbol$, por la relación Eb/No , como se describe:

$$Es_No = bits_x_symbol * Eb_No, \quad \text{Ecuación 23}$$

con el Es/No se puede calcular la desviación estándar del ruido $desv_pad_ruido$,

$$desv_pad_ruido = \sqrt{1/(2 * Es_No)}, \quad \text{Ecuación 24}$$

también se especifica el cálculo de la energía media de la constelación mediante la siguiente formula (Barry, Lee, & Messerschmitt, 2004):

$$E_media_const = (M^2 - 1)/3, \quad \text{Ecuación 25}$$

```

1  function [BER_Sim] = MLD_MIMO_BPSK(Ant_tx, Ant_rx, Eb_No_dB, M, ro, erros)
2  %% Parámetros de entrada
10
11  %% Parámetros del canal
12 -  Sigma = 1/sqrt(2);
13 -  Eb_No = 10^(Eb_No_dB/10);
14 -  Es_No = log2(M) * Eb_No;
15 -  desv_pad_ruido = sqrt(1/(2*Es_No));
16 -  E_media_const = (M^2 - 1)/3;
17 -  bits_x_symbol = log2(M);

```

Figura 16: Script MLD_MIMO_BPSK Parámetros del canal

En la variable *Options* se almacenan los vectores candidatos que serán empleados por el detector MLD, para esto se utiliza la función *npermutek* que es una función de permutaciones sin repeticiones. Esta función *npermutek* (*v*, *k*) devuelve todas las permutaciones posibles de *k* elementos del vector *v* sin

repeticiones, de modo que k debe ser menor o igual que el número de elementos en v (Syed, 2020), así en la línea 20 de la figura 17 muestra cómo realizar una matriz de *Options* en función de las entradas *Ant_tx* antenas de transmisión, las cuales genera una combinación de 1s y -1s los mismos que no se repiten en la matriz.

```

18
19 %% Opciones
20 Options = npermutek([1 -1],Ant_tx).';
..

```

Figura 17. Vector *Options* para BPSK

La Figura 18 muestra la sección de modulación PAM en la cual se genera símbolos modulados con BPSK. Los bits transmitidos se representan por (*Bits_tx*) y se generan utilizando la siguiente línea de código:

$$Bits_tx = round(rand(Ant_tx, bits_x_symbol)), \quad \text{Ecuación 26}$$

En la cual se generan números uniformes distribuidos entre 0 y 1, luego los mismo son redondeados. Esto permite generar 0s y 1s con la misma probabilidad. Además, el número de bits generado depende del orden de la modulación empleada, así la variable *bits_x_symbol* es utilizada. Además, se generan los bits en función del número de antenas de transmisión, definido por la variable *Ant_tx*

El comando *pammod* o modulación de amplitud de fase, se realiza utilizando la siguiente línea de código:

$$y = pammod(x, M, ini_phase, symbol_order), \quad \text{Ecuación 27}$$

dónde *ini_phase* especifica la fase inicial de la señal modulada en radianes y *symbol_order* especifica cómo la función asigna palabras binarias a los enteros correspondientes. Si *symbol_order* se establece en 'bin' (predeterminado), la función utiliza un orden natural codificado en binario. Si *symbol_order* se establece en 'Gray', utiliza un orden de constelación Gray (MathWorks, *pammod*, 2020).

$$Symb_{tx} = \text{real}(\text{pammod}(\text{bi2de}(\text{Bits}_{tx}, 'left - msb'), M, 0, 'gray')), \text{Ecuación 28}$$

Utilizando la ecuación 27 podemos deducir la ecuación 28, en la línea 25 de la Figura 18 se crean los bits de forma radón y aleatorio, este vector es del tamaño del número de las antenas de transmisión, luego por temas de simulación se necesita encapsular estos bits transmitidos en símbolos utilizando el comando explicado en la ecuación 27 `pammod`, los cuales se trasforman de binario a decimal mediante el comando `bi2de` y pasar los bits alojados es `Bits_tx` a decimal para luego trasponerlo para las operaciones respectivas, y todo esto debe estar estos bits y distribuidos en una constelación Gray.

```

24      %% Modulación PAM
25 -    Bits_tx = round(rand(Ant_tx, bits_x_symbol));
26 -    Symb_tx = real(pammod(bi2de(Bits_tx, 'left-msb'), M, 0, 'gray'));
27 -    S_norm = Symb_tx./sqrt(E_media_const);
28 -    Bits_tx = reshape(Bits_tx.', 1, []);

```

Figura 18. Sección Modulación PAM

Posteriormente, se normaliza la potencia de los símbolos trasmitidos. Así, los símbolos con potencia normalizada se almacenan en la variable `s_norm`. Finalmente, se traspone el vector de símbolos trasmitidos como se muestra en la línea 28 de la Figura 18.

En la figura 19, se puede observar los parámetros del canal, se genera la matriz H y el vector de ruidos N , esto se realiza en las líneas de código mostrado en la Figura 19, donde la función `randn(X, Y)` permite generar una matriz ($X \times Y$) con varianzas aleatorias Gaussianas de media cero y varianza unitaria. Así, el producto por `Sigma` y el `desv_pad_ruido`, permite modificar la varianza de las variables aleatorias Gaussianas.

```

30      %% Canal
31 -      H = Sigma*(randn(Ant_rx,Ant_tx)+li*randn(Ant_rx,Ant_tx));
32 -      N = desv_pad_ruido*(randn(Ant_rx,1)+li*randn(Ant_rx,1));

```

Figura 19 Sección Canal para BPSK

En la siguiente sección se establecen los parámetros para la estimación imperfecta del canal, donde se utiliza el coeficiente e que se presentó en la ecuación 20, también se genera la matriz Ω y la matriz \hat{H} que en la simulación aparece como $H_{estimada}$ como se deduce de la ecuación 17.

```

34      %% Canal imperfecto
35 -      e = sqrt(1-(ro)^2);
36 -      Omega = Sigma*(randn(Ant_rx,Ant_tx)+li*randn(Ant_rx,Ant_tx));
37 -      H_estimada = (ro)*H + e*Omega;

```

Figura 20 Sección Canal imperfecto para BPSK

Finalmente, en la sección MLD generamos el detector óptimo para ello se considera un vector con métricas denominado la variable *Metricas* en el algoritmo, en el cual se almacenan las métricas calculadas para cada una de los posibles vectores. Esta métrica fue definida en la ecuación 13.

Después pasa a un bucle de repetición, en el cual se calcula la métrica para todos los posibles vectores de símbolos recibidos. En la variable $[\sim, pos]$ se recupera la posición del vector en que se encuentra el mínimo valor de métricas, que a su vez equivale a la posición del vector que minimiza la métrica, conforme se indicó en la ecuación 11.

El siguiente paso es recuperar los símbolos recibido después de haber sido detectado, el cual se guardará en S_{rx_ML} . Finalmente se demodulan los símbolos BPSK recibidos y se recuperan los bits transmitidos en $bits_{rx_ML}$.

Final mente en las líneas 56 de la figura 21 se puede observar cómo se hace la probabilidad de error de bits en función de la cuanta de errores que se hace en la línea 52 que solo compara los bits enviados con los bits recibidos si son iguales no hace nada caso contrario incrementa el contador en uno, y para el número total de bits transmitidos se hace en función del número total de antenas transmitidas multiplicado por el número de bits en un símbolo y multiplicado por el número de repeticiones o símbolos transmitidos.

```

42 %% MLD
43 - Metrics = zeros(1,M^Ant_tx);
44 - for ii = 1:M^Ant_tx
45 -     Metrics(ii) = norm(y - H_estimada*Options(:,ii)).^2;
46 - end
47 - metricas=Metrics
48 - [~,pos] = min(Metrics)
49 - S_rx_ML = Options(:,pos) %Bits rx com ML
50 - bits_rx_ML(S_rx_ML == -1) = 0
51
52 - conta_erros = conta_erros + sum(sum(Bits_tx ~= bits_rx_ML.'))
53 - loops = loops + 1;
54
55 - end
56 - BER_Sim = conta_erros/(Ant_tx*bits_x_symbol*loops);

```

Figura 21 Sección MLD para BPSK

El código completo del script tratado en esta sección se lo puede encontrar en el Anexo 2 del presente documento.

3.5.2 Simulación para 4-QAM

A continuación, se describen el algoritmo empleado para simular el sistema MIMO con modulación 4-QAM, el mismo que se muestra en las figuras 22 a la 24. En la línea 1 de la Figura 22 se muestra el ingreso de todos los parámetros iniciales, estos parámetros serán llamados desde el script INDEX en la cual se procederá a realizar las gráficas resultantes en relación con la probabilidad de error de bit.

Luego se identifica la sección de parámetros del canal en la Figura 22, los mismos fueron expuestos en la sección 3.5.1 con el algoritmo para sistemas MIMO con modulación BPSK.

```

1  function [BER_Sim] = MLD_MIMO_4QAM(Ant_tx,Ant_rx,Eb_No_dB,M,ro,erros)
2  %% Parámetros de entrada
10
11  %% Parámetros del canal
12 -  Sigma = 1/sqrt(2);
13 -  Eb_No = 10^(Eb_No_dB/10);
14 -  bits_x_symbol = log2(M);
15 -  Es_No = bits_x_symbol*Eb_No;
16 -  desv_pad_ruido = sqrt(1/(2*Es_No));
17 -  E_media_const = 2*(M-1)/3;

```

Figura 22. Sección parámetros del canal para 4-QAM

En la Figura 22 también se especifica el cálculo de la energía media de la constelación E_{media_const} , para el caso de una modulación 4-QAM, mediante la siguiente formula (Barry, Lee, & Messerschmitt, 2004):

$$E_{media_const} = 2 * (M - 1) / 3, \quad \text{Ecuación 29}$$

En la variable *Options* se almacenan los vectores candidatos que serán empleados en el detector MLD, para ello utiliza la función *npermutek* que se explicó en la sección anterior con BPSK, y además utilizamos la función *qammod* la que nos permite generar una constelación de M-QAM, y esta tenga codificación de Gray, y sus dimensiones estén en función de las antenas trasmisoras, esto garantiza tener una distribución de símbolos sin que estos se repitan.

```

19  %% Opciones
20 -  Options = npermutek(qammod(0:M-1,M,'gray'),Ant_tx).';
21 -  Options = Options./sqrt(E_media_const);
22

```

Figura 23. Sección Opciones para 4-QAM

La Figura 24 muestra la sección de modulación 4-QAM, en la cual se generan símbolos modulados en M-QAM, los bits transmitidos se presentan por Bits_tx se generan utilizando la siguiente línea de código:

$$Bits_tx = round(rand(Ant_tx, bits_x_symbol)), \quad \text{Ecuación 30}$$

En la cual se generan números uniformemente distribuidos entre 0 y 1, luego los mismo son redondeados y generados con la misma probabilidad. Además, el número de bits generado depende del orden de la modulación empleada y es generada en función de las antenas de transmisión variable Ant_tx.

Al igual que la simulación de BPSK, se realiza una matriz aleatoria de bits transmitidos, después se encapsulan los símbolos transmitidos con codificación de Gray para una constelación QAM con el comando qammod, en el cual su funcionamiento es similar al pammod, además también se hace la conversión de bits a decimales para poder utilizarlo en la configuración Gray.

```

26      %% Modulación M-QAM
27 -    Bits_tx = round(rand(Ant_tx, bits_x_symbol));
28 -    Symb_tx = qammod(bi2de(Bits_tx, 'left-msb'), M, 'gray');
29 -    S_norm = Symb_tx./sqrt(E_media_const);

```

Figura 24. Sección Modulación QAM

Posteriormente, se normaliza la potencia de los símbolos transmitidos. Así, los símbolos con potencia normalizada se almacenan en la variable S_norm.

Finalmente, el resto del código que se explica se comporta y se estima de la misma manera, en consecuencia, todo el código para la creación de la función 4-QAM como son los parámetros del canal, la sección de la variable options, modulación M-QAM, la sección del canal, canal imperfecto, vector de muestras recibidas, la sección del detector MLD se muestran el código integro en el Anexo 4.

3.5.3 Código para Generar Gráficos Resultantes

Se describe a continuación el *script INDEX*, en el cual se ejecutarán los algoritmos para graficar las diferentes curvas que permitirán analizar el desempeño del sistema en el próximo capítulo.

En el extracto del código presentado en la Figura 25, en primer lugar, encerramos las diferentes variables, la pantalla y comandos que se hayan ejecutado anteriormente.

A continuación, se establecen los parámetros de entrada en los cuales se establecen los datos para las diferentes simulaciones.

```

1 -   clc; clearvars; close all;
2 -   %% Parámetros de entrada
3 -   Ant_tx = [4 6];
4 -   Ant_rx = 4;
5 -   Eb_No_dB = 0:13;
6 -   M = 2;
7 -   ro = 1;
8 -   erros = 2000;
9 -   savefile = 'BER_M2_Ar4_roll.mat';

```

Figura 25. Sección Parámetros de entrada

En la siguiente sección del código se realiza la simulación como tal, como primer paso se procede a la creación de la matriz BerSim, la cual inicializamos en ceros, para posteriormente llenar los datos producidos por a las funciones generadas para simular los entornos MIMO con modulaciones BPSK y 4-QAM respectivamente. Los nombres de estas funciones son MLD_MIMO_BPSK y MLD_MIMO_4QAM, respectivamente.

Una de las técnicas muy utilizada para aminorar la carga de procesamiento es realizar sentencias de decisión, en las cuales se establezca una menor cantidad de errores para cada valor de relación señal a ruido.

En la línea 24 se establece el llamado de las diferentes funciones BPSK y 4-QAM

```

10     %Simulación
11     BERSim = zeros(length(Ant_tx),length(Eb_No_dB));
12     for kk = 1:length(Ant_tx)
13         for kkk = 1:length(Eb_No_dB)
14             erros = 2000;
15             if Eb_No_dB(kkk) >= 4
16                 erros = 1500;
17             end
18             if Eb_No_dB(kkk) >= 9
19                 erros = 1000;
20             end
21             if Eb_No_dB(kkk) >= 13
22                 erros = 500;
23             end
24             BERSim(kk, kkk) = MLD_MIMO_BPSK(Ant_tx(kk), Ant_rx, Eb_No_dB(kkk), M, ro, erros);
25             save(savefile);
26         end
27     end

```

Figura 26. Código utilizado para minorar la carga de procesamiento.

Para finalizar se describen los parámetros para la creación de las gráficas como son las leyendas, los títulos y las ubicaciones de las gráficas establecidas.

En la Figura 27 se muestran las variables f1, f2 y f3 las cuales son asignadas a cada una de las antenas trasmisoras *Ant_tx*, lo cual permitirá graficar las diferentes entradas del sistema, dichas variables describen la función semilogy lo que me permite trazar datos con escala logarítmica para el *eje y*, y de tipo lineal para el *eje x*, además que en esta sección de código se establece el tipo de línea y color a graficar (MathWorks, Semilogy, 2020), como se muestran en las líneas 29 a la 31. En la línea 32 se muestra cómo se puede dimensionar los límites de los ejes de las gráficas.

Los títulos del eje “x” y eje “y” se establece en las líneas 34 y 35, la leyenda se puede caracterizar en la línea 36, en la cual se establece los títulos; y, en la línea 37 la posición de la misma, la cual se muestra en la Figura 27.

En la sección de código de la línea 36 describe como se establece la posición y el formato de letra de la leyenda de la gráfica.

```

28 %% Parámetros para la Grafica
29 - f1 = semilogy(Eb_No_db,BERSim(1,:), 'r-'); grid on; hold on;
30 - f2 = semilogy(Eb_No_db,BERSim(2,:), 'b--'); grid on; hold on;
31 - f3 = semilogy(Eb_No_db,BERSim(3,:), 'k-x'); grid on; hold on;
32 - axis([0 max(Eb_No_db) 1e-7 1]);
33 - ax = gca; set(ax, 'Position', [0.117857142857143 0.116666666666667 0.858928571428571 0.85952380952381], 'FontSize', 11);
34 - xlabel('$E_b/N_0$ \textnormal{[dB]}$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14.5);
35 - ylabel('$\textnormal{Probabilidad de Error de Bit,}$ \;\; \overline{P_b}$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14.5);
36 - leyenda = legend([f1 f2 f3], {'\hspace{0.1cm}At\hspace{0.1cm}1', '\hspace{0.1cm}At\hspace{0.1cm}2', '\hspace{0.1cm}At\hspace{0.1cm}3'});
37 - set(leyenda, 'Interpreter', 'latex', 'Position', [0.780078242135298 0.800503408253371 0.186883109251593 0.155687067937106], 'FontSize', 12);

```

Figura 27 Sección de parámetros para la gráfica.

CAPITULO IV. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA MIMO/MLD

4.1 Introducción

Es importante analizar el desempeño de sistemas de telecomunicaciones, pues esto permite optimizar el receptor o emplear técnicas para mejorar su funcionamiento.

La probabilidad de error de bit es un parámetro que permite analizar el desempeño de un sistema la cual es la probabilidad con la que los bits llegan con error al receptor, dado que se transmitió un alto número de bits, es decir es la relación entre el número de bits recibidos con errores y el número total de bits recibidos.

En este capítulo se muestran y analizan las gráficas de la probabilidad de error de bit obtenidas utilizando el algoritmo indicado en el capítulo III, este análisis se lo realizará en diferentes escenarios de operación que consideran las modulaciones BPSK y 4-QAM, tomando en cuenta una estimación perfecta e imperfecta del canal de comunicación.

4.2 Análisis de la probabilidad de error de bit

En esta sección, se muestran las curvas de probabilidad de error de bit en función de la relación señal a ruido en diferentes escenarios, es importante indicar que, para efectos de simulación, se ha considerado que la potencia media de símbolos transmitidos y del desvanecimiento han sido normalizadas como se expuso en el capítulo III específicamente en la Figura 16 para el sistema BPSK y de igual forma en la figura 22 para el sistema 4-QAM.

Una vez encontrada la probabilidad de error de símbolos es transformada a probabilidad de error de bit mediante la siguiente ecuación:

$$\overline{P_b} = \frac{\# \text{ total de errores recibidos}}{(\# \text{ de antenas transmitidas})(\# \text{ de bits en un símbolo})(\# \text{ de Símbolos transmitidos})} \quad \text{Ecuación 31}$$

4.2.1 Análisis para BPSK

En la Figura 28 se muestra la probabilidad de error de bit en función de la relación señal a ruido en decibeles (dB), parametrizada por las antenas transmitidas y el factor de correlación ρ considerando un sistema MIMO que utiliza el detector MLD con dos antenas receptoras y modulación BPSK. Específicamente en la Figura 28 se pueden observar curvas para a) $\rho = 0$, b) $\rho = 0,85$, c) $\rho = 0,95$ y d) $\rho = 1$.

Observe que, a medida que la relación señal a ruido aumenta, la probabilidad de error de bit disminuye, esto quiere decir que la potencia de la señal recibida aumenta en relación con la potencia del ruido.

Observe también que, cuando el número de antenas de transmisión aumenta, la probabilidad de error de bit también aumenta, es decir que el desempeño del sistema decae, esto se produce por la existencia de mayor interferencia que debe ser eliminada por el receptor MLD.

Es interesante observar que, en algunos escenarios de operación el número de antenas de transmisión es mayor que el número de antenas de recepción; sin embargo, el sistema MIMO continua operando, esto se debe a que se utiliza el

detector de máxima verosimilitud, en el caso de usarse un detector lineal como el *Zero-Forcing* o MMSE esto no podría ser posible, debido a que, los detectores lineales sacrifican diversidad para poder eliminar la interferencia.

Otro aspecto importante se observa cuando aumenta el número de antenas de transmisión, las curvas se mantienen en paralelo al aumentar la relación señal a ruido, es decir que no se pierde diversidad en el sistema.

En igual importancia observe que, a medida que varía el factor de correlación ρ específicamente, cuando decrece a cero, el desempeño del sistema disminuye hasta llegar a una estimación del canal totalmente imperfecta, lo cual hace que no se pueda recuperar la información transmitida, esto se evidencia en la Figura 28a en la cual se observa que las curvas de la probabilidad de error no decaen a medida que la relación señal a ruido aumenta.

Observe que, a medida que el factor de correlación ρ aumenta, pasando de un estado totalmente imperfecto a un sistema que comienza a eliminar la interferencia y, por lo tanto, recupera los bits transmitidos como se aprecia en la Figura 28b y la Figura 28c. Estos escenarios de operación se los puede encontrar en condiciones similares, asemejándose a un ámbito de operación real.

También se puede observar el desempeño del sistema en escenarios con estimación perfecta del canal, esto ocurre cuando el factor de correlación es igual a uno, el cual se asocia a un comportamiento teórico y se muestra en la Figura 28d.

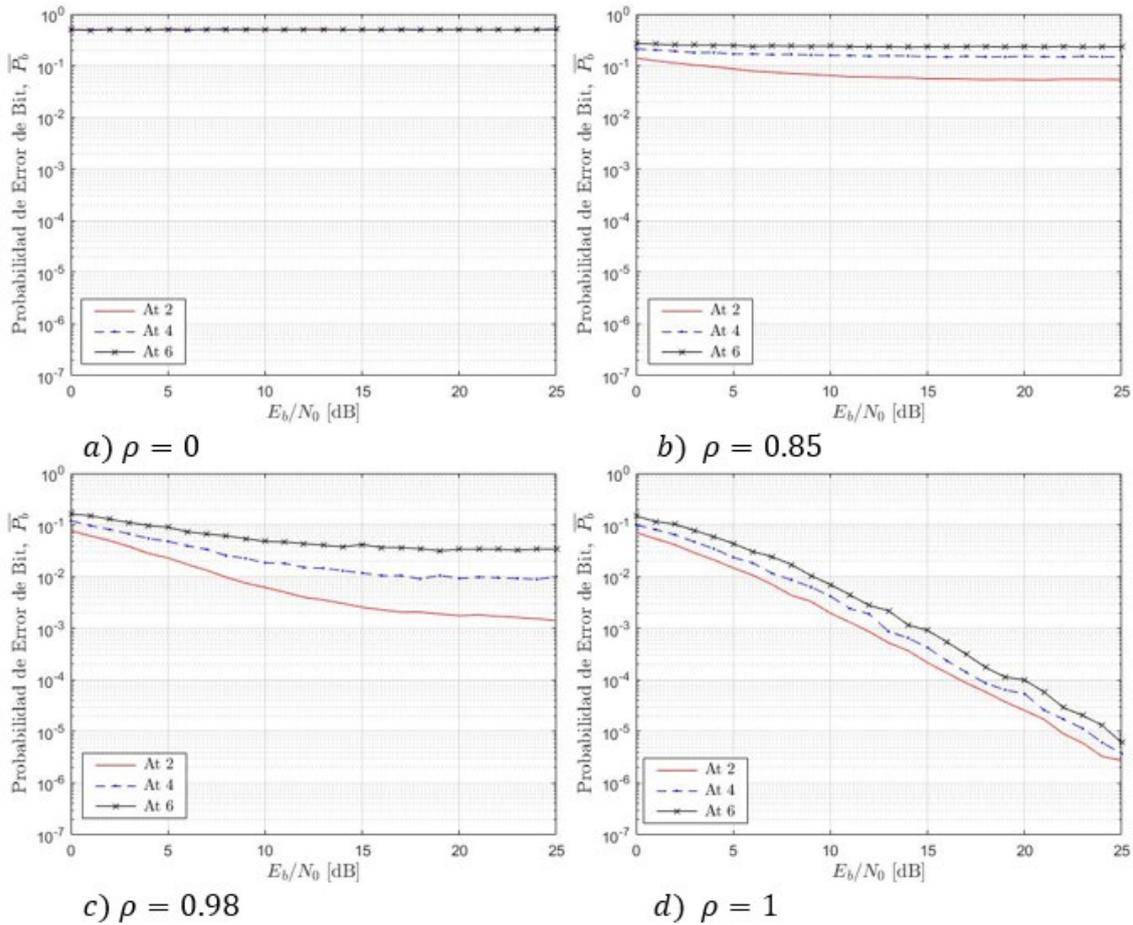


Figura 28 BER en función de $\frac{E_b}{N_0}$, parametrizado por A_t y el factor ρ considerando un sistema MIMO que utiliza MLD con $A_r = 2$ y modulación BPSK.

a) Curvas para $\rho = 0$.

b) Curvas para $\rho = 0.85$.

c) Curvas para $\rho = 0.98$.

d) Curvas para $\rho = 1$.

En la Figura 29 se muestra la probabilidad de error de bit en función de la relación señal a ruido, parametrizada por las antenas de transmisión y el factor de correlación ρ considerando un sistema MIMO que utiliza el detector MLD con cuatro antenas en el receptor y modulación BPSK. Específicamente, en la Figura 29 se puede observar curvas para a) $\rho = 0$, b) $\rho = 0,85$, c) $\rho = 0,95$ y d) $\rho = 1$.

Al igual que en la Figura 28, se observa que, con el aumento de las antenas de recepción la BER aumenta. Además, que cuando se aumentan las antenas de recepción las curvas de la BER siguen siendo paralelas, cumpliendo con el principio de diversidad. Es importante indicar que otro tipo de detectores, como los detectores lineales, no pueden garantizar la diversidad del sistema. Estos detectores pierden diversidad para poder eliminar la interferencia, aspecto que no ocurre con el MLD al ser un detector óptimo.

Del mismo modo, se puede observar en la Figura 29 que, en algunos casos, las antenas de recepción son menores que las antenas de transmisión, sin embargo, el comportamiento del sistema es óptimo, es decir, no pierde la diversidad, debido a la utilización del detector de máxima verosimilitud.

Obsérvese que, el comportamiento que tiene el sistema es similar a la configuración anterior, entre más disminuya el factor de correlación ρ pasa de un estado perfecto a un estado de estimación completamente imperfecto del canal en la cual no se puede recuperar los bits transmitidos de forma correcta, debido que los efectos de la interferencia son más notables.

A medida que las antenas de recepción incrementan, los efectos de interferencia disminuyen considerablemente, debido a que la diversidad espacial del sistema aumenta. Para comprobar lo dicho se procederá a comparar la Figura 28d y la Figura 29d. Así en esta última figura se observa que las curvas de la BER están más juntas cuando se aumenta el número de antenas de transmisión. Esto evidencia que un mayor número de antenas de transmisión mitiga en mejor manera los efectos de la interferencia.

Observe que, al aumentar las antenas de recepción la BER desciende a un valor de los 10^{-7} para un valor de $E_b/N_o = 15 \text{ dB}$ en la Figura 29d. Esto no ocurre en la Figura 28d, en la cual la BER se encuentra alrededor de los 10^{-5} , esto quiere decir que entre mayor número de antenas de recepción la diversidad aumenta y por lo tanto el desempeño mejora.

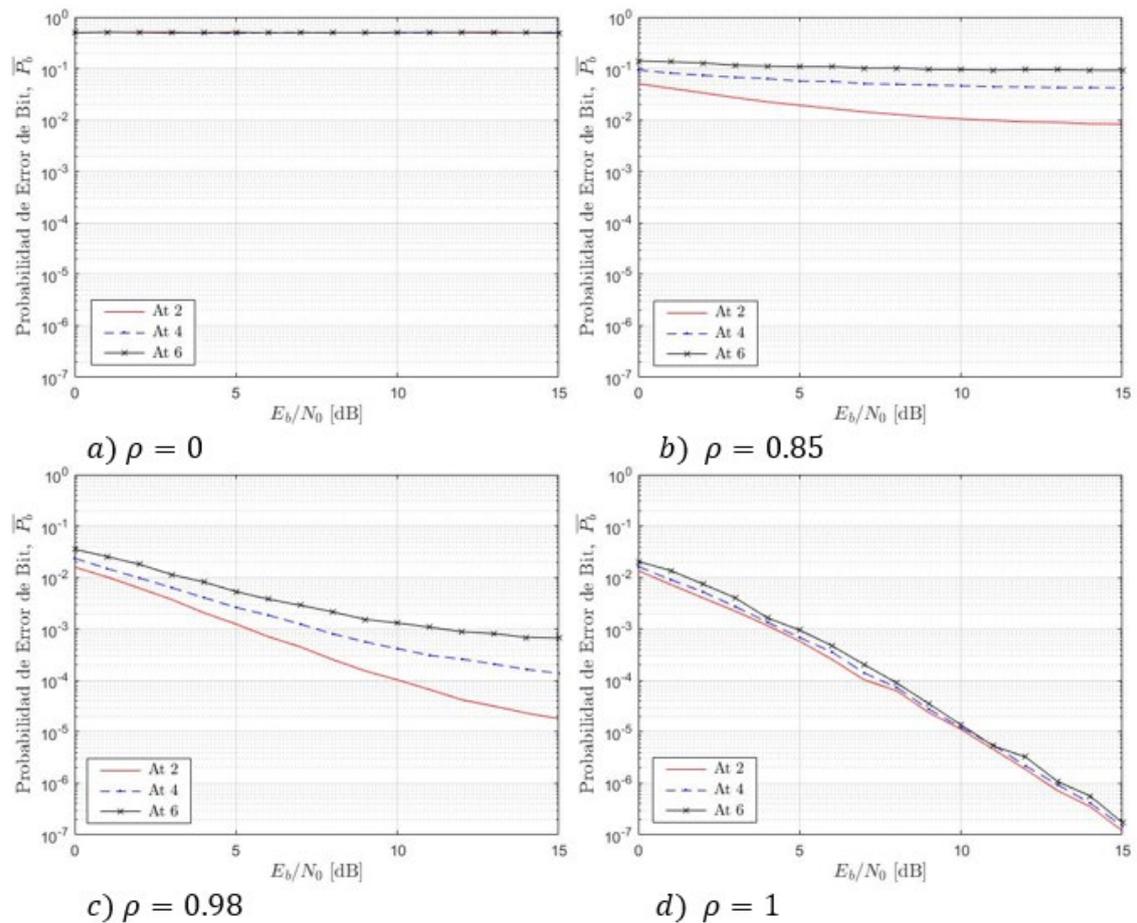


Figura 29 BER en función de $\frac{E_b}{N_0}$, parametrizado por A_t y el factor ρ considerando un sistema MIMO que utiliza MLD con $A_r = 4$ y modulación BPSK.

a) Curvas para $\rho = 0$.

b) Curvas para $\rho = 0.85$.

c) Curvas para $\rho = 0.98$.

d) Curvas para $\rho = 1$.

En la Figura 30 se muestra la probabilidad de error de bit en función del factor de correlación ρ , parametrizada por las antenas transmisoras y la relación señal ruido, considerando un sistema MIMO que utiliza el detector MLD con dos y cuatro antenas receptoras y modulación BPSK. Específicamente en la Figura 30 se muestra a) ρ en el intervalo de 0 a 1 con una relación señal a ruido igual a 25 dB, a.1) muestra una ampliación en la que se expone ρ en el intervalo 0,9 y 1, b)

ρ en el intervalo 0 y 1 con una relación señal a ruido de 15 dB, b.1) muestra una ampliación de ρ entre los valores de 0,9 y 1.

Observe que, a medida que aumenta el coeficiente de correlación ρ el efecto de estimación imperfecta es mitigado generando así una estimación completamente perfecta del canal y, por lo tanto, en este punto se tiene el mejor desempeño del sistema.

Es importante observar que, en esta modulación de BPSK los dos sistemas presentan un desempeño similar cuando existe una estimación perfecta todas las antenas trasmisoras convergen en uno, pero la BER no es la misma. Sin embargo, cuando ρ se encuentra entre 0,4 y 0,90 los efectos de la estimación se combinan con la interferencia provocando que las curvas tengan comportamientos diferentes, es decir, en esta región no se asemejan, debido a que en las diferentes modulaciones el tratamiento de la señal es distinta.

Se puede observar que, a medida que ρ toma valores entre 0 y 0,5 su estimación es totalmente imperfecta y no se podrá recuperar información transmitida, cuando ρ rodea los valores de 0,5 a 0,9 se puede recuperar información transmitida, pero su desempeño es deficiente, como se puede observar en la figura 30 los intervalos mencionados son gobernados por los efectos de la interferencia.

Sin embargo, se puede observar que cuando ρ asume valores dentro del intervalo de 0,9 a 1 se muestra una caída rápida de la curva de la BER. Este aspecto se observa con mayor detalle en la Figura 30b.1.

Por lo antes indicado, se determina que el sistema puede operar de forma adecuada para valores arriba de $\rho = 0,95$ es decir, se requiere de una estimación casi perfecta del canal. Caso contrario, los valores de BER obtenidos no son adecuados para escenarios de operación real del sistema.

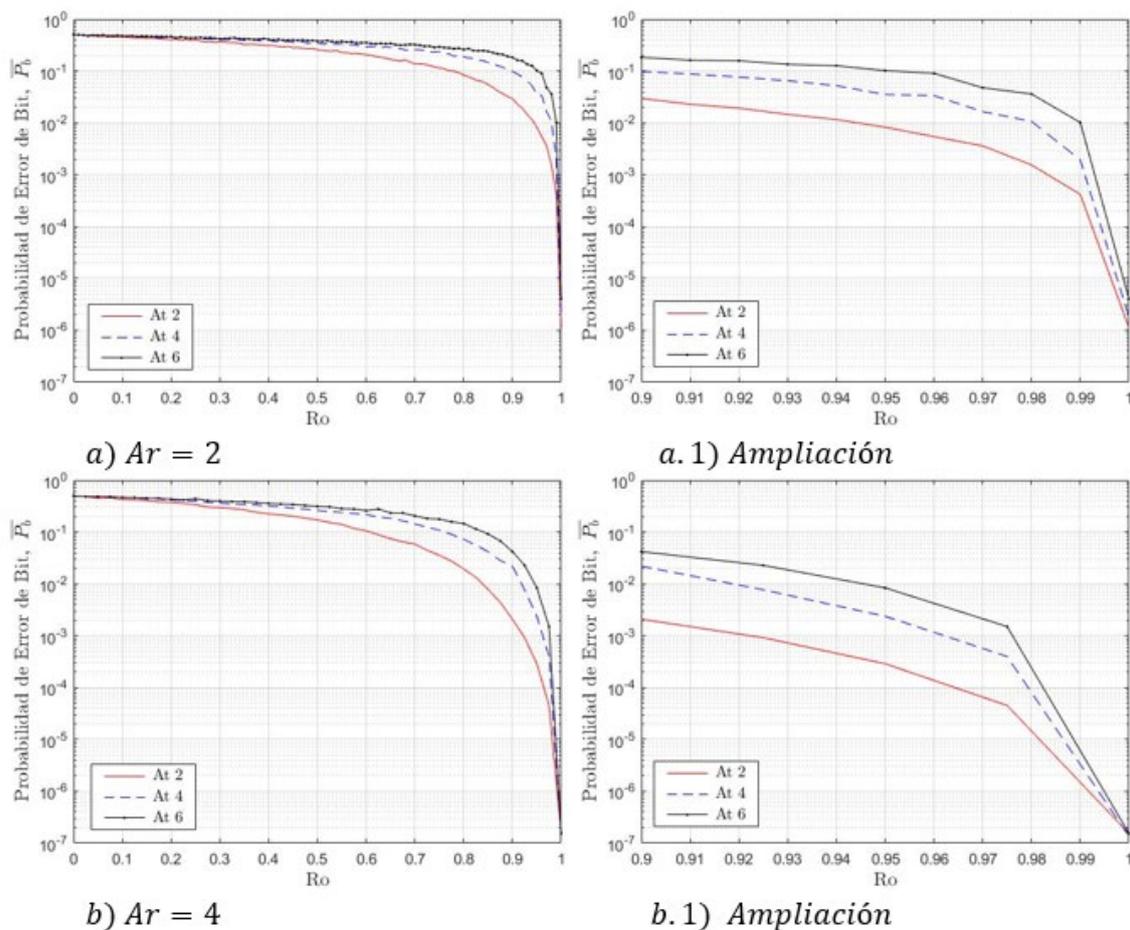


Figura 30. BER en función ρ , parametrizado por A_t y $\frac{E_b}{N_0}$ considerando un sistema MIMO que utiliza MLD con $A_r=2$, $A_r = 4$ y modulación BPSK

a) Curvas para ρ en el intervalo 0 y 1.

a.1) Ampliación de ρ en el intervalo 0,9 y 1.

b) expone ρ en el intervalo 0 y 1.

b.1) Ampliación de ρ en el intervalo 0,9 y 1.

En la Figura 31 se muestra la probabilidad de error de bit en función de las antenas de recepción, parametrizada por las antenas transmitidas, el factor de correlación, considerando una relación señal ruido $\frac{E_b}{N_0} = 15 \text{ dB}$, un sistema MIMO que utiliza el detector MLD con modulación BPSK. Específicamente, en la Figura 31a considera $\rho = 0,93$, en la Figura 31b considera $\rho = 0,98$

Se observa que, a medida que aumentamos las antenas en transmisión y el factor de correlación ρ el desempeño del sistema empeora, si se considera un escenario con dos antenas de recepción en el caso de la Figura 31a el valor de la probabilidad de error de bit se encuentra en valores alrededor de 10^{-1} en cambio en la Figura 31b el valor de la probabilidad de error de bit es de 10^{-2} evidenciando lo antes mencionado.

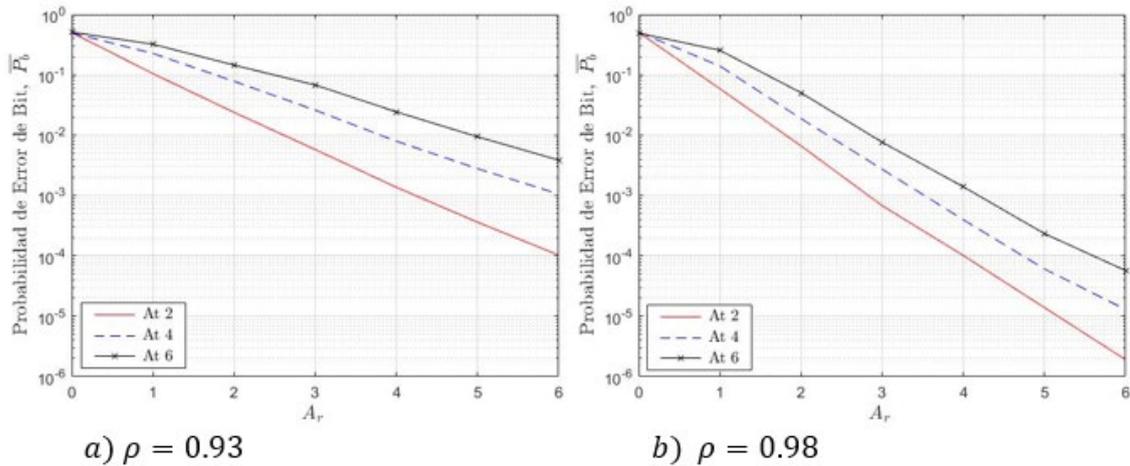


Figura 31. BER en función de A_r , parametrizado por A_t , ρ y $\frac{Eb}{No} = 15dB$ considerando un sistema MIMO que utiliza MLD con modulación BPSK.

a) Curvas para $\rho = 0.93$.

b) Curvas para $\rho = 0.98$.

Se observa que, a medida que el factor de correlación ρ aumenta el sistema tiende a dar una menor eficiencia al procesar la interferencia, si consideramos más antenas se puede mejorar el efecto de la estimación imperfecta, esto quiere decir que, entre más antenas tenga el sistema los efectos de la estimación imperfecta se reducen, debido a que cumple con el principio de diversidad espacial, mitigando los efectos de la interferencia y manteniendo las curvas paralelas entre ellas.

4.2.2 Análisis para 4-QAM

En la Figura 32 se muestra la probabilidad de error de bit en función de la relación señal a ruido en decibeles (dB), parametrizada por las antenas de transmisión y el factor ρ considerando un sistema MIMO que utiliza el detector MLD con dos antenas de recepción y modulación 4-QAM. Específicamente en la Figura 32 se observan curvas para a) $\rho = 0$, b) $\rho = 0,85$, c) $\rho = 0,95$ y d) $\rho = 1$.

Observe que, a medida que la relación señal a ruido aumenta, la BER disminuye, del mismo modo que es afectado BPSK la potencia de la señal a ruido aumenta en relación con la potencia del ruido.

Es importante observar que, para este escenario presenta características similares al sistema de BPSK, a medida que las antenas de transmisión aumentan, la BER también aumenta, es decir que su desempeño decae.

Observe que, al comparar la Figura 32 que es una modulación 4-QAM respecto la Figura 28 en modulación BPSK se puede observar que existe un peor desempeño en las curvas correspondientes a la Figura 32d, incrementando los efectos de interferencias en el sistema. Otro aspecto importante se observa cuando aumenta el número de antenas de transmisión, las curvas de la BER se mantienen en paralelo cuando aumenta la relación señal a ruido, eso se debe a que es sistema no pierde diversidad.

También se puede observar que, a medida que varía el factor de correlación ρ específicamente, cuando decrece a cero, el desempeño del sistema disminuye hasta llegar a una estimación del canal totalmente imperfecta, lo cual hace que no se puede recuperar la información transmitida, esto se evidencia en la Figura 32a en la cual se observa que las curvas de la BER están gobernadas por la interferencia.

Si se comparan las Figuras 28b, 28c versus la Figura 32b, 32c se observa que el sistema de modulación 4-QAM tiene un menor desempeño que el sistema de BPSK, haciendo que la BER decaiga, considerando que, el factor de correlación

establecido es de 98% para este sistema en comparación al sistema BPSK que es de un 95%, para casos de estimación imperfecta.

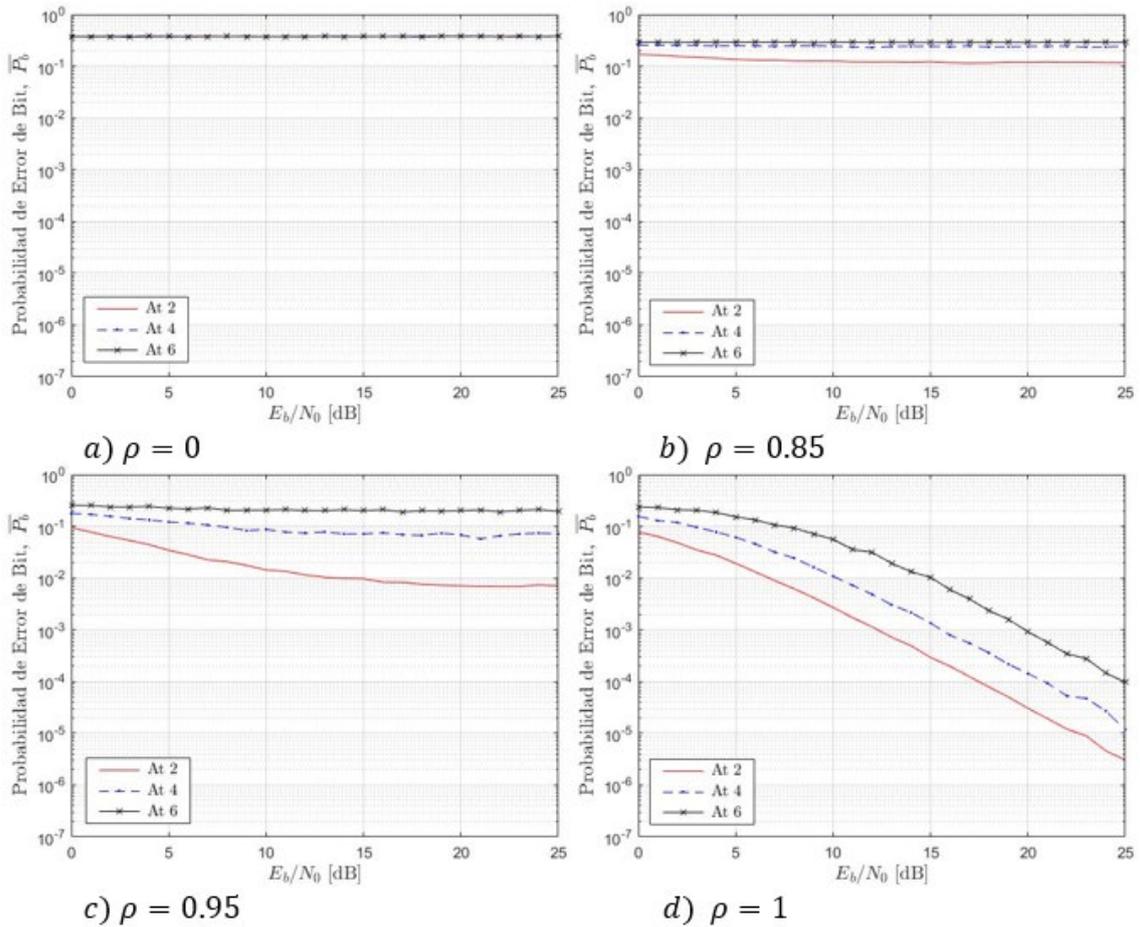


Figura 32 BER en función de $\frac{E_b}{N_0}$ [dB], parametrizado por A_t y el factor ρ considerando un sistema MIMO que utiliza MLD con $A_r = 2$ en modulación 4-QAM.

- a) Curvas para $\rho = 0$.
- b) Curvas para $\rho = 0.85$.
- c) Curvas para $\rho = 0.98$.
- d) Curvas para $\rho = 1$.

También se puede observar, el desempeño del sistema en un escenario con estimación perfecta del canal en la Figura 32d si es comparada con el

comportamiento de la Figura 28d, se observa que el sistema tiene un mejor desempeño, es decir, las curvas son paralelas y más juntas entre las antenas de transmisión, mitigando los efectos de la interferencia sin perder la diversidad del sistema.

Es muy importante observar que, a medida que el orden de modulación se ha incrementado el procesamiento del sistema también ha incrementado exponencialmente, en otras palabras el sistema con modulación BPSK tiene mejor procesamiento en la recuperación de la información en el receptor, sin embargo, en la modulación 4-QAM los efectos de la interferencia intersimbólica son menores.

En la Figura 33 se muestra la probabilidad de error de bit en función de la relación señal a ruido en decibeles (dB), parametrizado por las antenas de transmisión y el factor ρ considerando un sistema MIMO que utiliza el detector MLD con cuatro antenas de recepción y modulación 4-QAM. Específicamente en la Figura 33 se puede observar para a) $\rho = 0$, b) $\rho = 0,85$, c) $\rho = 0,95$ y d) $\rho = 1$.

Al igual que la Figura 32, se observa que el aumento de las Antenas de recepción la BER aumenta. Además, las curvas de la BER siguen siendo paralelas, cumpliendo el principio de diversidad.

Del mismo modo se puede observar que, en la Figura 33 en algunos casos, las antenas de recepción son menores que las antenas de transmisión, sin embargo, el comportamiento es óptimo, debido a que no pierde diversidad, debido a esto el detector MLD se vuelve atractivo para la implementación en las nuevas generaciones de telecomunicaciones.

Observe que el comportamiento de la Figura 33d y el comportamiento de la Figura 32d, se observa claramente que al aumentar las antenas de recepción se mitiga los efectos de interferencia notablemente, debido que las curvas tienden a estar más cercas y paralelas entre ellas.

Observe que, al aumentar las antenas de recepción la BER desciende a un valor de los 10^{-7} para un valor de $E_b/N_0 = 15$ dB en la Figura 33d. Esto no ocurre en

la figura 32d, en la cual la BER se encuentra alrededor de 10^{-6} , esto quiere decir que entre mayor número de antenas de recepción la diversidad aumenta y por tanto el desempeño mejora.

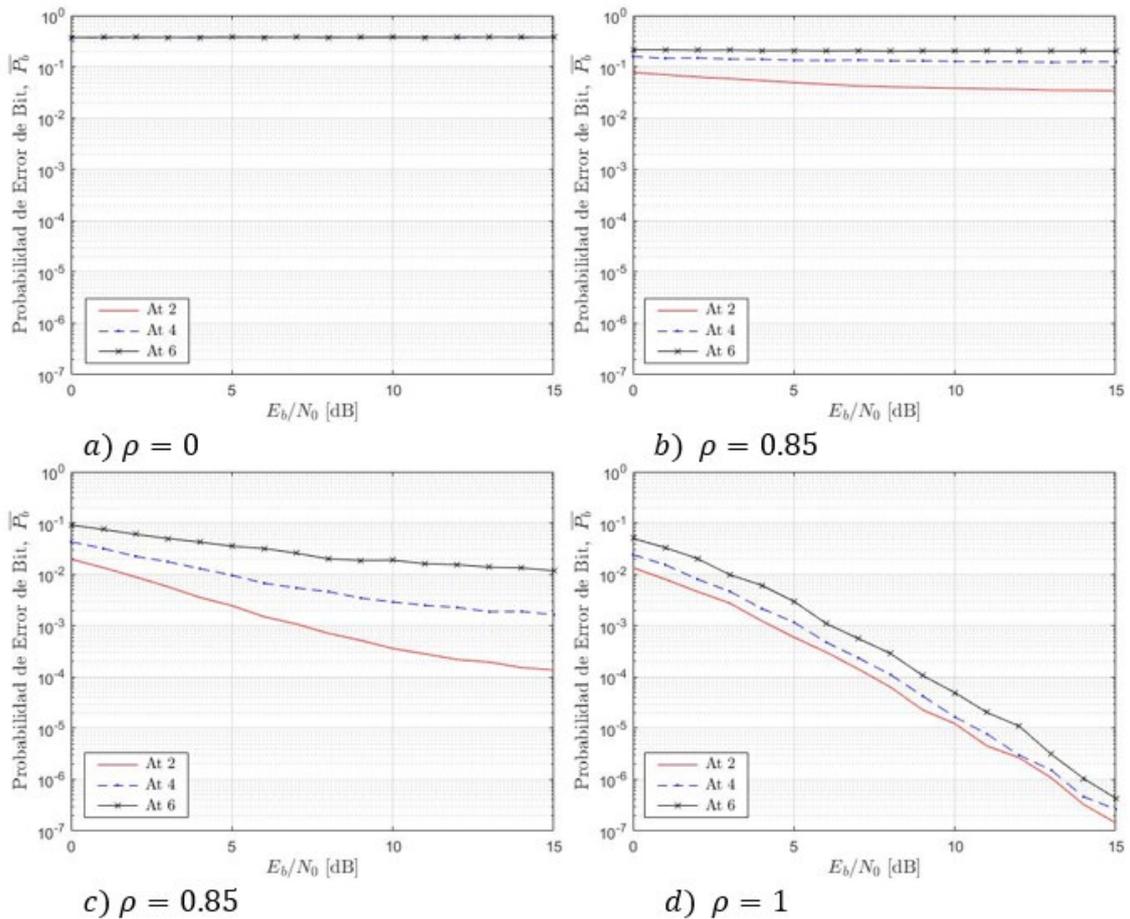


Figura 33 BER en función de la $\frac{E_b}{N_0}$ [dB], parametrizado por A_t y el factor ρ considerando un sistema MIMO que utiliza MLD con $A_r = 4$ en modulación 4-QAM.

- a) Curvas para $\rho = 0$.
- b) Curvas para $\rho = 0.85$.
- c) Curvas para $\rho = 0.98$.
- d) Curvas para $\rho = 1$.

Es interesante observar que, a medida que la complejidad del detector se ha incrementado al tener más antenas de transmisión el detector MLD continúa operando óptimamente.

En la Figura 34 se muestra la probabilidad de error de bit en función del factor de correlación ρ , parametrizada por las antenas transmitidas la relación señal ruido, considerando un sistema MIMO que utiliza el detector MLD con dos y cuatro antenas receptoras y modulación 4-QAM. Específicamente en la Figura 34 se puede observar para a) ρ en el intervalo de 0 a 1 con una relación señal a ruido igual a 25 dB, a.1) muestra una ampliación en la que se expone ρ en el intervalo 0,9 y 1, b) ρ en el intervalo 0 y 1 con una relación señal a ruido de 15 dB, b.1) muestra una ampliación de ρ entre los valores de 0,9 y 1.

Es importante observar que, en esta modulación de 4-QAM los dos sistemas presentan un desempeño similar cuando existe una estimación perfecta todas las antenas trasmisoras convergen en uno, pero la BER no es la misma. Sin embargo, cuando ρ se encuentra entre 0,6 y 0,9 los efectos de la estimación se combinan con la interferencia provocando que las curvas tengan comportamientos diferentes, es decir, en esta región no se asemejan.

Se puede observar que, a medida que ρ toma valores entre 0 y 0,7 su estimación es totalmente imperfecta y no se podrá recuperar información transmitida, cuando ρ rodea los valores de 0,7 a 0,9 se puede recuperar información transmitida, pero su desempeño es deficiente.

Sin embargo, se puede observar que cuando ρ asume valores dentro del intervalo de 0,9 a 1 se muestra una caída rápida de la curva de la BER. Este aspecto se observa con mayor detalle en la Figura 34b.1.

Por lo antes indicado, se determina que el sistema puede operar de forma adecuada para valores arriba de $\rho = 0,98$ es decir, se requiere de una estimación casi perfecta del canal. Caso contrario, los valores de BER obtenidos no son adecuados para escenarios de operación real del sistema.

Haciendo una comparación del comportamiento entre la Figura 30 y el la Figura 34, se observa que las curvas de la BER del sistema 4-QAM, describen un arco más pronunciado con respecto a las curvas del sistema de BPSK, es decir, que el sistema de BPSK es menos sensible a los efectos de estimación imperfecta del canal.

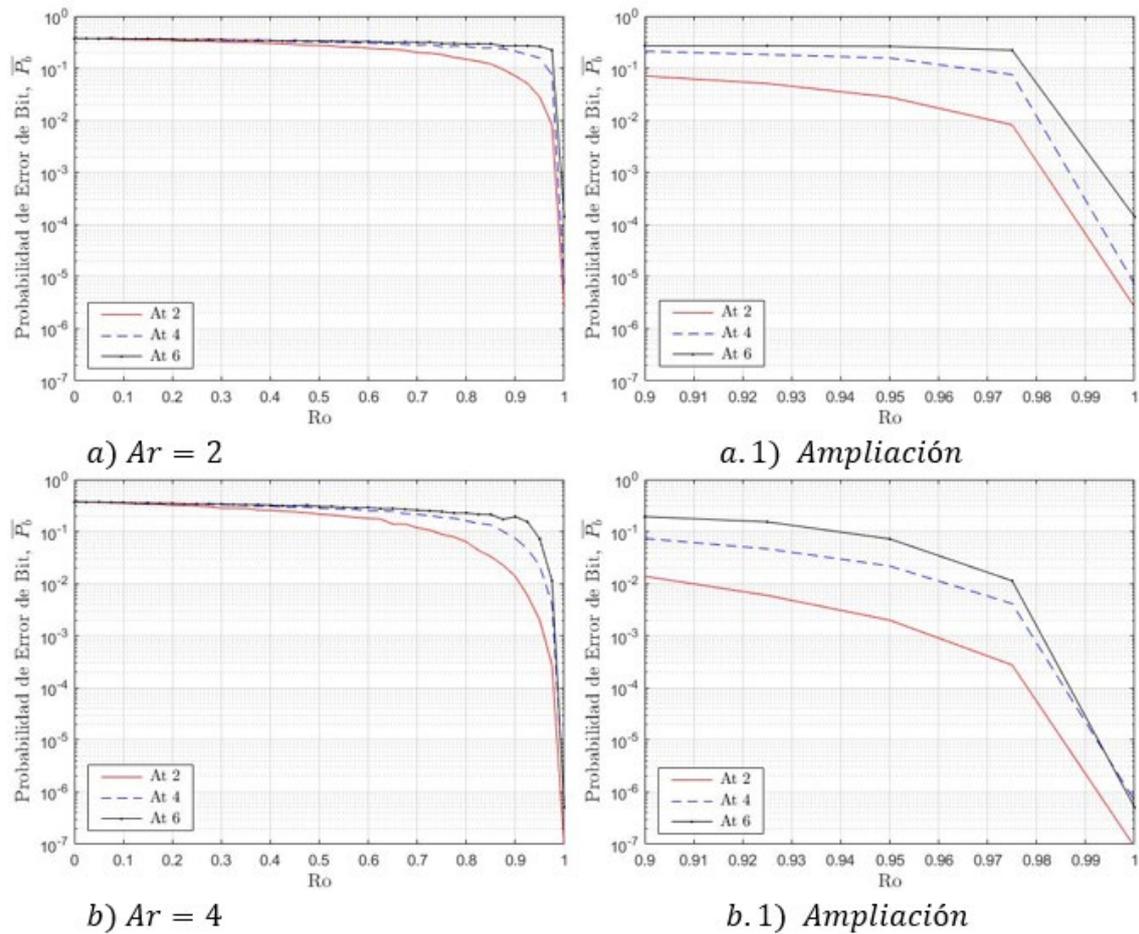


Figura 34. BER en función ρ , parametrizado por A_t y $\frac{E_b}{N_0}$ considerando un sistema MIMO que utiliza MLD con $A_r=2$, $A_r = 4$ y modulación 4-QAM.

a) Curvas para ρ en el intervalo 0 y 1.

a.1) Ampliación de ρ en el intervalo 0,9 y 1.

b) expone ρ en el intervalo 0 y 1.

b.1) Ampliación de ρ en el intervalo 0,9 y 1.

Observe que, en los factores intermedios de ρ a medida que la estimación se va haciendo más imperfecta se comienzan a observar los efectos de la interferencia, pero a medida que la estimación es completamente perfecta las curvas tienden a converger en un mismo punto. Es decir que los efectos de la estimación describen tres principales comportamientos como: la región pésima en la cual está gobernada por la interferencia, la región media con los efectos de la estimación imperfecta que se une con los efectos de la interferencia dando comportamientos distintos a las curvas y la región final y el detector comienza a operar óptimamente despreciando los efectos de la interferencia.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se resumen las principales conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.

5.1 Conclusiones

Basados en los resultados del presente trabajo se puede concluir e indicar lo siguiente:

- Se analizó la probabilidad de error de bit de un sistema MIMO que utiliza el detector de MLD en presencia de estimación perfecta e imperfecta del canal de comunicaciones considerando modulación BPSK y 4-QAM.
- Se observó que a medida que se aumenta el orden de la modulación en un sistema de telecomunicaciones inalámbrico, el desempeño del mismo empeora debido a que el detector realiza muchos más cálculos es decir el procesamiento aumenta. No obstante, la velocidad de transmisión aumenta.
- Se evidenció que a medida que se aumenta el número de antenas de transmisión en el sistema MIMO, se aumenta exponencialmente la complejidad computacional del detector MLD. Esto se pudo notar además en el tiempo de ejecución de las rutinas desarrolladas en Matlab. Por otra parte, se determinó que, si se aumenta el número de las antenas de recepción, entonces el desempeño del sistema mejora debido al aumento de diversidad lo que permite reducir los efectos de la interferencia.
- Se determinó la importancia que tiene el detector MLD para el desarrollo de sistemas MIMO, pues este tipo de detector permite conocer el mejor desempeño que se puede obtener con el sistema. Sin embargo, es notoria su complejidad de tipo exponencial.
- Se observó que cuando la estimación del canal es totalmente imperfecta la probabilidad de error de bit es extremadamente alta, por otra parte, cuando la estimación del canal va mejorando se comienzan a notar los

efectos de la interferencia, producida en sistemas MIMO debido a que todas las antenas transmiten en el mismo canal de frecuencia. Cuando la estimación del canal es perfecta se observa que los efectos de la interferencia decrecen y las curvas de la BER tienden a un mismo valor en función a una alta relación señal a ruido es decir que la interferencia puede ser mitigada por el detector.

- Se evidenció que al aumentar las antenas de transmisión las curvas de la BER se mantienen paralelas a medida que la relación señal a ruido aumenta, esto se debe a que el detector MLD mantiene la diversidad del sistema.
- Se evidenció que el desempeño del sistema es muy sensible al valor del factor de correlación. Específicamente, la BER es muy sensible cuando el factor de correlación aumenta en el de 0,9 a 1. Así, en esta región la BER decae rápidamente cuando la relación señal a ruido y el factor de correlación aumenta.
- Se evidencio que la herramienta de software Matlab es muy robusta y se sobrentiende que es una herramienta que consume casi todos los recursos del computador, sin embargo, para temas de simulación en escenarios en los cuales se necesite repetir el mismo experimento, un gran número de veces, es una de las mejores alternativas de aplicación.
- Finalmente, los resultados obtenidos en esta investigación hacen aún más atractivas este tipo de técnicas por su desempeño y rendimiento, para ser aplicadas en los sistemas móviles de quinta generación 5G.

5.2 Recomendaciones

En la presente sección se presentan recomendaciones fruto del presente trabajo de investigación.

- Se recomienda continuar con investigaciones en torno al detector de máxima verosimilitud, pues debido a sus características es probable que sea implementado en la nueva generación de redes móviles. Además, conforme la electrónica avanza, su implementación será viable en entornos prácticos debido a su buen rendimiento, sin embargo, se recomiendan también trabajar en nuevas estrategias para disminuir su complejidad.
- Se recomienda que los algoritmos creados se ejecuten hasta con seis antenas de transmisión, debido a que el procesamiento requerido es muy alto y el computador podría entrar en un desbordamiento en el procesamiento en el caso de utilizar más antenas de transmisión, haciendo que el sistema operativo colapse o se cuelgue, presentando problemas con la simulación y cierres inesperados del programa, como sucedió en la presente investigación al utilizar escenarios con estimación perfecta con seis antenas de transmisión, cuyo procesamiento es alto por lo que se requirió un equipo con mayor prestaciones como el que se utilizó en la investigación con una memoria RAM de 8 GB y un procesador i7 de octava generación.
- Se recomienda que los valores del factor de correlación ρ tenga una sensibilidad superior para obtener una mejor estimación de los efectos de la estimación imperfecta.
- Se recomienda escoger los valores de relación señal a ruido de forma adecuada en las simulaciones, pues, si se escogen valores demasiado altos entonces las simulaciones demorarán mucho tiempo en ejecución, lo que conlleva a resultados de BER muy bajos, por lo que como referencia se puede indicar que el tiempo empleado para simular un sistema con seis antenas trasmisoras y cuatro antenas de recepción en

modulación 4-QAM con una relación señal a ruido, igual a 15 dB con estimación perfecta, será alrededor de 8 días.

5.3 Trabajos Futuros

En este apartado se describen las posibles recomendaciones para posibles trabajos futuros.

- Se recomienda que esta investigación sea realizada en otro tipo de canales como es el caso del Canal Rice, Canal Nakagami entre otros.
- Se recomienda migrar a un sistema MIMO masivo donde el número de antenas de recepción sean extremadamente alto.
- Se recomienda que este trabajo de investigación sea realizado para modulaciones 16-QAM y 64-QAM.
- Finalmente, se recomienda implementar la técnica de detección de máxima verosimilitud en otro tipo de software, el cual no sobrecargue tanto los recursos del computador como por ejemplo Python.

REFERENCIAS

- Altamirano, C., Minago, J., Carvajal, H. R., & De Almeida, C. (2019, 10 21). BER Evaluation of Linear Detectors in Massive MIMO Systems Under Imperfect Channel Estimation Effects. *IEEE ACCESS*, 7. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2956828
- Anguís, J. (2008). *Redes de Área Local Inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College*. Universidad de Sevilla.
- Antonino, E., Morro, J., & Soto, P. (2017). *Problemas de propagación de ondas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Barry, J., Lee, E., & Messerschmitt, D. (2004). *Digital Communication* (3 ed.). (Springer US, Ed.) doi:10.1007 / 978-1-4615-0227-2
- Carvajal, H. R. (2018). *Bit Error Rate and Spectral Efficiency Evaluation of MC-CDMA Cellular Systems Employing Multiuser Detection*. Ph.D. Tesis UNICAM .
- Carvajal, H. R. (2019). *Digital Modulation Schemes*. Quito, Ecuador: Universidad de las Américas (UDLA).
- Carvajal, H. R. (2019). *Mimo systems and their detection techniques*. Quito, Ecuador: Universidad de las Américas (UDLA).
- Carvajal, H. R. (2019). *Wireless Channel - Modeling, Characteristics and Parameters*. Quito, Ecuador: Universidad de las Américas (UDLA).
- Cho, Y., Kim, J., Yang, W., & Kang, C. (2011). *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. Wiley-IEEE Press.
- García, A., Dawod, M., & Díaz, J. (2018). Modelo de canal de radio multitrayecto para comunicaciones inalámbricas de banda ancha. *Telemática*, 17(1), 15-27. doi:ISSN 1729-3804

- González, D. E. (2019). Recuperado 1 de Mayo de 2020, de <http://media.cubadebate.cu/wp-content/uploads/2019/08/02-impacto-punto-elevado-580x421.jpg>
- Haupt, R. (2020). *Wireless Communications Systems: An Introduction*. Wiley IEEE Press.
- Lin, B., & Choi, J. (2012). Low Complexity MIMO Detection. *Springer*. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8583-5_1
- Márquez, J. (2012). *Curso Instrumentación y Señales: Ruido*. CCADET-UNAM.
- Masukawa, K., & Ochiai, H. (2018). A Coded MIMO Spatial Multiplexing Approach with Low-Complexity Matched-Filter Detector and CRC-Assisted Interference Cancellation. *IEEE*, 541-546. doi:10.1109/MILCOM.2018.8599727
- MathWorks. (2020, 3 30). *pommod*. Recuperado 13 de Mayo de 2020, de https://es.mathworks.com/help/comm/ref/pammod.html#responsive_offcanvas
- MathWorks. (2020, 06 22). *Semilogy*. Recuperado el 22 de junio del 2020 , de <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/semilogy.html>
- Narendra, M. (2013). Study of Transmission Characteristics of MIMO System for Different Modulation Techniques. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. doi:A0931063113/2013©BEIESP
- Perez, C. (2007). *Sistemas de Telecomunicación*. España: UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.
- Proakis, J., & Mosoud, S. (2007). *Digital Communications*. New York: McGraw Hill.

- Raouf, K., Maha, B., Prayongpun, N., & Ammar . (2011). Advanced MIMO Techniques: Polarization Diversity and Antenna Selection. *IntechOpen*. doi:10.5772 / 14375
- Sim, D., Kim, K., Kim, C., & Lee, C. (2019). A Signal-Level Maximum Likelihood Detection Based on Partial Candidates for MIMO FBMC-QAM System With Two Prototype Filters. *IEEE*, 68(3), 2598-2608. doi:10.1109/TVT.2019.2894941
- Syed, F. (2020). *npermutek*. Recuperado el 13 de Mayo de 2020, de <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/69507-npermutek>
- Tsoulos, G. (2018). *MIMO System Technology for wireless communications*. Boca Raton: CRC. doi:<https://doi.org/10.1201/9781315222011>
- Wang, C., Au, E., Murch, R., & Lau, V. (2007, 4 16). Closed-Form Outage Probability and BER of MIMO Zero-Forcing Receiver in the Presence of Imperfect CSI. *IEEE*, 7. doi:10.1109 / SPAWC.2006.346359
- Xia, J., He, K., Xu, W., Zhang, S., Fan, L., & Karagiannidis, G. (2020). A MIMO Detector With Deep Learning in the Presence of Correlated Interference. *IEEE*, 69(4), 4492 - 4497. doi:10.1109/TVT.2020.2972806
- Zarrinkoub, H. (2014). *Understanding LTE with MATLAB - From Mathematical modeling to simulation and prototyping*. John Wiley & Sons, Inc.
- Zenitha, R., & Savitha, H. (2014). Ber performance comparison of mimo systems using ostbc with zf and ml decoding. *ICTACT Journal on Communication Technology*, 05. doi:10.21917/ijct.2014.0148
- Zhu, X., & Murch, R. (2002, 8 2). Performance Analysis of Maximum Likelihood Detection in a MIMO Antenna System. *IEEE*, 50(2). doi: 10.1109 / 26.983313

ANEXOS

Anexo 1. Código INDEX_BPSK para graficar el sistema MLD_MIMO_BPSK.

```

1 -   clc; clearvars; close all; %Borra e inicializa todas las variables
2 -   %% Parámetros de entrada
3 -   Ant_tx = [4 6]; %Antenas de transmisión
4 -   Ant_rx = 4;    %Antenas de recepción
5 -   Eb_No_dB = 0:13; %Relación señal a ruido dB
6 -   M = 2;        %Orden de la modulación |
7 -   ro = 1; %Factor de Correlación
8 -   erros = 2000;
9 -   savefile = 'BER_M2_Ar4_roll.mat';
10 -  %% Simulación
11 -  BERSim = zeros(length(Ant_tx),length(Eb_No_dB));
12 -  for kk = 1:length(Ant_tx)
13 -      for kkk = 1:length(Eb_No_dB)
14 -          erros = 2000;
15 -          if Eb_No_dB(kkk) >= 4
16 -              erros = 1500;
17 -          end
18 -          if Eb_No_dB(kkk) >= 9
19 -              erros = 1000;
20 -          end
21 -          if Eb_No_dB(kkk) >= 13
22 -              erros = 500;
23 -          end
24 -          BERSim(kk, kkk) = MLD_MIMO_BPSK(Ant_tx(kk),Ant_rx,Eb_No_dB(kkk),M,ro,erros);
25 -          save(savefile);
26 -      end
27 -  end
28 -  %% Parámetros para la Grafica
29 -  f1 = semilogy(Eb_No_dB,BERSim(1,:), 'r-'); grid on; hold on;
30 -  f2 = semilogy(Eb_No_dB,BERSim(2,:), 'b--'); grid on; hold on;
31 -  f3 = semilogy(Eb_No_dB,BERSim(3,:), 'k-x'); grid on; hold on;
32 -  axis([0 max(Eb_No_dB) le-7 1]);
33 -  ax = gca; set(ax, 'Position', [0.117857142857143 0.116666666666667 0.858928571428571 0.85952380952381], 'FontSize', 11);
34 -  xlabel('$E_b/N_0$ \textnormal{[dB]}$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14.5);
35 -  ylabel('$\textnormal{Probabilidad de Error de Bit}$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14.5);
36 -  leyenda = legend([f1 f2 f3], {'\hspace{0.1cm}\textnormal{2}', '\hspace{0.1cm}\textnormal{4}', '\hspace{0.1cm}\textnormal{6}});
37 -  set(leyenda, 'Interpreter', 'latex', 'Position', [0.780078242135298 0.800503408253371 0.186883109251593 0.155687067937106], 'FontSize', 12);

```

Anexo 2. Código algoritmo MIMO/MLD BPSK

```

1  function [BER_Sim] = MLD_MIMO_BPSK(Ant_tx,Ant_rx,Eb_No_dB,M,ro,erros) %Creación de la función
2  %% %% Parámetros de entrada
3  % clc; clearvars; close all; %Borra e inicializa todas las variables
4  % Ant_tx = 2; %Antenas de transmisión
5  % Ant_rx = 2; %Antenas de recepción
6  % Eb_No_dB = 15; %Relación señal a ruido dB
7  % M = 2; %Orden de la modulación
8  % ro = 1; %Factor de Correlación
9  % erros = 20;
10
11  %% Parámetros del canal
12  Sigma = 1/sqrt(2);
13  Eb_No = 10^(Eb_No_dB/10); %Relación señal a ruido
14  bits_x_symbol = log2(M);
15  Es_No = bits_x_symbol*Eb_No; %Energía de símbolo
16  desv_pad_ruido = sqrt(1/(2*Es_No)); %Desviación estándar del ruido
17  E_media_const = (M^2 - 1)/3; %Energía media de la constelacion
18
19  %% Opciones
20  Options = npermutek([1 -1],Ant_tx).'; %Vector de posibles símbolos enviados
21
22  conta_erros = 0; loops = 0;
23  while conta_erros <= erros
24      %% Modulación PAM
25      Bits_tx = round(rand(Ant_tx,bits_x_symbol))
26      Symb_tx = real(pammod(bi2de(Bits_tx,'left-msb'),M,0,'gray'));
27      S_norm = Symb_tx./sqrt(E_media_const) %
28      Bits_tx = reshape(Bits_tx.',1,[]); %Transmisión de bits aleatorios
29
30      %% Canal
31      H = Sigma*(randn(Ant_rx,Ant_tx)+li*randn(Ant_rx,Ant_tx)); %Desvanecimientos Rayleigh
32      N = desv_pad_ruido*(randn(Ant_rx,1)+li*randn(Ant_rx,1)); %Ruido AWGN
33
34      %% Canal imperfecto
35      e = sqrt(1-(ro)^2); %Factor de la calidad de la información
36      Omega = Sigma*(randn(Ant_rx,Ant_tx)+li*randn(Ant_rx,Ant_tx));
37      H_estimada = (ro)*H + e*Omega;
38
39      %% Vector de muestras recibidas
40      y = H*S_norm + N;
41
42      %% MLD
43      Metricas = zeros(1,M^Ant_tx);
44      for ii = 1:M^Ant_tx
45          Metricas(ii) = norm(y - H_estimada*Options(:,ii)).^2;
46      end
47      [metricas,~] = min(Metricas)
48      [~,pos] = min(Metricas)
49      S_rx_ML = Options(:,pos) %Símbolos rx com ML
50      bits_rx_ML(S_rx_ML == -1) = 0 %bits rx com ML
51
52      conta_erros = conta_erros + sum(sum(Bits_tx ~= bits_rx_ML.'))
53      loops = loops + 1;
54
55  end
56  BER_Sim = conta_erros/(Ant_tx*bits_x_symbol*loops);

```

Anexo 3. Código INDEX_4QAM para graficar el sistema MLD_MIMO_4QAM

```
1 - clc; clearvars; close all; %Borra e inicializa todas las variables
2 - %% Parámetros de entrada
3 - Ant_tx = 6; %Antenas de transmisión
4 - Ant_rx = 4; %Antenas de recepción
5 - Eb_No_dB = 11:15; %Relación señal a ruido dB
6 - M = 4; %Orden de la modulación
7 - ro = 1; %Factor de Correlación
8 - erros = 2000;
9 - savefile = 'BER_M4_Ar4_roll.mat';
10 - %Simulación
11 - BERSim = zeros(length(Ant_tx),length(Eb_No_dB));
12 - for kk = 1:length(Ant_tx)
13 -     for kkk = 1:length(Eb_No_dB)
14 -         erros = 1500;
15 -         if Eb_No_dB(kkk) >= 3
16 -             erros = 250;
17 -         end
18 -         if Eb_No_dB(kkk) >= 8
19 -             erros = 150;
20 -         end
21 -         if Eb_No_dB(kkk) >= 12
22 -             erros = 50;
23 -         end
24 -         BERSim(kk, kkk) = MLD_MIMO_4QAM(Ant_tx(kk), Ant_rx, Eb_No_dB(kkk), M, ro, erros);
25 -         save(savefile);
26 -     end
27 - end
28 - %% Grafica
29 - f1 = semilogy(Eb_No_dB, BERSim(1,:), 'r-'); grid on; hold on;
30 - f2 = semilogy(Eb_No_dB, BERSim(2,:), 'b--'); grid on; hold on;
31 - f3 = semilogy(Eb_No_dB, BERSim(3,:), 'k-x'); grid on; hold on;
32 - axis([0 max(Eb_No_dB) 1e-7 1]);
33 - xlabel('\$E_b/N_{0}\$ \textnormal{[dB]}', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14.5);
34 - ylabel('\$P_b\$ \textnormal{Probabilidad de Error de Bit,}', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14.5);
35 - leyenda = legend([f1 f2 f3], {'\hspace{0.1cm}\hspace{0.1cm}1', '\hspace{0.1cm}\hspace{0.1cm}2', '\hspace{0.1cm}\hspace{0.1cm}3'});
36 - set(leyenda, 'Interpreter', 'latex', 'Position', [0.780078242135298 0.800503408253371 0.186883109251593 0.155687067937106], 'FontSize', 12);
```

Anexo 4. Código algoritmo MIMO/MLD 4-QAM.

```

1  function [BER_Sim] = MLD_MIMO_4QAM(Ant_tx,Ant_rx,Eb_No_dB,M,ro,erros)%Creación de la función
2  %% %% Parámetros de entrada
3  % clc; clearvars; close all; %Borra e inicializa todas las variables
4  % Ant_tx = 3; %Antenas de transmisión
5  % Ant_rx = 4; %Antenas de recepción
6  % Eb_No_dB = 15; %Relación señal a ruido dB
7  % M = 4; %Orden de la modulación
8  % ro = 0.80; %Factor de Correlación
9  % erros = 2000;
10
11 %% Parámetros del canal
12 Sigma = 1/sqrt(2);
13 Eb_No = 10^(Eb_No_dB/10); %Relación señal a ruido
14 bits_x_symbol = log2(M);
15 Es_No = bits_x_symbol*Eb_No; %Energía de símbolo
16 desv_pad_ruido = sqrt(1/(2*Es_No)); %Desviación estándar del ruido
17 E_media_const = 2*(M-1)/3; %Energía media de la constelación
18
19 %% Opciones
20 Options = npermutek(qammod(0:M-1,M,'gray'),Ant_tx).'; %Vector de posibles símbolos enviados
21 Options = Options./sqrt(E_media_const);
22 conta_erros = 0; loops = 0;
23 while conta_erros <= erros
24
25 %% Modulación M-QAM
26 Bits_tx = round(rand(Ant_tx,bits_x_symbol))
27 Symb_tx = qammod(bi2de(Bits_tx,'left-msb'),M,'gray');
28 S_norm = Symb_tx./sqrt(E_media_const)
29
30 %% Canal
31 H = Sigma*(randn(Ant_rx,Ant_tx)+li*randn(Ant_rx,Ant_tx)); %Desvanecimientos Rayleigh
32 N = desv_pad_ruido*(randn(Ant_rx,1)+li*randn(Ant_rx,1)); %Ruido AWGN
33
34 %% Canal imperfecto
35 e = sqrt(1-(ro)^2); %Factor de la calidad de la información
36 Omega = Sigma*(randn(Ant_rx,Ant_tx)+li*randn(Ant_rx,Ant_tx));
37 H_estimada = (ro)*H + e*Omega;
38
39 %% Vector de muestras recibidas
40 y = H*S_norm + N;
41
42 %% MLD
43 Metricas = zeros(1,M^Ant_tx);
44 for ii = 1:M^Ant_tx
45     Metricas(ii) = norm(y - H_estimada*Options(:,ii)).^2;
46 end
47 metricas=Metricas
48 [~,pos] = min(Metricas)
49 S_rx_ML = Options(:,pos) %Bits rx con ML
50 conta_erros = conta_erros + sum(sum(S_norm ~= S_rx_ML))
51 loops = loops + 1;
52 end
53 BER_Sim = conta_erros/(Ant_tx*bits_x_symbol*loops);

```

Anexo 5. Código INDEX_RO para graficar el comportamiento del coeficiente de correlación en los sistemas MLD_MIMO_4QAM y MLD_MIMO_BPSK.

```

1 -  clc; clearvars; close all; %Borra e inicializa todas las variables
2 -  %% Parámetros de entrada
3 -  Ant_tx = [2 4 6]; %Antenas de transmisión
4 -  Ant_rx = 2;      %Antenas de recepción
5 -  Eb_No_dB = 25;  %Relación señal a ruido dB
6 -  M = 4;         %Orden de la modulación
7 -  ro = 0:0.025:1; %Factor de Correlación
8 -  erros = 2000;
9 -  savefile = 'Ro_M4_Ar2_EbNo25.mat';
10 - %% Simulación
11 -  BERSim = zeros(length(Ant_tx),length(ro));
12 -  for kk = 1:length(Ant_tx)
13 -      for kkk = 1:length(ro)
14 -          erros = 2000;
15 -          if ro(kkk) >= 0.6
16 -              erros = 1000;
17 -          end
18 -          if ro(kkk) >= 0.9
19 -              erros = 400;
20 -          end
21 -          if ro(kkk) >= 0.96
22 -              erros = 20;
23 -          end
24 -          BERSim(kk, kkk) = MLD_MIMO_4QAM(Ant_tx(kk), Ant_rx, Eb_No_dB, M, ro(kkk), erros);
25 -          save(savefile);
26 -      end
27 -  end
28 -  %% Grafica
29 -  f1 = semilogy(ro, BERSim(1,:), 'r-'); grid on; hold on;
30 -  f2 = semilogy(ro, BERSim(2,:), 'b--'); grid on; hold on;
31 -  f3 = semilogy(ro, BERSim(3,:), 'k.-'); grid on; hold on;
32 -  axis([0 max(ro) 1e-7 1]);
33 -  ax = gca; set(ax, 'Position', [0.117857142857143 0.116666666666667 0.858928571428571 0.85952380952381], 'FontSize', 11);
34 -  xlabel('Ro', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14.5);
35 -  ylabel('\textnormal{Probabilidad de Error de Bit}\;\;\;\;\;\overline{P_b}\;\;\;\;\;\;', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14.5);
36 -  leyenda = legend([f1 f2 f3], {'\hspace{0.1cm}At\hspace{0.1cm}2', '\hspace{0.1cm}At\hspace{0.1cm}4', '\hspace{0.1cm}At\hspace{0.1cm}6'});
37 -  set(leyenda, 'Interpreter', 'latex', 'Position', [0.780078242135298 0.800503408253371 0.186883109251593 0.155687067937106], 'FontSize', 12);

```

Anexo 6. Código INDEX_Ar para graficar el comportamiento de las antenas receptoras vs la probabilidad de error de bit.

```

1 - clc; clearvars; close all; %Borra e inicializa todas las variables
2 - %% Parámetros de entrada
3 - Ant_tx = [2 4 6]; %Antenas de transmisión
4 - Ant_rx = 0:1:6; %Antenas de recepción
5 - Eb_No_dB = 10; %Relación señal a ruido dB
6 - M = 2; %Orden de la modulación
7 - ro = 0.98; %Factor de Correlación
8 - erros = 1000;
9 - savefile = 'Ar_M2_ro098.mat';
10 - %% Simulación
11 - BERSim = zeros(length(Ant_tx),length(Ant_rx));
12 - for kk = 1:length(Ant_tx)
13 -     for kkk = 1:length(Ant_rx)
14 -         erros = 1000;
15 -         if Ant_rx(kkk) >= 3
16 -             erros = 500;
17 -         end
18 -         if Ant_rx(kkk) >= 5
19 -             erros = 100;
20 -         end
21 -         BERSim(kk, kkk) = MLD_MIMO_BPSK(Ant_tx(kk), Ant_rx(kkk), Eb_No_dB, M, ro, erros);
22 -         save(savefile);
23 -     end
24 - end
25 - %% Grafica
26 - f1 = semilogy(Ant_rx, BERSim(1,:), 'r-'); grid on; hold on;
27 - f2 = semilogy(Ant_rx, BERSim(2,:), 'b--'); grid on; hold on;
28 - f3 = semilogy(Ant_rx, BERSim(3,:), 'k-x'); grid on; hold on;
29 - axis([0 max(Ant_rx) 1e-6 1]);
30 - ax = gca; set(ax, 'Position', [0.117857142857143 0.116666666666667 0.858928571428571 0.85952380952381], 'FontSize', 11);
31 - xlabel('$A_r$ \textnormal{}$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14.5);
32 - ylabel('$\textnormal{Probabilidad de Error de Bit}$; \; \; \overline{P_b}$', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14.5);
33 - leyenda = legend([f1 f2 f3], {'\hspace{0.1cm}At\hspace{0.1cm}2', '\hspace{0.1cm}At\hspace{0.1cm}4', '\hspace{0.1cm}At\hspace{0.1cm}6'});
34 - set(leyenda, 'Interpreter', 'latex', 'Position', [0.780078242135298 0.800503408253371 0.186883109251593 0.155687067937106], 'FontSize', 12);

```

